



DIVISIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA E INDUSTRIAL



PROCESOS DE MANUFACTURA I

ARMANDO ORTIZ PRADO
OSVALDO RUIZ CERVANTES
JUAN ARMANDO ORTIZ VALERA



udiatem

Fac. Ingeniería, UNAM
Unidad de Investigación y
Asistencia Técnica en Materiales

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

PROCESOS DE MANUFACTURA I

Armando Ortiz Prado
Oswaldo Ruiz Cervantes
Juan Armando Ortiz Valera

DIVISIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA E INDUSTRIAL
DEPARTAMENTO DE MANUFACTURA Y MATERIALES

ORTIZ PRADO, Armando, Osvaldo Ruiz Cervantes y Juan
Armando Ortiz Valera. *Procesos de manufactura I*.
México, Universidad Nacional Autónoma de México,
Facultad de Ingeniería, 2018, 488 p.

Procesos de manufactura I

D.R. © 2018, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
Av. Universidad 3000, Col. Universidad Nacional Autónoma de México,
Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, Cd. Mx., México, C. P. 04510.

FACULTAD DE INGENIERÍA
Avenida Universidad 300, Ciudad Universitaria,
Delegación Coyoacán, C. P. 04510, México, Cd. Mx.
<http://www.ingenieria.unam.mx>

ISBN 978-607-30-0344-5

Primera edición: 27 de abril de 2018

Prohibida la reproducción o transmisión total o parcial
por cualquier medio sin la autorización escrita del titular
de los derechos patrimoniales.

Impreso y hecho en México.

Se agradece al Programa de Apoyo a Proyectos para la Innovación y Mejoramiento
de la Enseñanza el apoyo al proyecto **PE103816** “Desarrollo de material didáctico
para el área de Ingeniería de Manufactura”.

Cuidado de la edición: Elvia Angélica Torres Rojas, Unidad de Apoyo Editorial
Diseño de la portada: Nismet Díaz Ferro, Unidad de Apoyo Editorial

PRÓLOGO

La adecuada formación en ingeniería mecánica, industrial o mecatrónica requiere el conocimiento de los diferentes métodos de transformación de los materiales metálicos, polímeros, compuestos y cerámicos; de esta forma, se pueden tomar decisiones en cuanto a los procedimientos necesarios para producir un cierto componente. Para esto demanda de un profundo conocimiento de los materiales y de sus posibilidades de transformarse, no solo de forma, sino también de sus propiedades y acabados; siempre considerando el respeto al ambiente y así evitar la generación de contaminantes, no solo durante el proceso de fabricación sino también al momento en que el producto deje de ser útil. Qué decir del consumo de energía, el cual deberá ser minimizado, y del responsable uso de materias primas no renovables; y a final de cuentas los productos deberán cumplir con las condiciones de servicio con una calidad garantizada y todo esto al menor costo posible. No importa qué tanto se avance en la sociedad del conocimiento, la población cada vez requiere de mayor y mejores satisfactores, razón por la que los procesos de manufactura seguirán siendo pilar de la economía y necesaria materia de estudio de los futuros ingenieros.

Por lo antes mencionado, es que nos hemos orientado a desarrollar este primer volumen de *Procesos de Manufactura* en el cual se presentan los procesos más comunes utilizados en la transformación de metales, mezclas metales y no metales, plásticos y cerámicos. La intención de este libro es, además, explicar y estudiar los procesos, sus aplicaciones y alcances, así como su análisis y cálculo de variables fundamentales.

Como tal, el volumen se pretende sea utilizado como texto en un primer curso de Procesos de Manufactura y servir como consulta en etapas posteriores de la formación.

Consta de 12 temas los cuales van desde el estudio de los métodos de producción primaria de hierro y acero, los procesos de transformación a partir de metales y aleaciones en estado líquido, la metalurgia de polvos, los métodos de conformado

mecánico de los metales, los procesos de unión y ensamble hasta los métodos de transformación de plásticos y cerámicos.

Para el mejor desarrollo de esta obra, los autores han tomado, y adecuado, materiales que anteriormente se utilizaron en el texto de Modelado de Procesos de Manufactura, también de su autoría, orientando estos a los fines del presente volumen.

Sirva este medio para agradecer la activa participación en la corrección ortográfica, de estilo y en la edición de esta obra por parte de la Unidad de Apoyo Editorial de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, en particular de la Maestra en Letras María Cuairán Ruidíaz, jefa de la Unidad, y de la licenciada Elvia Angélica Torres Rojas, las cuales con infinita dedicación y esmero siempre nos apoyaron para culminar exitosamente esta obra, así como a la LDG Nismet Díaz Ferro por la elaboración de la portada. Sin su apoyo decidido no se hubiera concretado este proyecto.

Asimismo, agradecemos al Programa de Apoyo a Proyectos para la Innovación y Mejoramiento de la Enseñanza (**PAPIME**) de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) de la UNAM, en particular por el apoyo y recursos autorizados para desarrollo del proyecto PE103816 “Desarrollo de material didáctico para el área de Ingeniería de Manufactura”, donde el presente volumen es uno de los productos generados de este proyecto.

Por último, pero no menos importante, sirva este medio para agradecer a nuestros compañeros de la Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales (UDIATEM) de la Facultad de Ingeniería de la UNAM todas sus sugerencias y, en particular, a los Doctores Rafael Schouwenaars y Víctor Hugo Jacobo Armendáriz sus valiosos consejos y apoyo los cuales han enriquecido este trabajo.

Esperamos que ustedes lectores disfruten de la obra y nos retroalimenten para mejorarla en beneficio de las futuras generaciones de ingenieros.

Ciudad Universitaria, a 6 de abril del 2018

ARMANDO ORTIZ PRADO
OSVALDO RUIZ CERVANTES
JUAN ARMANDO ORTIZ VALERA

CONTENIDO

PRÓLOGO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN A LOS PROCESOS DE MANUFACTURA

1.1	GENERALIDADES.....	1
1.2	HISTORIA DE LA MANUFACTURA	10
	<i>Relación entre proceso, material y diseño</i>	11
1.3	CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE FABRICACIÓN.....	14
	<i>Manufactura aditiva</i>	16

CAPÍTULO 2. OBTENCIÓN DEL HIERRO Y PROCESOS DE ACERACIÓN

2.1	GENERALIDADES.....	19
2.2	PRODUCCIÓN DEL ACERO	21
2.3	PREPARACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS	25
	<i>Proceso de coquización</i>	29
2.4	MÉTODO DEL ALTO HORNO	31
	<i>Reacciones químicas que se producen en el interior del horno</i>	35
2.5	PROCESO DE ACERACIÓN	39
2.6	FABRICACIÓN DE ACERO A PARTIR DE PRERREDUCIDOS	45
2.7	PRODUCCIÓN DE LOS LINGOTES DE ACERO.....	50
2.8	SUSTENTABILIDAD EN LA PRODUCCIÓN DE ACERO.....	54

2.9	LA INDUSTRIA SIDERÚRGICA EN MÉXICO	58
	<i>La industria siderúrgica en México al inicio del siglo XXI</i>	63
	<i>Principales productores en México</i>	64
	<i>Retos de la industria siderúrgica instalada en México</i>	66

CAPÍTULO 3. MÉTODOS DE FUNDICIÓN Y COLADA

3.1	CONCEPTOS GENERALES	69
	<i>Tipo de molde</i>	73
	<i>Producción del moldeo</i>	74
	<i>Métodos de moldeo más comunes</i>	78
3.2	MOLDEO EN ARENA.....	84
	<i>Moldeo con arena en verde</i>	87
3.3	PARÁMETROS IMPORTANTES EN EL PROCESO DE FUNDICIÓN	96
	<i>Calentamiento del metal</i>	96
	<i>Vaciado del metal fundido</i>	102
	<i>Análisis del vaciado</i>	103
	<i>Solidificación y enfriamiento</i>	106
	<i>Contracción</i>	107
	<i>Diseño de la mazarota</i>	109
	<i>Diseño de coladas</i>	112
3.4	SUSTENTABILIDAD Y FUTURO DE LA INDUSTRIA DE LA FUNDICIÓN	115
3.5	TENDENCIAS EN LA PRODUCCIÓN MUNDIAL DE PIEZAS COLADAS AL INICIO DEL SIGLO XXI	118

CAPÍTULO 4. METALURGIA DE POLVOS

4.1	GENERALIDADES.....	121
4.2	PROCESO DE PULVIMETALURGIA	124
	<i>Sinterizado</i>	129
	<i>Operaciones suplementarias y de acabado</i>	133
4.3	CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO, VENTAJAS Y APLICACIONES.....	134
	<i>Diseño de piezas para metalurgia de polvos</i>	134

	<i>Ventajas y desventajas del proceso</i>	135
	<i>Aplicaciones de la pulvimetalurgia</i>	136
4.4	PROPIEDADES DE LOS PRODUCTO DE METALURGIA DE POLVOS	138
4.5	FUTURO DE LA PULVIMETALURGIA.....	139

CAPÍTULO 5. CONFORMADO MECÁNICO DE LOS METALES

5.1	GENERALIDADES DE LOS PROCESOS DE DEFORMACIÓN PLÁSTICA	141
	<i>Procesos de deformación volumétrica</i>	143
	<i>Procesos en chapa (láminas metálicas)</i>	145
5.2	OPERACIONES DE FORMADO VOLUMÉTRICO	147
	<i>Laminación</i>	147
	<i>Laminado plano y su análisis</i>	149
	<i>Laminado de perfiles</i>	154
	<i>Arreglos de laminadores</i>	155
5.3	ALGUNAS OPERACIONES DE TRABAJO EN CHAPA	158
	<i>Embutido</i>	158
	<i>Mecánica de embutido</i>	160
	<i>Defectos en el embutido</i>	166
5.4	PRINCIPIOS FUNDAMENTALES DE LOS PROCESOS DE ARRANQUE DE VIRUTA... 166	
	<i>Movimientos de corte</i>	170
	<i>Herramienta</i>	174
	<i>Materiales de herramientas</i>	176
5.5	CRITERIOS DE FALLA	179
	<i>Criterio de Tresca o del máximo cortante</i>	180
	<i>Criterio de Von Mises-Hencky o de la energía de distorsión</i>	182

CAPÍTULO 6. FORJA

6.1	GENERALIDADES.....	187
6.2	CLASIFICACIÓN DE LA FORJA	190
6.3	OPERACIONES DE FORJA	194
	<i>Operaciones efectuadas durante el proceso</i>	194

	<i>Consideraciones para el diseño de la estampa</i>	195
6.4	MATERIALES USUALMENTE FORJADOS.....	197
6.5	CLASIFICACIÓN DE LAS MÁQUINAS PARA FORJA.....	199
	<i>Máquinas para forja por impacto</i>	199
	<i>Máquinas para forja por aplicación de presión</i>	200
6.6	ANÁLISIS DE LAS PRESIONES Y DEFORMACIONES QUE SE PRESENTAN DURANTE EL PROCESO DE LA FORJA.....	203
	<i>Análisis teórico de las presiones y de la carga para la forja libre considerando deformación plana</i>	205
	<i>Otros métodos de cálculo</i>	208
	<i>Diseño y cálculo de una estampa para forja</i>	209
6.7	COMENTARIO FINAL.....	222

CAPÍTULO 7. LAMINACIÓN

7.1	GENERALIDADES.....	225
7.2	PROCESO DE LAMINACIÓN.....	227
	<i>Arreglo de laminadores</i>	228
7.3	TREN DE LAMINACIÓN.....	233
	<i>Elementos de un tren de laminación</i>	235
7.4	ANÁLISIS DEL PROCESO DE LAMINACIÓN	240
	<i>Relaciones geométricas en el laminado</i>	240
	<i>Cálculo experimental de la carga</i>	244
	<i>Método de Ekelund</i>	245
	<i>Análisis teórico de la carga</i>	246
	<i>Cálculo de la carga para laminado en frío</i>	250
	<i>Cálculo de la carga para laminado en caliente</i>	257
	<i>Cálculo de la carga cuando se tienen enrolladores o frenos</i>	260
	<i>Cálculo del par y la potencia</i>	260
	<i>Coefficiente de fricción</i>	262
7.5	DEFECTOS EN LOS PROCESOS DE LAMINADO	265

7.6	CONTROL DE PROCESO	266
7.7	GEOMETRÍA DE LAS SECCIONES DEL PERFIL LAMINADO.....	268
	<i>Cálculo del ensanchamiento</i>	269
7.8	TENDENCIAS A FUTURO	273

CAPÍTULO 8. EXTRUSIÓN

8.1	GENERALIDADES.....	275
8.2	PROCESO DE EXTRUSIÓN.....	277
	<i>Extrusión directa</i>	277
	<i>Extrusión indirecta</i>	278
8.3	PRENSA DE EXTRUSIÓN.....	280
	<i>Elementos fundamentales de la prensa de extrusión</i>	282
	<i>Aplicaciones del proceso</i>	283
8.4	CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES EN EL PROCESO DE EXTRUSIÓN	284
	<i>Características del flujo del material durante el proceso</i>	285
	<i>Defectos en productos extruidos</i>	286
8.5	EXTRUSIÓN DE TUBOS	288
8.6	ANÁLISIS DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN.....	291
	<i>Determinación de la pérdida de carga que se presenta al fluir el material a través del dado</i>	296
8.7	TENDENCIAS A FUTURO EN LA EXTRUSIÓN DE METALES	298

CAPÍTULO 9. TRABAJO EN FRÍO DE LOS METALES

9.1	GENERALIDADES.....	301
	<i>Características de los procesos de trabajo en frío</i>	302
	<i>Clasificación de los procesos efectuados en frío</i>	302
9.2	ESTIRADO DE ALAMBRE Y TUBO	303

	<i>Estirado de alambre</i>	303
	<i>Dado de estirado</i>	307
	<i>Defectos del material</i>	309
	<i>Análisis del proceso de estirado</i>	310
	<i>Estirado de tubo</i>	312
	<i>Análisis de las cargas que se presentan durante la operación de estirado</i> ..	315
	<i>Otros métodos de estirado</i>	318
9.3	FORMADO POR COMPRESIÓN	322
	<i>Operaciones de forja</i>	322
9.4	OPERACIONES DE FORMADO POR DOBLEZ	327
	<i>Formado por rodillos</i>	327
	<i>Operaciones de doblado</i>	333
9.5	OPERACIONES DE FORMADO MEDIANTE CORTE	337
9.6	OPERACIONES DE EMBUTIDO	347

CAPÍTULO 10. MÉTODOS DE UNIÓN Y ENSAMBLE

10.1	CONCEPTOS GENERALES	357
10.2	UNIONES MEDIANTE SOLDADURA	361
10.3	SOLDADURA POR RESISTENCIA ELÉCTRICA.....	362
	<i>Soldadura por puntos</i>	365
	<i>Soldadura de costura</i>	367
	<i>Soldadura de proyección o de salientes</i>	369
	<i>Soldadura por percusión</i>	370
	<i>Ventajas y limitaciones de las soldaduras por resistencia</i>	371
	<i>Principales ventajas</i>	371
10.4	SOLDADURA FALSA.....	372
	<i>Soldaduras fuertes o duras</i>	377
10.5	PROCESOS DE SOLDADURA POR FUSIÓN	378
	<i>Soldadura con gas</i>	378

10.6	MÉTODOS DE SOLDADURA MEDIANTE ARCO ELÉCTRICO	384
	<i>Soldadura de arco con electrodo revestido</i>	385
	<i>Soldadura de arco de tungsteno y gas inerte (TIG o GTAW)</i>	389
	<i>Soldadura de arco de metal y gas inerte (MIG)</i>	392
	<i>Soldadura con hidrógeno atómico</i>	395
	<i>Soldadura de arco sumergido</i>	398
	<i>Soldadura con perno</i>	401
10.7	TIPOS DE UNIONES SOLDADAS	402
10.8	UNIONES REMACHADAS	407
10.9	UNIONES MEDIANTE ADHESIVOS.....	410
10.10	UNIONES POR INTERFERENCIA.....	414
10.11	UNIONES DESMONTABLES.....	415
	<i>Elementos roscados</i>	415
	<i>Tipos de tornillos</i>	417
	<i>Tuercas</i>	420
	<i>Dispositivos de seguridad para los tornillos</i>	422
	<i>Llaves para tornillo y tuercas</i>	423
	<i>Calidad de los tornillos</i>	423
	<i>Uniones con pasadores</i>	424
	<i>Chavetas y cuñas</i>	425

CAPÍTULO 11. PROCESOS DE MANUFACTURA EN POLÍMEROS PLÁSTICOS Y ELASTÓMEROS

11.1	CONCEPTOS GENERALES.....	427
11.2	INYECCIÓN.....	430
11.3	EXTRUSIÓN.....	441
	<i>Tornillo extrusor</i>	448
	<i>Técnicas de extrusión</i>	448
	<i>Materiales por extruir</i>	449

11.4	MOLDEO POR COMPRESIÓN.....	449
	<i>Prensas para moldeo por compresión</i>	<i>450</i>
11.5	MOLDEO POR TRANSFERENCIA.....	451
11.6	EXTRUSIÓN-SOPLADO	453
11.7	INYECCIÓN-SOPLADO	455
11.8	ROTOMOLDEO.....	457
11.9	TERMOFORMADO	459
11.10	TENDENCIAS EN LA MANUFACTURA DE POLÍMEROS	461

CAPÍTULO 12. PROCESAMIENTO DE MATERIALES CERÁMICOS

12.1	CONCEPTOS GENERALES.....	463
12.2	MATERIALES CERÁMICOS	469
12.3	VIDRIOS.....	475
12.4	TENDENCIAS A FUTURO.....	484

BIBLIOGRAFÍA.....	485
--------------------------	------------

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN A LOS PROCESOS DE MANUFACTURA

1.1 GENERALIDADES

Desde épocas muy remotas, el hombre ha modificado el aspecto y características de diversos materiales que se encuentran en su hábitat. A través del tiempo aprendió a dominar las técnicas o métodos mediante los que ha podido transformar esos materiales en elementos útiles para su subsistencia. Este fenómeno ha dado origen a los *procesos de fabricación*.

En realidad, este concepto es muy amplio ya que incluye, por ejemplo, la producción de textiles, fármacos, metalmecánica, etc. De este modo, como *proceso de manufactura* se denomina todo método de transformación y acabado que se emplea para los materiales metálicos, cerámicos y polímeros. Lo anterior incluye cambios en la geometría del material, alteración de sus propiedades, operaciones de ensamble y también de acabado superficial.

El objetivo primario de todo proceso será producir un componente de la forma y dimensiones deseadas, con los acabados y propiedades requeridos, al menor costo y de forma sustentable.

Es indudable que la supervivencia, prosperidad y dominio de la raza humana sobre la tierra se debe en gran parte a que su inteligencia le hizo posible la manufactura de herramientas y objetos diversos. Ciertamente que el camino recorrido ha sido largo y el proceso lento (tabla 1.1). Se calcula que deben haber transcurrido miles de años de prueba y error para que el hombre pudiera tallar herramientas, tales como el hacha de mano en la que se pueden ya notar algunas de las características geométricas de nuestras modernas herramientas de corte.

TABLA 1.1 Desarrollo histórico de los procesos de manufactura

Año	Técnicas de fundición	Deformación	Unión	Maquinado	Procesamiento de cerámicos	Procesamiento de polímeros
4000 a. C.	Moldes de piedra y cerámica	Forja de Au, Ag, Cu		Uso de materiales abrasivos y piedra	Cerámica arcillosa	Madera y fibras naturales
2500 a. C.	Proceso a la cera perdida	Formado de hojas metálicas	Soldadura falsa (con latón)	Perforado	Torno de alfarero	
1000 a. C.		Forja de hierro	Soldadura por forja	Sierras de hierro	Fabricación del vidrio	
1 d. C.		Acuñado (bronces)		Torneado de madera	Soplado de vidrio	
1000 d. C.		Formado de alambre (estirado)			Fabricación de porcelana china	
1400	Moldeo en arena de piezas de fundición gris	Forja por martillo accionado por agua		Hoja de lija	Cristal de roca	
1600	Molde permanente	Laminación: producción de hojas metálicas de espesor uniforme		Torno para el barrenado de cañones		
1780-1840 aprox.	Primera Revolución industrial	Sustitución de la fuerza muscular por la fuerza mecánica	La producción pasa del taller del artesano a la fábrica	La producción agrícola e industrial se incrementan rápidamente, lo cual favorece el crecimiento de la población	Mayor producción demanda condiciones de transporte más rápido y económico, lo cual se traduce en el desarrollo de los ferrocarriles y el uso del motor a vapor en los barcos	Se genera una nueva división social y el nacimiento de nuevas clases sociales
1800		Embutido Extrusión (Pb), Laminado de acero		Corte de cuerdas (desde el siglo XVI se desarrollaron las primeras máquinas), torno vertical, fabricación intercambiable	Porcelana (Alemania)	

TABLA 1.1 Desarrollo histórico de los procesos de manufactura (Continuación)

Año	Técnicas de fundición	Deformación	Unión	Maquinado	Procesamiento de cerámicos	Procesamiento de polímeros
1850	Centrifugado	Martillo de vapor		Torno copiado	Vidrio para ventanas	Vulcanizado
1850-1914 Aprox.	Segunda Revolución Industrial	Se consolida el desarrollo de los ferrocarriles y del motor a vapor en los buques, esto trae aparejado un fuerte desarrollo de la siderurgia con la producción económica y en gran escala del acero. Se desarrolla el motor de combustión interna y el empleo de la energía eléctrica.	Se caracteriza esta época por la paz existente en Europa	Se generan severas diferencias sociales entre quienes son los dueños de los medios de producción y los asalariados (proletariado), lo cual se traduce en conflictos sociales y laborales, dada la explotación de la mano de obra.	La revolución industrial se extiende fuera de Europa y los EUA hacia Japón, Rusia y de manera incipiente a Latinoamérica.	Se sientan las bases tecnológicas para el siglo XX.
1875		Laminado continuo de rieles y perfiles		Fresadora universal	Extrusión, moldeo, celuloide y hule	
1900		Tubo sin costura	Soldadura de arco, soldadura por resistencia, oxiacetileno	Aceros rápidos, máquinas automáticas	Máquina automática para formado de botellas	
1914, 1945-1980, inicio del siglo XXI	El inicio de la Tercera Revolución Industrial se puede establecer entre el inicio de la Primera Guerra Mundial (1914) y el fin de la Segunda (1945). Algunos autores consideran que esta persiste en la actualidad.	Corresponde desde el desarrollo de las líneas de producción hasta el uso de la energía nuclear, el desarrollo de las telecomunicaciones, la microelectrónica y la informática. Esta se define como revolución de la inteligencia.	El liderazgo de esta corresponde con los EUA, la Unión Europea y el Japón, aunque al inicio del siglo XXI se tiene que incorporar a China.			
1920	Fundición a presión	Alambre de tungsteno	Electrodos revestidos			Baquelita

TABLA 1.1 Desarrollo histórico de los procesos de manufactura (Continuación)

Año	Técnicas de fundición	Deformación	Unión	Maquinado	Procesamiento de cerámicos	Procesamiento de polímeros
1940	Empleo de resinas para la aglomeración de la arena	Extrusión del acero	Arco sumergido			Nylon acrílico, hule, moldeo por transferencia
1950	Cáscara cerámica		Soldadura TIG, MIG y electro-escoria	Electroerosión control numérico		ABS, silicones, fluorocarbonatos poliuretano
1960			Arco plasma	Diamante industrial	Vidrio flotado	Acetatos, policarbonatos, poliuretano
1980	Colada evaporativa	Forja orbital	Láser	Recubrimientos cerámicos equipos CNC		Plásticos reforzados con fibras de carbono
1990	Sistemas de manufactura asistida por computadora					
2006	<p>Si bien la unión europea define los cambios suscitados a inicios del siglo XXI como parte de la Tercera Revolución Industrial o la revolución del conocimiento (The Third Industrial Revolution: How the Internet, Green Electricity, and 3-D Printing are Ushering in a Sustainable Era of Distributed Capitalism; Jeremy Rifkin). Sin embargo, algunos autores consideran que los cambios que se están presentando a inicios del siglo XXI corresponden con una Cuarta Revolución Industrial o también denominada como Industria 4.0, la cual representa la convergencia de tecnologías digitales, físicas y biológicas; el amplio uso de energías renovables, la manufactura aditiva, la robótica, la automatización total de la manufactura; todo lo cual anticipa un importante cambio en el mundo y una gran pérdida de plazas de trabajo en los países más industrializados (EUA, UE, Japón).</p> <p>En el Foro de Davos en 2016 se habló de conceptos que representan esta como Revolución 4.0; nanotecnologías, neurotecnologías, robots, inteligencia artificial, biotecnología, sistemas de almacenamiento de energía, drones e impresoras 3D. Esta podría acabar con cinco millones de puestos de trabajo en los 15 países más industrializados del mundo (Valeria Perasso, BBC Mundo, 12 octubre 2016).</p>					
2017	Nanotecnología, digitalización de modelos, manufactura personalizada, manufactura sustentable, celdas de producción					

En la era paleolítica, seres humanos que vivían de la caza y la recolección de alimentos poseían una gran diversidad de herramientas como hachas, cuchillos, sierras, desbastadores y rascadores de piedra, pequeños mazos, utensilios para perforar, agujas de marfil, arpones, entre otros. Ya en esta época se llegó a contar con herramientas para fabricar herramientas.

Después de muchos siglos inició la edad de los metales, que comprendió los años 6000 a 3000 a. C.

El oro, la plata y el cobre fueron los primeros metales trabajados por el hombre, ya que en dicho período histórico estos metales se podían encontrar en estado nativo en diversas regiones. En un inicio se les dio forma por simple martillado seguido de sucesivos calentamientos para eliminar la

acritud. Mediante dichos métodos se pudieron fabricar adornos y objetos muy diversos. Posteriormente, se observó que esos metales al ser calentados a altas temperaturas se fundían y podían ser colados en estado líquido en moldes de arcilla cocida produciendo, según se deseara, objetos de adorno, armas y herramientas.

La obtención de los metales a partir de sus respectivos minerales fue descubierta posteriormente, donde el cobre tiene la primicia debido a la relativa facilidad con que puede ser reducido. Lo más probable es que por accidente se encontrara que al fundir conjuntamente minerales de cobre y estaño o de cobre y arsénico se diera lugar a un metal que, por sus propiedades y posibles aplicaciones, resultaba de mayor interés, que los metales que se habían trabajado con antelación.

La Edad de Bronce comenzó hacia los años 3300 a 2800 a. C., extendiéndose hasta más allá del año 1000 a. C., alrededor del cual comienza la Edad de Hierro en Europa.

Las piezas de hierro más antiguas que se han descubierto y que ha sido posible estudiar datan de épocas anteriores al segundo milenio a. C. Los análisis han mostrado que dicho material es de origen meteorítico. Es difícil señalar con toda precisión la época y el lugar donde se fabricó por primera vez el hierro a partir de sus minerales, lo más probable es que también este procedimiento haya sido accidental; sin embargo, este descubrimiento se relaciona con los hititas quienes habitaron, entre los siglos XVII al XII a. C., una amplia región en la península de Anatolia (Este de Turquía) que comprende regiones de la actual Siria, Israel y Jordania; a estos países se atribuye la primera utilización del hierro, junto con la civilización Védica (asentado en la actual India).

Este conocimiento se trasladó a la Grecia antigua y a Egipto para, posteriormente, extenderse a través de varios siglos en el resto de Europa. Resulta por demás evidente que las herramientas producidas con este nuevo material presentaban mejores características que los ya conocidos, es entonces que se deben de haber tratado de reproducir las circunstancias a través de las cuales el hierro se había obtenido dando lugar a la Edad de Hierro. Las civilizaciones americanas nunca pasaron a través de dicha Edad, en virtud de que este conocimiento fue introducido por los europeos.

En Europa, los primeros objetos se obtuvieron por martilleo a partir de una masa semifundida en la que se mezclaba el hierro con la escoria; dicha deformación plástica permitía eliminar los componentes extraños, además de mejorar las propiedades mecánicas. Las diferentes piezas rescatadas por los arqueólogos indican que los productos de hierro tuvieron dos vías de difusión: marítima y continental. La continental tuvo su centro de difusión en Anatolia, Siria y

Chipre, y se extendió a través de los Balcanes y el Cáucaso, llegando hasta las Islas Británicas en el siglo VII a. C. Por su parte, la región mediterránea estuvo marcada por la colonización fenicia y griega. En Italia llega a Calabria en torno al siglo X a. C. y un poco más tarde a la península ibérica. La influencia etrusca pudo abrir una ruta por los Alpes con el norte, pero es dudosa por el escaso interés etrusco por el metal. En una primera etapa, y dada su escasez, los productos de hierro se orientan en la producción de adornos. Hasta que se desarrollan las técnicas de endurecimiento es que se encuentran las grandes ventajas de este material, siendo orientado entonces a la producción de armas.

Alrededor del 1200 a. C., el hierro era profusamente utilizado en Oriente Medio, pero aún no reemplazaba al uso dominante del bronce. Hacia el 1180 a. C., por razones aún desconocidas para los arqueólogos, el estaño escaseó, lo que llevó a una crisis en la producción del bronce. El cobre también parecía escasear. Varias civilizaciones del Mediterráneo empezaron a atacar las ciudades fortificadas con la intención de saquear el bronce para refundirlo y convertirlo en armas. Anatolia había sido durante mucho tiempo un gran productor de bronce, y su uso del hierro (desde el 2000 a. C. en adelante) permitió la existencia hacia el 1500 a. C. de una tecnología de armas superiores a las de bronce.

En África occidental, la producción de hierro comenzó casi en la misma época, y parece claro que fue una invención independiente y simultánea. Los lugares en los que existían minerales de hierro desarrollaron una preeminencia en el último milenio a. C., que mantendrían en el futuro. La tecnología militar diseñada para aprovechar el uso del hierro se originó en Asiria, quien de hecho parece que consideraba a la ciudad de Troya como un puesto comercial (una cabeza de maza encontrada en 1902 en las ruinas de Troya, fechada en el 1200 a. C., es probablemente de producción asiria). En cualquier caso, el comercio de hierro entre Asiria y la ciudad independiente de Troya estaba ya bien establecido en esas fechas, y el secreto de su producción era celosamente guardado por los asirios.

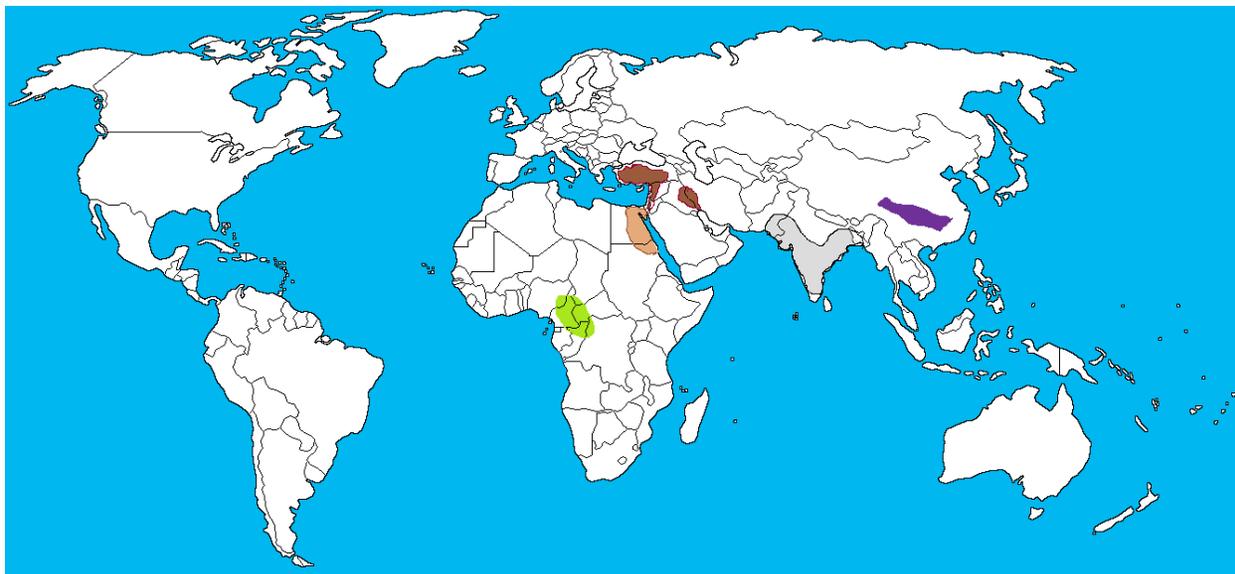


FIGURA 1.1 Distribución del conocimiento de la metalurgia del hierro en el siglo IX a. C.

La metalurgia del hierro se desarrolló de manera independiente en la zona de Anatolia, Mesopotamia, Egipto y, posteriormente, el norte de África, el subcontinente indio y el valle del Yang Tze en China. En el África subsahariana, la cultura de Nok hacia el siglo IV a. C. presenta ya un desarrollo independiente en las técnicas de fundición y fabricación del hierro. En el caso de Europa existe unanimidad en cuanto a que la tecnología pasó del Asia Menor a esta.

En la figura 1.1 se observa la distribución en el conocimiento de la metalurgia del hierro hacia el siglo IX a. C., extendiendo su empleo a través del comercio y de forma mucho más lenta su tecnología, de tal forma que la Grecia de Homero en el siglo VIII a. C. se encontraba en la transición de la Edad de Bronce a la de Hierro. Es conveniente también notar que el desarrollo de esta tecnología se dio en épocas prehistóricas, ya que en muchos de los pueblos no se disponía de un sistema de escritura desarrollado, lo cual limita en mucho las investigaciones en esta área. En lugares como las islas británicas este conocimiento llegó con los romanos, mientras que en la zona no romana su conocimiento hubo de esperar hasta el siglo V de nuestra era. En la Germania, las técnicas se difundieron igualmente por las conquistas y el contacto con el imperio romano, mientras que en Escandinavia y otras zonas alejadas de la influencia romana, su desarrollo se dio aproximadamente al inicio de nuestra era.

Se considera actualmente que la Edad de Hierro en el Antiguo Oriente Medio comenzó con el descubrimiento de las técnicas de fundición y forja del hierro en la región de Anatolia a finales del siglo XIII a. C. De ahí se extendió con rapidez a lo largo de Oriente Medio a medida que las

armas de hierro sustituían a las de bronce a principios del primer milenio a. C. El uso de armas de hierro por parte de los hititas fue uno de los factores más importantes en el auge de su imperio.

La tecnología del hierro se propagó al mismo tiempo por Asia y por Europa, ya que se desarrolló por primera vez cerca del Egeo. Se suele asociar a los Pueblos del Mar y a los Filisteos con la introducción de la tecnología del hierro en Asia, así como a los Dorios por hacer lo mismo en la Grecia Antigua.

En el periodo que va del siglo XI a. C. al siglo VIII a. C., la región más rica en restos arqueológicos de hierro es la de Siria y Palestina. El bronce era mucho más abundante entre los siglos XII y X a. C., y autores como Snodgrass [1971] sugieren que, debido a una escasez de estaño como resultado de cortes en el comercio en el Mediterráneo, las civilizaciones de la época tuvieron que buscar una alternativa al bronce. Esto parece confirmado por el hecho de que, durante un tiempo, los objetos de bronce fueron reciclados de forma extensiva, refundiendo todo tipo de objetos para producir nuevas armas, justo antes de la introducción del hierro.

También vale la pena resaltar que las primeras instancias del Imperio Asirio tenían contactos comerciales con el área en la que se estaba desarrollando la nueva tecnología del hierro.

Excavaciones arqueológicas en la India, en el actual Uttar Pradesh (zona limítrofe de la India con Nepal), aportan objetos de hierro datados entre los siglos XVII y el XII a. C. Con base en esto, se considera que ya en el siglo XVIII a. C. se desarrolló extensivamente la metalurgia del hierro en la península Indú, lo que sugiere que la tecnología era conocida desde mucho antes [V. Tripathi, 2008]. A principios del primer milenio a. C., la India vivió grandes avances en la metalurgia del hierro. En la India Oriental se han descubierto los restos de un gran centro de trabajo del hierro de esa época.

En la India se producía hierro de gran calidad (equivalente a nuestros modernos aceros de alto carbono) en fecha tan temprana como el siglo III, aunque se sospecha que el conocimiento de esa tecnología ya existía hacia el siglo IV a. C., para esto se empleaba el sistema conocido posteriormente en Europa como acero al crisol. Mediante este sistema, se mezclaba dentro de un crisol hierro de gran pureza, carbón y sílice, y se ponía a calentar hasta que el hierro se fundía y absorbía el carbono.

En China se han encontrado reliquias hechas de hierro fechadas en épocas correspondientes a la Dinastía Zhou [S.M. Young, *The Earliest Use of Iron in China*], en el siglo VI a. C. En 1972, en una excavación cerca de la ciudad de Gaocheng en Shijiazhuang, se localizó un tomahawk de bronce con filo de hierro fechado en el siglo XIV a. C., material que se determinó tenía un origen meteorítico.



FIGURA 1.2 Casco de hierro de la Confederación Gaya, siglo V [Fuente: Wikipedia, autor pressapochista, publicado bajo CC BY SA 2.0]

Como ya ha sido comentado, la metalurgia del hierro fue introducida en Europa probablemente desde Asia Menor hacia el siglo XI a. C., y se expandió hacia el norte y el oeste durante los siguientes 500 años. Se considera comúnmente que la Edad de Hierro en Europa finaliza con la conquista romana. Por otra parte, en Europa oriental la Edad de Hierro da inicio a principios del primer milenio a. C. Junto con las culturas de Chernogorovka y Novocherkassk, en el territorio de las actuales Rusia y Ucrania, se asocia casi mayoritariamente la Edad de Hierro con los escitios, que la desarrollaron desde el siglo VII a. C. La mayoría de restos de su producción de hierro e industrias metalúrgicas entre los siglos V y III a. C. se encontró cerca de Nikopol en Kamenskoe Gorodishche, en lo que se considera la región metalúrgica por excelencia de la antigua Escitia.

En Europa central, la Edad de Hierro se divide generalmente en *Edad de Hierro Temprana* (como la de la Cultura de Hallstatt), entre el 800 a. C. y el 450 a. C., y la *Edad de Hierro Tardía* (como la de la Cultura de La Tène), que empezó hacia el 450 a. C.

Si bien algunos autores han considerado que en la península italiana la tecnología del hierro comenzó con la civilización de los etruscos, en la actualidad se acepta que esta comenzó con la cultura Villanova, la cual se desarrolló en la zona norte de la península, en la actual Bolonia, para de ahí pasar a la civilización Etrusca (la cual se desarrolló en la Toscana y el norte de la actual Italia) la cual acabó abruptamente con la conquista de su última ciudad, Volsinii, por parte de la naciente República Romana en el año 265 a. C.

En Europa del Norte se fecha una Edad de Hierro Pre-Romana y una Edad de Hierro Romana. Las primeras producciones de hierro escandinavas se hacían mediante la recolección manual de mineral de hierro. La península escandinava, Finlandia y Estonia conservan restos arqueológicos correspondientes a una temprana producción de hierro a pequeña escala, aunque resulta imposible datarla con seguridad.

Por su parte, en África la cultura Nok fue la primera sociedad que refinaba hierro mediante fundición en África Occidental antes del año 1000 a. C. Luego, el uso del hierro y el bronce se extendieron hacia el sur por el continente, alcanzando el extremo sur hacia el 200. El uso del hierro revolucionó las comunidades granjeras bantúes que lo adoptaron, expulsando a las sociedades de cazadores-recolectores, propias de la Edad de Piedra, que fueron encontrando en su expansión para cultivar extensiones mayores de sabana. Los bantúes, tecnológicamente superiores, se expandieron por todo el sur de África y se convirtieron en el pueblo autóctono más rico y poderoso, produciendo hierro en cantidades industriales para su uso en armas y herramientas.

1.2 HISTORIA DE LA MANUFACTURA

La manufactura (del latín *manus* –mano-; *factus* –hacer-) tuvo su primer gran auge, y surge como una técnica en sí, con el florecimiento de la civilización romana, fundamentalmente por la producción en masa y la división del trabajo, tanto en la producción de textiles, cerámica y vidrio, como en minería y metalurgia.

Con la caída del Imperio Romano, esta organización se pierde al igual que muchas de las técnicas de producción. El trabajo se organiza alrededor de la familia y los métodos son transmitidos del artesano a sus aprendices.

Durante la Edad Media, el desarrollo de nuevas técnicas de producción fue casi nulo y no fue sino hasta el Renacimiento cuando volvieron a reactivarse, fortaleciéndose de manera decidida con la primera Revolución Industrial a fines del siglo XVIII.

Se considera que el concepto moderno de la manufactura surge alrededor de 1780 con la Revolución Industrial británica, expandiéndose a partir de entonces a toda la Europa Continental, luego a América del Norte y, finalmente, al resto del mundo.

La manufactura se ha convertido en una porción inmensa de la economía del mundo moderno. Según algunos economistas, la fabricación es un sector que produce riqueza en una economía, mientras que el sector servicios representa el consumo de la riqueza

Durante los siglos XIX y XX, el diseño de nuevos métodos y procesos fue incesante, lo que se ha traducido en un notable aumento de la productividad y, por tanto, del nivel de vida de la población. Dentro de este período destaca el concepto de manufactura intercambiable, desarrollado por Eli Whitney [1765-1825] a principios del siglo XIX; el ensamble en línea puesto en práctica por H. Ford [1863-1947] al inicio del siglo XX y la introducción de la informática en la manufactura a través de los sistemas CAD/CAM, los cuales a la fecha han madurado generando una nueva revolución en las manufacturas. En la actualidad, los esfuerzos se orientan, más que a la producción en serie de un bien, a la producción personalizada; esto es más que adecuarse a lo que existe en el mercado. La idea es que se pueda obtener un producto adecuado a las necesidades de cada cliente, esto desde luego en forma ágil y competitiva. Por otra parte, en los últimos años se ha dado particular importancia a las tres R (recicla, recupera, reúsa), a la eliminación de subproductos contaminantes, a la minimización en el consumo de energía y de recursos (renovables y no renovables), a la reducción de generación de gases invernadero y, en consecuencia, a la búsqueda de la producción en armonía con la naturaleza o manufactura sustentable.

Relación entre proceso, material y diseño

Existe una marcada y a la vez compleja interrelación entre el diseño, la manufactura y los materiales que se van a utilizar (figura 1.3). Esto es debido a que el diseñador debe cumplir con una serie de condiciones, tales como funcionalidad, resistencia y bajo peso, considerando también que el artículo deberá obtenerse al menor costo posible. Además, se requiere que sea fabricado en la cantidad y con las características de acabado y precisión que el producto amerite.

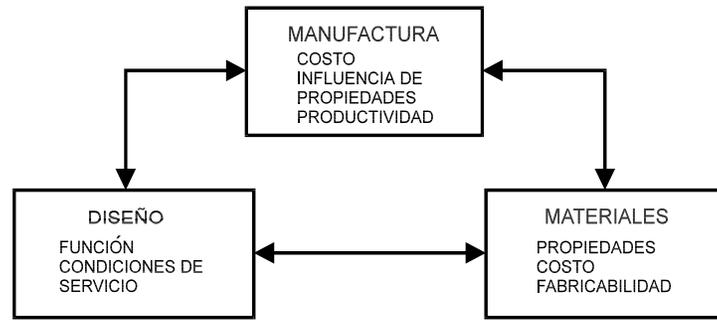


FIGURA 1.3 Relación entre la manufactura, el diseño y los materiales

Cualquier cambio en el material o en el diseño involucra un nuevo estudio sobre los métodos de producción más idóneos. La mayoría de las piezas que se fabrican se pueden producir a través de varios procedimientos, pero se selecciona aquel que mejor cumpla con la exactitud dimensional, con las propiedades físicas, la capacidad de producción y con la productividad demandada, siempre al más bajo costo.

Seleccionar el proceso más idóneo no es una tarea sencilla y sólo se efectuará una vez que las posibles alternativas sean analizadas a fondo, ya que deberá ser considerado no únicamente el costo en sí de fabricación, sino también el factor de utilización del material; el efecto que el método de procesamiento tiene en las propiedades del producto y, por tanto, su capacidad ya en servicio; la demanda de mano de obra con el entrenamiento que esta requiera; la energía necesaria para la transformación; la contaminación por el proceso o por el producto y reciclado del producto, entre otras, cuadro 1.1.

<ul style="list-style-type: none"> • Material • Número de piezas • Espesores • Tamaño de las piezas • Disponibilidad del equipo • Forma de las piezas 	<ul style="list-style-type: none"> • Acabado • Tolerancias • Plazo de entrega • Herramental necesario • Consumo de energía • Producción de efluentes
---	--

CUADRO 1.1 Factores que influyen en la selección de un proceso de fabricación

Para obtener la máxima economía, es necesario que la selección del material empleado en la producción de un objeto se haga basada en factores de procesamiento y requerimientos de

TABLA 1.2 Métodos de manufactura según el material de la pieza que se fabrique

Forma	Aleaciones								1	2	3	4	5
	Al	Cu	Pb	Mg	Ni	Sn	Ti	Zn					
Moldeo en arena	Δ	Δ	*	Δ	Δ	*		*	Δ	Δ	Δ		
Moldeo	Δ	Δ			*				Δ	*	*		
Colada sin cavidad	*	*	*						Δ	Δ	*		
Colada en molde permanente	Δ	*	*	Δ	*	*		*	Δ	*			
Colada en matriz	Δ	*	Δ	Δ		*		Δ					
Moldeo en yeso	Δ	Δ											
Colada en molde cerámico	*	*		*	Δ			*	Δ	Δ	Δ		
Moldeo en revestimiento	Δ	Δ		*	Δ					Δ	*	*	
Centrifugado	*	*			*				Δ	Δ	Δ		
Celda continua	Δ	Δ	*							*			
Forja abierta	*	*		*	*		*		*	Δ	Δ		*
Forja en estampa	*	*		*	*		*			Δ	Δ		*
Recalcado	*	*		*	*		*			Δ	Δ		*
Cabeceado en frío	Δ	Δ	*		*					Δ	*	*	
Estampado	Δ	Δ		*	Δ		*	*		Δ	*	*	*
Pulvimetalurgia	*	Δ			*				Δ	Δ	*	*	Δ
Electroerosión	*	Δ	*		Δ	*		*	*			*	
Fotograbado	Δ	Δ	*	Δ	Δ	*	Δ	*		Δ	*	Δ	*

Δ Uso común
* Uso opcional

1 Fundiciones
2 Aceros al bajo carbono
3 Aleaciones resistentes al calor y a la corrosión

4 Metales preciosos
5 Metales refractarios

1.3 CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE FABRICACIÓN

Agrupar los procesos de manufactura no es una tarea fácil debido a la gran variedad de métodos existentes, así como también por los diversos puntos de vista que se pueden considerar para tal fin.

Tomando como base las modificaciones geométricas o físicas, los procesos de manufactura se pueden agrupar en:

Procesos de fundición o colada. El cambio de forma se produce mediante la fusión del material y su solidificación en un molde de la forma requerida. Involucra fundamentalmente a los metales, aunque existen algunos que son factibles de aplicar para el vidrio y los polímeros.

Procesos de conformado mecánico de metales (métodos de deformación plástica). Un material, usualmente metal, es deformado plásticamente, esto se puede realizar en caliente (no hay endurecimiento) o en frío. Por ejemplo: laminación, troquelado, forja, embutido, extrusión, etc.

Procesos con arranque de viruta. En este caso, más que un cambio de forma se trata de una generación de la geometría requerida mediante la eliminación de material de un bloque de partida, empleando una herramienta cortante, la cual, a través de la interferencia generada con la pieza, producirá el arranque de material. Estos procesos pueden ser denominados con base en el equipo utilizado o también por las herramientas de corte. Entre otros se pueden mencionar al torneado, fresado, esmerilado, rectificado, etc.

Procesos para el conformado de polímeros. Las características especiales de plásticos y hules han llevado al desarrollo de métodos de fabricación particular, tales como el termoformado, inyección, soplado, moldeo por transferencia, extrusión, calandreado, etc., los cuales aun cuando pueden tener denominaciones similares a las utilizadas para los metales, se realizan de maneras muy diferentes.

Procesamiento a partir de polvos. Estos métodos se han desarrollado rápidamente e incluyen la formación de elementos útiles a partir de partículas de materiales cerámicos, poliméricos y metales. Consisten en la aglomeración de polvos por compactado y compresión. En esta categoría se puede incluir el procesamiento de los materiales compuestos.

Procesos para acabado de superficies. Entre otros se pueden considerar a los recubrimientos electrolíticos, las pinturas, los metalizados por inmersión, los recubrimientos por difusión y los de conversión.

Procesos de unión. Incluyen los métodos de unión y los de ensamble, soldadura, adhesivos, remaches y juntas atornilladas, entre otros.

Procesos para la modificación de propiedades de los materiales. Comprenden los tratamientos térmicos, termoquímicos, como son el temple, recocido, nitrurado, carburizado, entre otros.

Procesos de manufactura de vidrios y cerámicos. Los procesos utilizados para estos materiales son muy diversos, ya que en muchos casos la primera etapa corresponde con la producción y mezclado de los polvos cerámicos para posteriormente proceder a su moldeo, secado y cocción.

Procesos de manufactura para materiales compuestos. Existen muy diversos métodos como son moldeo, inyección, pultrusión, moldeo por transferencia, entre otros.

Procesos de alta energía. Por ejemplo, métodos de formado a partir del depósito de vapor o plasma.

Manufactura aditiva

Este tipo de manufactura corresponde con una serie de técnicas que dependen del tipo de material en el que se produce el elemento. Por sus características se refiere también como manufactura en capas, impresión 3D, o simplemente manufactura aditiva (MA). En términos generales, corresponde con la transformación de un dibujo en archivo digital, a un elemento sólido en polímero, cerámico, metal o biomaterial. Situación que permite lo mismo la generación de modelos, prototipos funcionales, prótesis y la rápida transformación de una idea en un elemento físico. Las grandes posibilidades de estas técnicas y la sensible reducción en el costo de los equipos de impresión y de las materias primas permiten que la MA sea considerada en sí como un nuevo tipo de método de transformación de los materiales.

En las figuras 1.5 y 1.6 se muestran el interior de una moderna planta de manufactura [Ferrari, Maranelo, Italia]. Es por demás evidente la nueva filosofía en la integración de los procesos de manufactura, donde al lado de la automatización, limpieza, orden y control se rompe con el paradigma de las antiguas plantas de proceso, y el resultado es una muestra de la dirección que ha tomado el diseño e integración de las nuevas plantas de ensamble y fabricación.



FIGURA 1.5 Moderna planta de manufactura [Ferrari, Maranelo, Italia]



FIGURA 1.6 Interior de una moderna planta de manufactura [Ferrari, Maranelo, Italia]

CAPÍTULO 2

OBTENCIÓN DEL HIERRO Y PROCESOS DE ACERACIÓN

2.1 GENERALIDADES

Desde hace más de dos mil años a la fecha, el hierro ha sido el metal más utilizado por el hombre. En la actualidad, los aceros significan, con mucho, la familia de materiales más importante a pesar del amplio desarrollo de materiales tales como polímeros, cerámicos y compuestos. Resulta entonces conveniente conocer los procesos de fabricación de esta fundamental familia de aleaciones.

El primer período de la siderurgia se remonta 1400 años a. C.; se caracterizó porque la fabricación del hierro se hacía en una sola etapa, aunque prácticamente este proceso fue abandonado en el siglo XIX, todavía en la actualidad es practicado por pueblos primitivos que viven en lugares remotos de África. La fabricación se hacía por reducción directa del mineral; se obtenían pequeñas partículas metálicas de aspecto esponjoso, luego las partículas se reunían y se les daba forma por martillado en caliente.

El segundo período de la siderurgia se inicia a mediados del siglo XIV; se caracteriza por la obtención del hierro en dos fases: la fundición se obtenía en estado líquido en un horno alto, y partiendo de la fundición líquida y oxidándola, se obtenía el hierro en hornos bajos o de pudelar en un estado pastoso.

Desde mediados del siglo XIX hasta nuestros días se han realizado grandes innovaciones y modificaciones a los procesos y equipos empleados, entre los que se pueden mencionar la colada continua, los convertidores de sople de oxígeno, los procesos de reducción directa, entre otros. Los métodos más utilizados en la actualidad para la fabricación de acero se muestran en la figura 2.1.

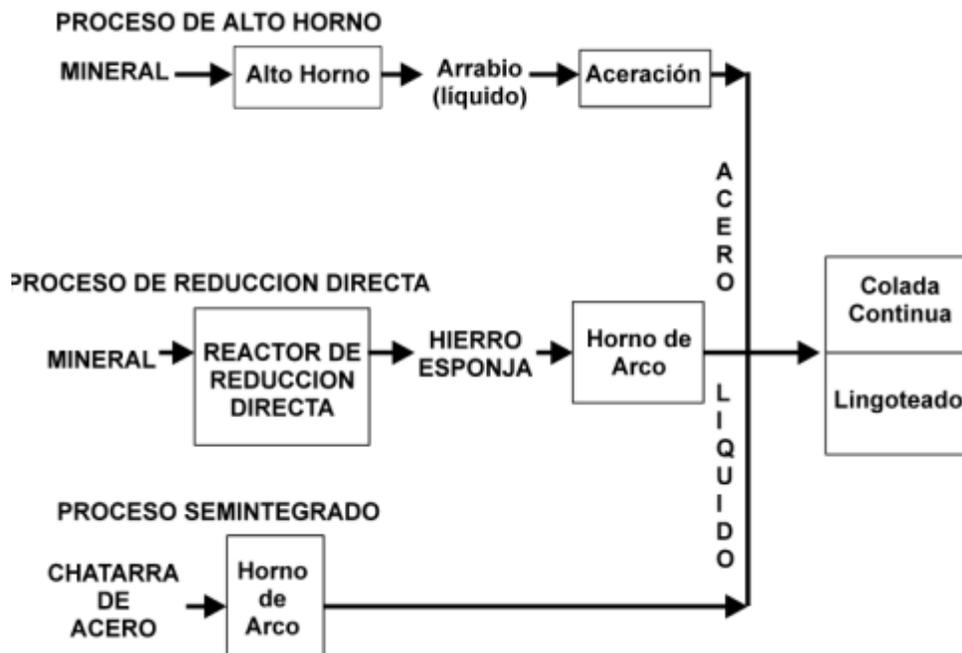


FIGURA 2.1 Diagrama de obtención del hierro y proceso de aceración

Gran parte de los siglos XIX y XX se pueden definir como la Edad del Acero, aunque es claro que los aceros y fundiciones siguen siendo fundamentales en nuestra vida diaria, (el pico de producción de acero crudo se tiene en 2014 con 1670 millones de toneladas de acero crudo, *World Steel Association*), este inicio del siglo XXI se puede definir también por otras familias de materiales, sin embargo, nadie pone en duda la importancia que los aceros tienen hoy en día.

La globalización en conjunto con la manufactura sustentable, y todos los paradigmas que han tomado carta de identidad al iniciar este siglo XXI y desde fines de la centuria anterior produjeron un fuerte cambio en los paradigmas de la producción de acero promoviendo entre otros aspectos: Sensibles incrementos en la productividad por empleado (disminución de 1.5×10^6 plazas en el periodo 1975-2000) [International Iron and Steel report 2006]; disminución del peso de las carrocerías producidas en acero [AHSS Advanced High Strength Steel], las cuales están prácticamente en el nivel de las fabricadas en aluminio [Steel Eliminates Weight Gap with Aluminium for Car Bodies, World Auto Steel, abril 2013]; desarrollo de políticas de sustentabilidad en la producción mundial de acero [World Steel Association Report, 2012], esto a través de la disminución de gases de invernadero, reducción en el consumo de energía durante la producción y uso del acero, entre otros muchos ejemplos más.

La producción se ha trasladado de EUA y la Unión Europea a países como China y la India, así como a otras naciones emergentes (la producción de China en 2003 fue de 220 millones de toneladas mientras que para 2012 alcanzó las 708.754 millones de toneladas, y para 2015 803.83 millones (en 2014 logró la cifra record de 822.7), con lo que la producción en Asia llegó a 982.71 millones de toneladas.

Las crisis de la década de los ochenta y noventa dieron como resultado que muchas empresas nacionales cerraran o fueran absorbidas por conglomerados transnacionales, lo que se ha traducido en la formación de nuevos conglomerados transnacionales que lo mismo cuentan con plantas en Europa, América y Asia, tal como Arcelor Mital (97.2 millones de toneladas para 2011), Hebei Group (44.4), Baosteel group (43.3), Posco (39.1), Wuhan Group (37.6); por solo mencionar a las cinco compañías líderes a nivel mundial [World Steel Association].

Para 2010, la producción mundial creció 15% con relación al 2009, logrando 1414 millones de toneladas métricas [World Steel Association], del total de la producción mundial. Por ejemplo, China representa el 48% de la producción. En 2015 se alcanzaron casi los 1600 millones de toneladas métricas de acero crudo.

2.2 PRODUCCIÓN DEL ACERO

Como ya fue mencionado, la producción de acero se puede realizar en plantas integradas (figura 2.2), esto es, producir el hierro y acero a partir de mineral, o en plantas semi-integradas, a partir de chatarra de acero. Por consecuencia, las principales materias primas para la industria siderúrgica son mineral de hierro, carbones minerales y chatarra.

Antes de la edad del hierro, la producción de herramientas de este metal se realizó a partir de meteoritos, conservándose estos métodos, en muchos lugares aislados, hasta bien entrado el siglo XIX. El hierro meteorítico (figura 2.3) es una aleación normalmente FeNi, y ha sido utilizado en México en algunas zonas del actual estado de Michoacán. En la actualidad, todo el hierro se obtiene a partir de la explotación de yacimientos de *mineral de hierro*. Por su densidad, la proporción de hierro que existe en el núcleo central terrestre es mayor que en la corteza. En general, los minerales de hierro están distribuidos de manera homogénea en la corteza terrestre y casi todos los países cuentan con yacimientos de importancia. Asimismo, se encuentra en la

mayoría de las rocas, sin embargo, cuatro minerales son explotados industrialmente: tres óxidos (magnetita, hematitas rojas y hematitas pardas) y un carbonato (siderita).

Producción de acero líquido a través de procesos integrado (alto horno) o semiintegrado (fusión de chatarra)

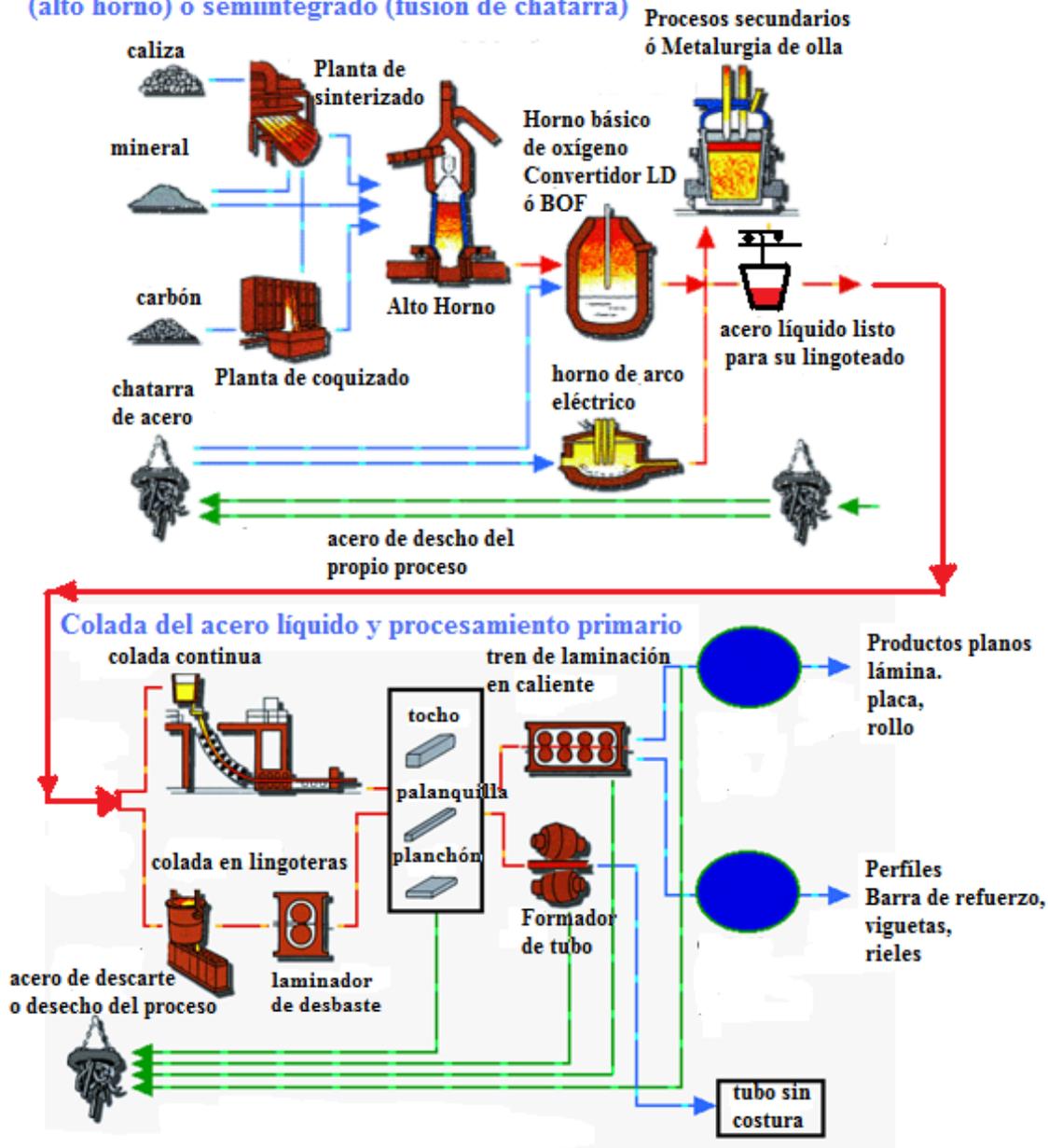


FIGURA 2.2 En la parte superior de la figura se observa el diagrama de producción de acero líquido, mientras que la inferior se presentan los procesos primarios de transformación de dicho acero, hasta llegar a la producción de placas tubos y barras entre otros [UK Steel].



FIGURA 2.3 Meteorita encontrada en México y expuesta en el vestíbulo del Palacio de Minería, Facultad de Ingeniería de la UNAM; de composición metálica, básicamente FeNi

En la tabla 2.1 se muestran las características de los minerales de hierro. Las piritas (sulfuros) no son utilizadas por el alto contenido de azufre que le transfiere al acero, mientras que los silicatos aun cuando son muy abundantes, no son apropiados debido al alto costo de su proceso de refinación.

No todos los yacimientos de minerales de hierro pueden ser explotados de manera rentable, esto depende de su situación geográfica, riqueza y tipo, reservas, compuestos con los que está asociado, porosidad y tamaño de la partícula, entre los factores más importantes. La demanda mundial ha dado como resultado que yacimientos que hasta más allá de la mitad del siglo XX se consideraban poco atractivos para ser explotados por los costos que esto refería, son empleados a inicios del siglo XXI. La producción de minerales de hierro y su distribución se presentan en la tabla 2.2.

Factores como los antes mencionados (tipo, riqueza, ubicación, etc.) influyen en el costo de explotación y, por ende, del producto, así como en su calidad.

TABLA 2.1 Minerales de hierro más comúnmente explotados

Mineral	Formula química	Riqueza teórica %	Peso específico	Color más frecuente
Magnetita	Fe ₃ O ₄	72.3	5.0	negro-gris
Hematitas Rojas	Fe ₂ O ₃	70.0	4.9	rojo
Hematitas Pardas	NFe ₂ O ₃ MH ₂ O	60.0	4.5	amarillo-rojizo
Carbonato (siderita)	FeCO ₃	48.3	3.7	pardo

TABLA 2.2 Producción de minerales de hierro y reservas U.S. [*Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2016*]

País	Producción 2014 [Millones de toneladas]	Producción 2015	Reservas de mineral probadas	Reservas de hierro
EUA	56	43	11,500	3,500
Australia	774	824	54,000	24,000
Brasil	411	428	23,000	12,000
Canadá	44	39	6,300	2,300
China	1,510	1,380	23,000	7,200
India	129	129	8,100	5,200
Irán	33	33	2,700	1,500
Kazakhstan	25	25	2,500	900
Rusia	102	112	25,000	14,000
Sudáfrica	81	80	1,000	650
Suecia	37	37	3,500	2,200
Ucrania	68	68	6,500	2,300
Otros países	153	125	18,000	9,500
Total mundial	3,420	3,320	190,000	85,000

El mineral que es cargado al horno o al reactor de reducción directa está compuesto por una mezcla de los óxidos o carbonatos de hierro, así como de material estéril o ganga, el cual está constituido por una combinación de óxidos, silicatos y carbonatos no ferrosos, tales como la cal, alúmina, magnesia y sílice.

Carbones minerales. Hasta principios del siglo XVIII, el combustible empleado en la siderurgia fue el carbón vegetal. Sin embargo, su consumo desmedido hizo necesaria la emisión de edictos que evitaran la deforestación causada y, que a la vez, provocaron limitantes a la producción. Esta fue superada cuando, alrededor de 1730, Abraham Darvy comenzó a utilizar coque, obtenido por destilación del carbón mineral.

Dado que los carbones empleados para coquizar son caros y escasos se ha tratado siempre de reducir su consumo; a inicios de este siglo XXI su costo representa del 50 al 70% del total del proceso.

Chatarra. El abastecimiento de chatarra, insumo primordial de las empresas semi-integradas, es variable en su precio y es inestable en su producción, calidad y posibilidades de suministro. En países como México son, en general, de baja calidad y su oferta es mucho menor que la demanda, lo que hace necesaria la importación fundamentalmente de los Estados Unidos. Los problemas anteriormente mencionados han provocado que algunas empresas se orientaran desde hace más de medio siglo por la instalación de equipos de reducción directa convirtiéndose en integradas. Asimismo, es necesario considerar el efecto de China en el mercado, ya que la voracidad por las materias primas de este gigante manufacturero causa un mayor desabasto en las materias primas.

2.3 PREPARACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS

Los minerales de hierro antes de ser cargados en el horno deben sufrir diversas operaciones de preparación (véase la figura 2.4), cuya finalidad es aumentar la concentración del mineral, así como su porosidad, todo lo cual redundará en una mayor productividad del horno y en un menor consumo de coque.

La tendencia general al llevar a cabo las operaciones de preparación ha sido que mientras la riqueza de los minerales disminuye con el tiempo, la concentración al introducirlos en el horno aumenta.

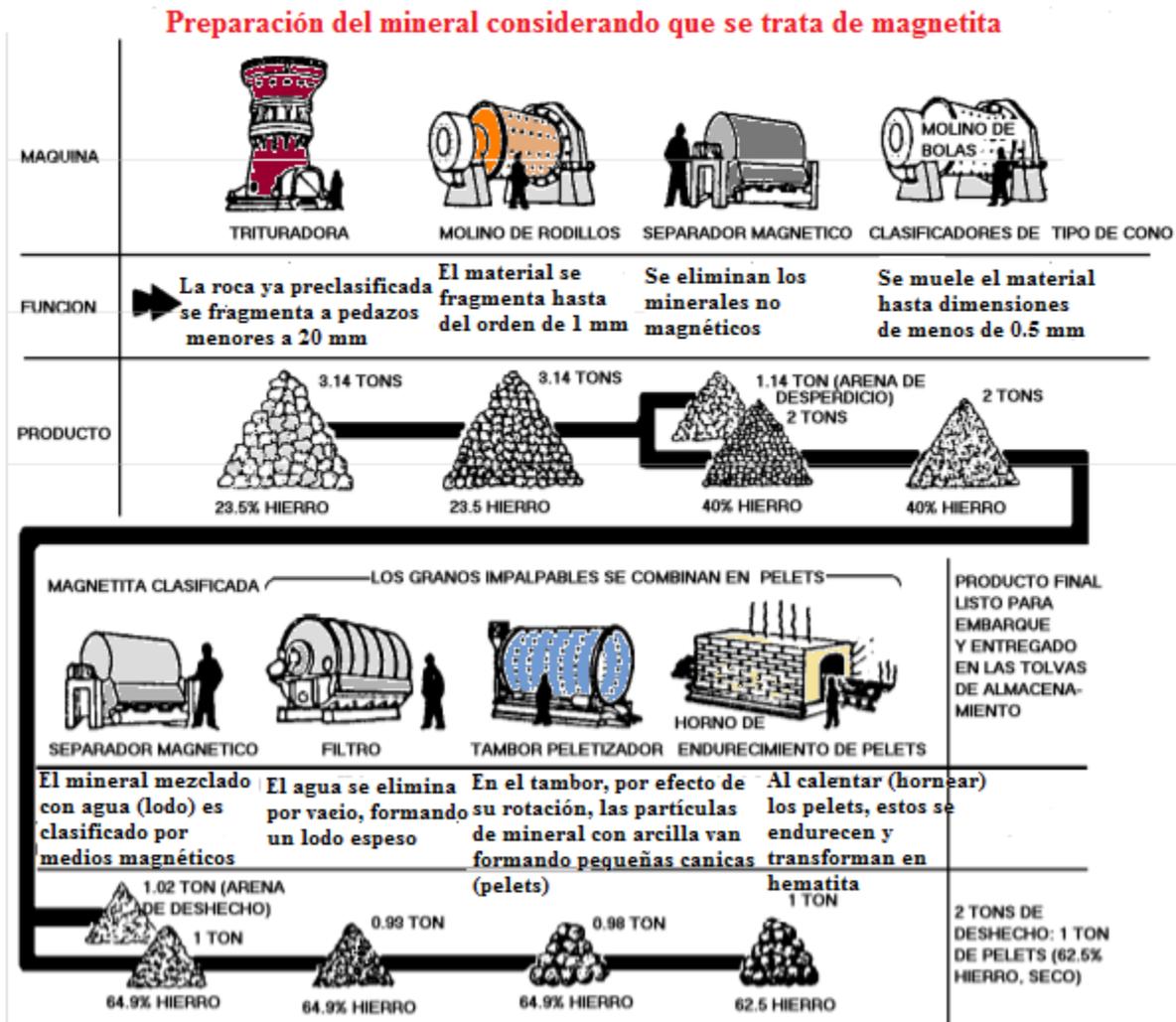


FIGURA 2.4 Diagrama de preparación del mineral

Aglomeración. Una vez que el mineral ha sido concentrado adecuadamente (riqueza mayor al 60%) se procede a su aglomeración, con la finalidad de producir trozos con las características físicas que faciliten su reducción (dimensiones convenientes y gran porosidad). Lo anterior redundaría en mayor productividad, además de que permite el aprovechamiento de las partículas pequeñas (menores de 10 mm), tales como polvos de tragante, cascarilla de laminación y polvos de trituración.

Pelletizado. Es el proceso más utilizado actualmente y consta de dos etapas: formación del pellet verde; para esto se emplean tambores, platillos o conos. Al término de la etapa se tiene una partícula semiesférica de 10 a 20 mm de diámetro y de reducida resistencia a la compresión. La segunda etapa consiste en el endurecimiento del pellet, el cual es sometido a un proceso de cocimiento en hornos especiales. Como aglomerante se emplea bentonita en aproximadamente un 1%.



FIGURA 2.5 Banda de pelletizado verde

Carbones minerales. Existen varias formas de clasificarlos. Una de las más simples establece los siguientes grupos (tabla 2.3):

TABLA 2.3 Tipos de carbones minerales

Denominación	Aplicaciones	Volátiles %	KCal/Kg	Composición		
				C	O	H
Lignito	Horno de reverbero y fabricación de gas pobre	45	7.750	77	15	5.7
Hulla seca de llama larga	Para calderas. No coquizable	40	8.200	79	12	5.6
Hulla semigrasa de llama larga	Producción de gas de ciudad. Poco coquizable	35	8.550	82	8	5.4
Hulla grasa	Coque corriente para fraguas. Coquizable	30	8.700	85	6.5	5.2
Hulla semigrasa de llama corta	Coque metalúrgico. Coquizable.	25	8.750	88	5	5.0
Hulla seca de llama corta	Producción de vapor. Poco coquizable.	15	8.650	91	3	4.5
Antracita	Centrales térmicas. Calderas de calefacción	8	8.600	95	2.5	3.7

Las características más notables del coque (figura 2.6) son: gran resistencia a la compresión (mayor a 10 MPa), elevado índice de superficie a peso (porosidad) que facilita notoriamente las reacciones, gran resistencia a la abrasión y al desgaste, y combustión sin llamas ni humos.



FIGURA 2.6 El coque es un material poroso de alta resistencia a la compresión. El cual debe contener un mínimo de azufre

Su composición aproximada está dada en la tabla 2.4, mientras que sus cenizas (compuestos no combustibles) se presentan en la tabla 2.5.

TABLA 2.4 Composición del coque siderúrgico

Carbono fijo	85 a 90%
Volátiles	2%
Cenizas	8%
Azufre	1%
Poder calorífico	7125 kcal/kg

Es muy importante que el porcentaje de azufre sea menor del 1% y que el de las cenizas sea menor del 9%; estas deben ser fácilmente escorificables. Normalmente se requiere 1.6 kg de caliza por cada kg de ceniza.

TABLA 2.5 Composición de las cenizas del coque

SiO ₂	35%
Al ₂ O ₃	25%
CaO	15%
MgO	5%
P	0.15%
Fe ₂ O ₃	15%

Proceso de coquización

El coque, como se ha mencionado, se obtiene por destilación de las hullas en cámaras, cuyas dimensiones aproximadas son de 0.4 m de ancho por 4.5 m de altura por 12 m de fondo; su capacidad es de unas 20 toneladas de carbón. Son agrupadas en baterías de 20 a 80 hornos, y dan lugar a lo que se denomina como planta de coquización (véase figura 2.7).

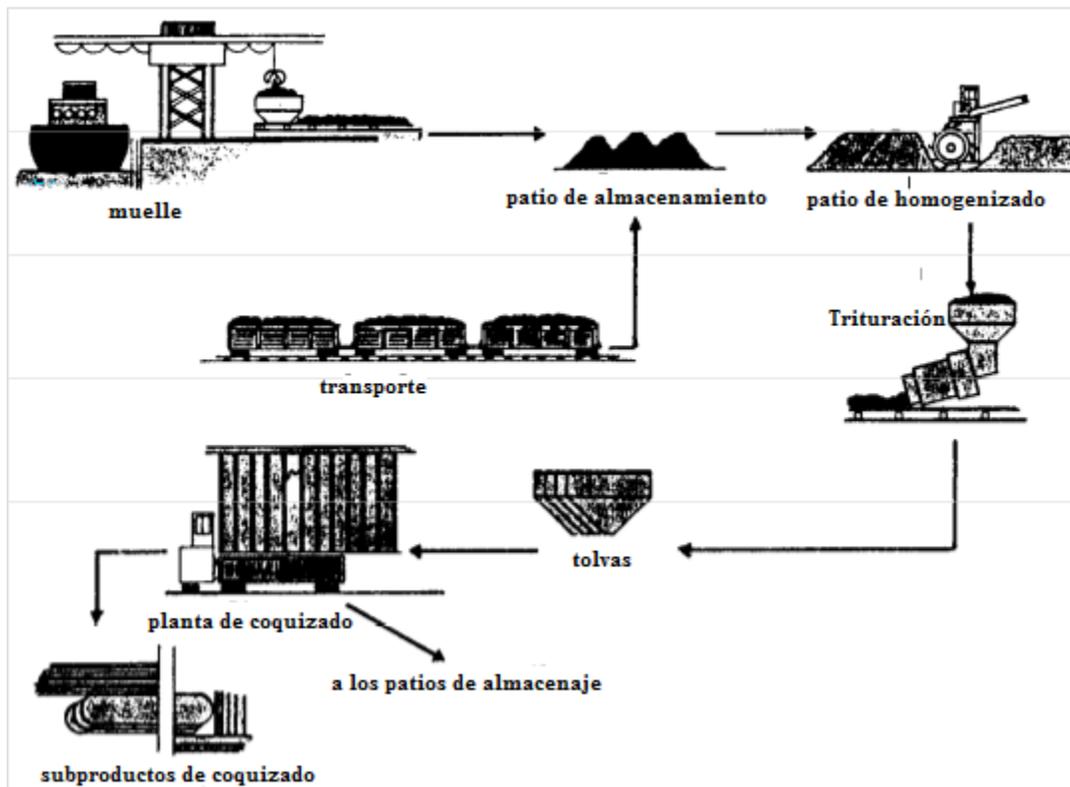


FIGURA 2.7 Diagrama de flujo del carbón mineral

Para el proceso se requiere calentar el carbón a temperaturas del orden de los 900 a 1250 °C, mediante la combustión de una fracción de los propios gases de coquización no condensables. Los humos pasan a través de las paredes de las cámaras, circulan posteriormente por un regenerador y de allí salen por la chimenea. El proceso suele durar de 16 a 24 horas dependiendo de la temperatura y ancho de las cámaras (4 horas por 0.1 m de ancho).

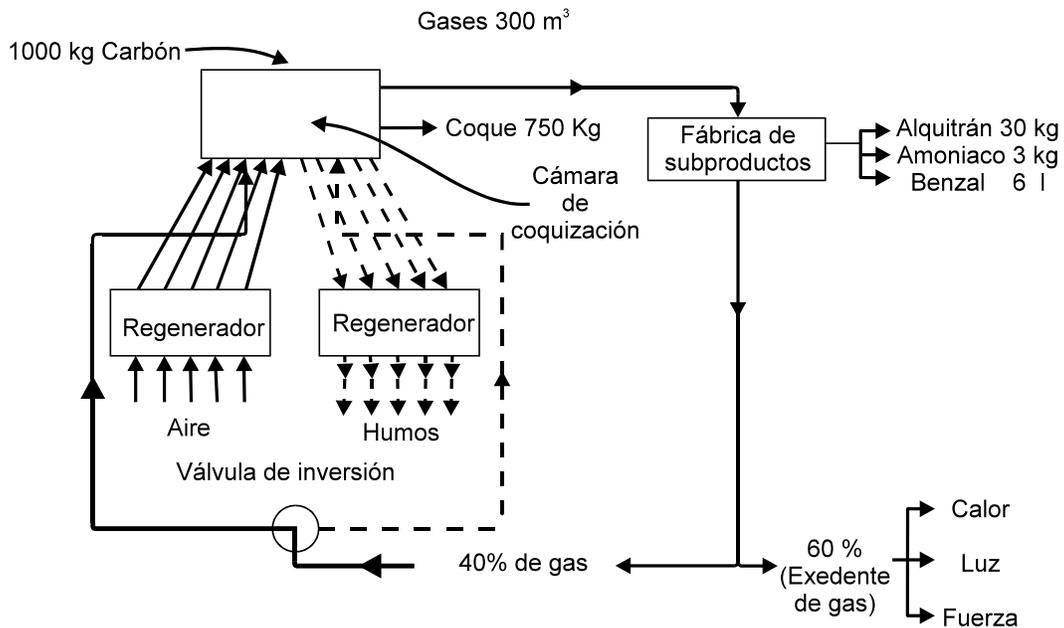


FIGURA 2.8 Esquema general de una batería de coque con fabricación de subproductos

Por cada 1000 kg de carbón se obtiene aproximadamente:

- 750 kg de coque
- 300 m³ de gas
- 20 kg de brea
- 30 kg de alquitrán

Debido a que el coque representa el costo operativo fundamental (50 al 70% del costo total), en el alto horno se han efectuado mejoras para reducir su consumo; en los últimos 50 años ha pasado de 1 tonelada de coque por cada tonelada de arrabio a menos de 400 kg.

2.4 MÉTODO DEL ALTO HORNO

Por su economía y capacidad de producción, el alto horno es la instalación de reducción de hierro más empleada en el mundo, véase la figura 2.9.

Los primeros hornos de este tipo aparecieron en Europa en el siglo XIV; empleaban como combustible carbón vegetal hasta que la escasez de este hizo necesario el uso de carbón mineral en el siglo XVII, con una producción de 300 a 500 kg/día.

Ya en el siglo XVIII, su altura era de 8 m y 30 m³ de volumen, y producían 1500 kg/d, aproximadamente. Las dimensiones de estos primeros hornos estuvieron limitadas en un principio por la capacidad de la alimentación de aire, el cual, en esta etapa, se suministraba por fuelle a una presión de 0.05 kg/cm²; posteriormente, en 1757, se emplearon sopladores de pistón (0.10 a 0.20 kg/cm²) y soplantes movidos por vapor en 1769.

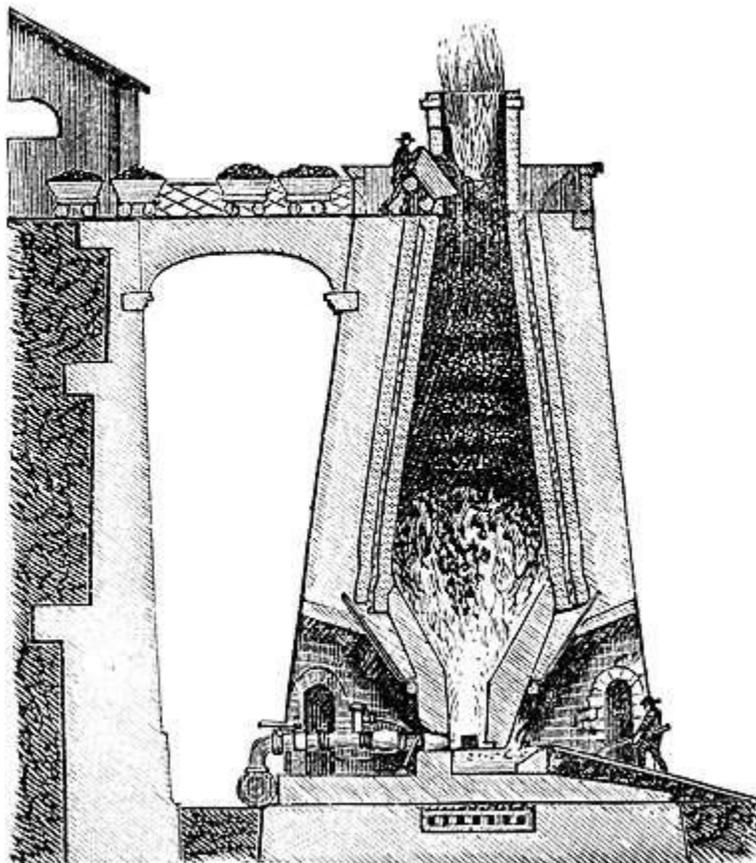


FIGURA 2.9 Aspecto de un alto horno a principio del siglo XIX

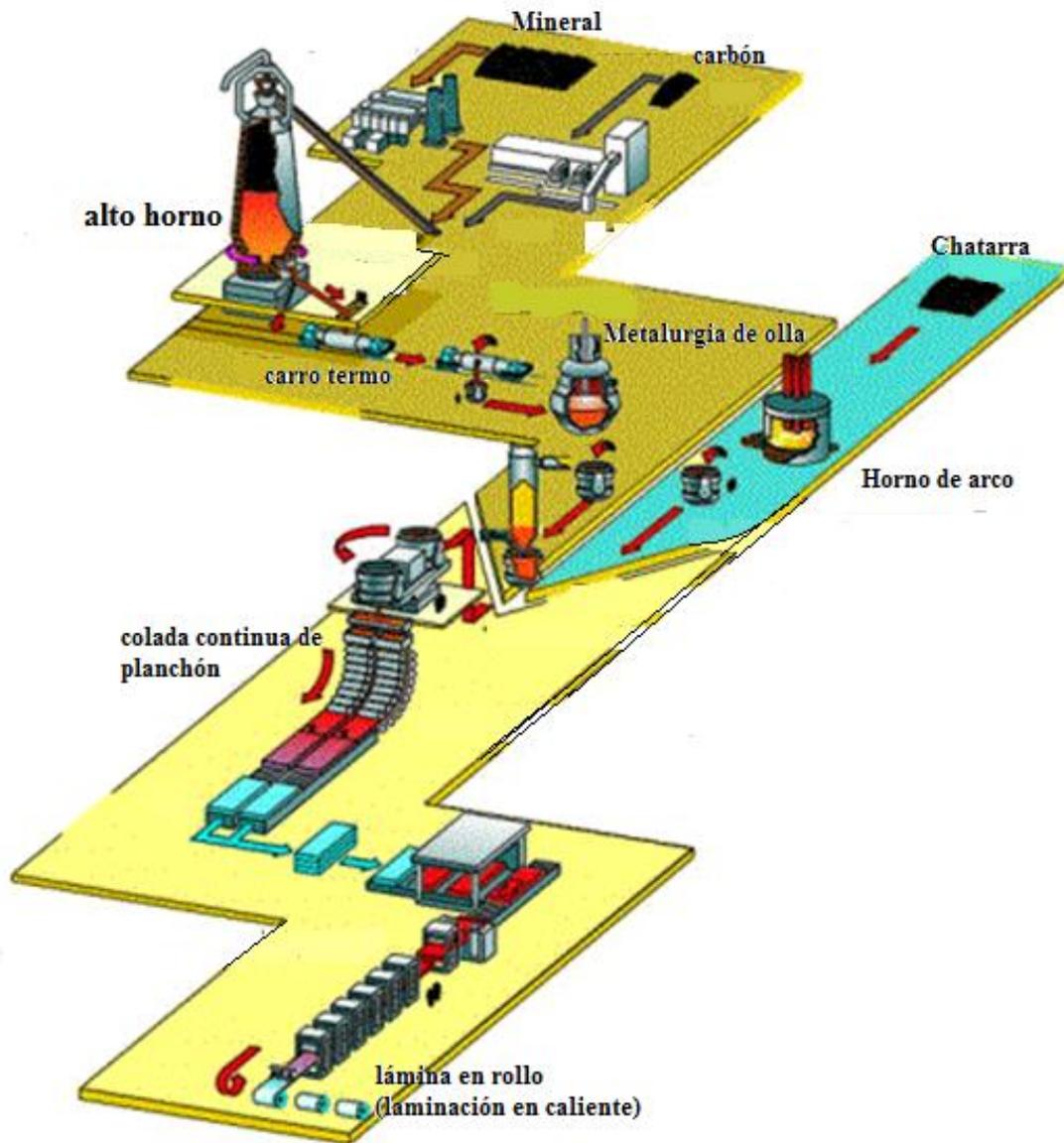


FIGURA 2.10 Descripción esquemática de una planta siderúrgica integrada.

En la tabla 2.6 se puede observar claramente la forma en la que han evolucionado estas instalaciones en los últimos 200 años:

TABLA 2.6 Evolución de los altos hornos

Año	Capacidad [ton/d]	Crisol [m]	Volumen [m ³]	Producción [kg/m ³ – d]	Temperatura del aire [°C]	Consumo Coque
1800	5	1.5	50	100	15	6500
1825	10	2.5	75	130	15	6000
1850	40	2.7	150	300	400	2500
1875	100	3.0	250	400	500	1800
1900	300	4.0	400	750	600	1300
1925	800	6.0	500	1600	800	1200
1950	1000	7.0	800	2000	950	1000
1965	4000	9.5	1750	2290	1100	650
1995	10000	14.0	4000	2500	1250	420

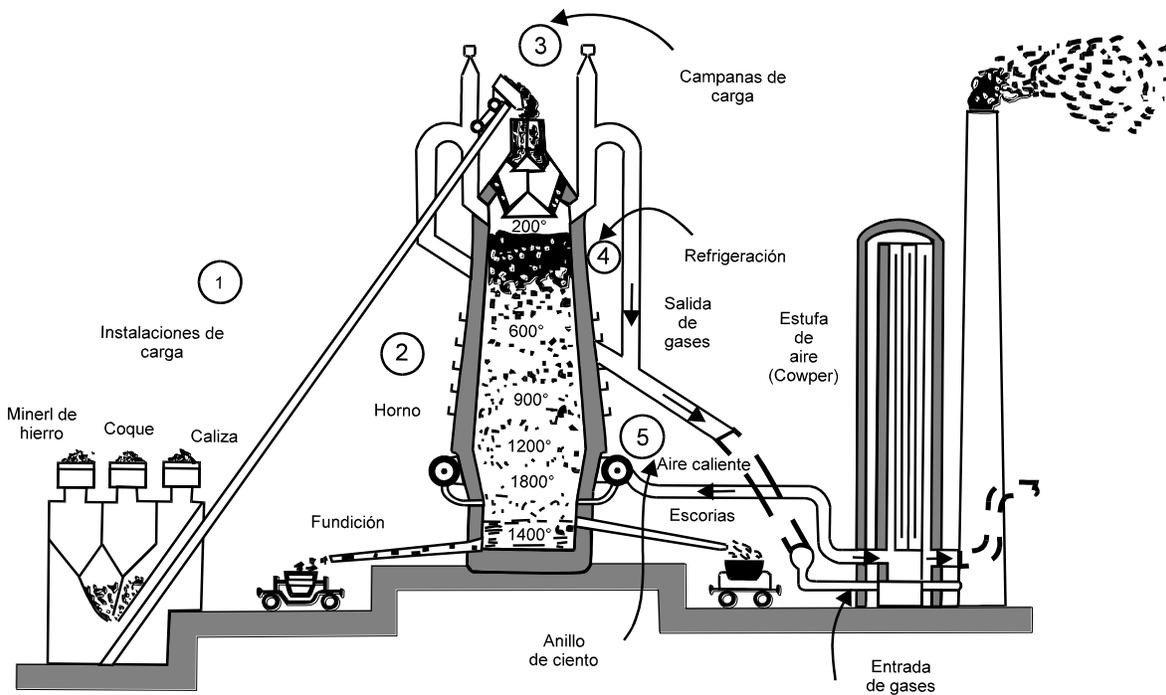


FIGURA 2.11 Instalación de un alto horno

Sistema de suministro y precalentamiento de aire. El aire que se introduce en el horno es impulsado por soploadores movidos por turbinas de vapor. La presión de suministro depende del diseño y capacidad del horno: en hornos de contrapresión, la presión es del orden de 4.5 kg/cm^2 , aunque en otros casos puede ser tan baja como 1.5 kg/cm^2 .

De los turbosopladores, el aire es enviado a la estufa Cowper, en donde se precalienta a una temperatura de 800 a $1000 \text{ }^\circ\text{C}$. En estufas con cámara de combustión independiente el viento se calienta hasta $1300 \text{ }^\circ\text{C}$.

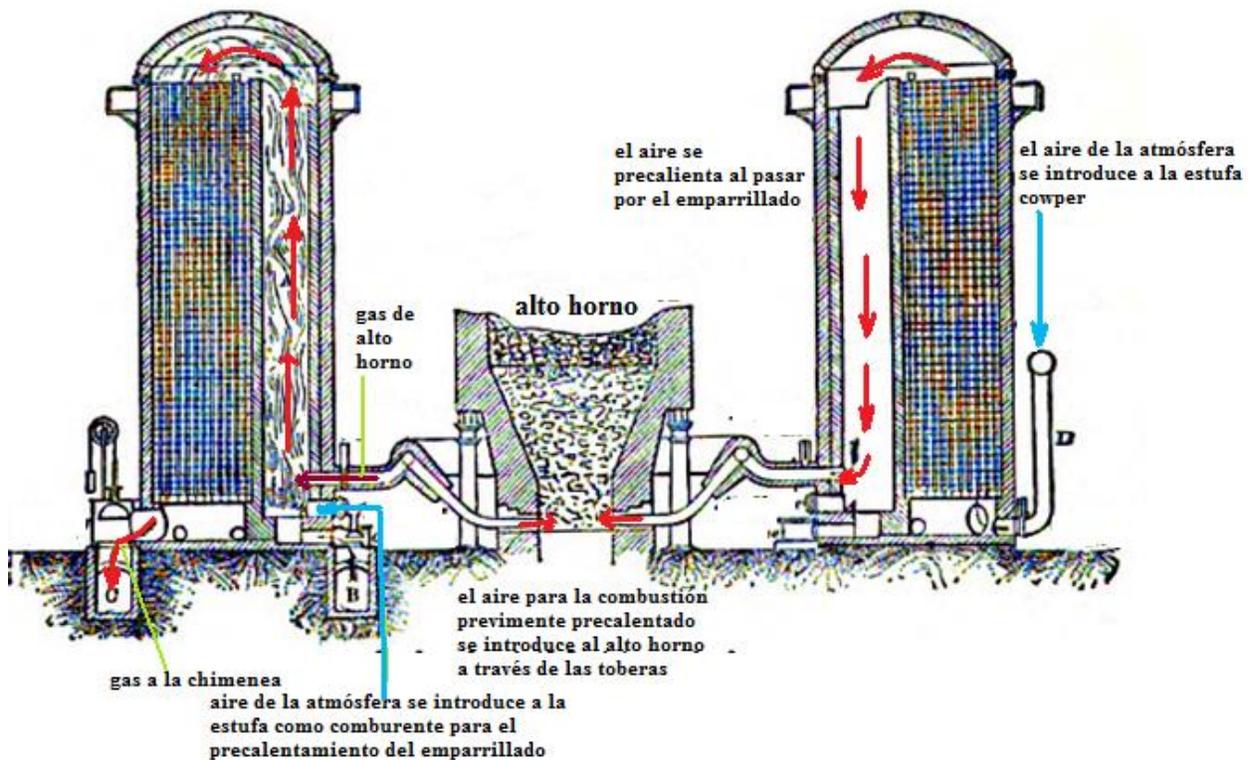


FIGURA 2.12 Estufas Cowper

De las estufas de calentamiento el aire pasa al anillo de viento y de ahí es suministrado al horno a través de las toberas. Estas piezas son normalmente de cobre y se refrigeran con agua; su número es variable y depende del tamaño del horno, siendo del orden de:

Diámetro del horno (m)	6	7	8.5	10	14
Número de toberas	20	25	30	32	40

Reacciones químicas que se producen en el interior del horno

Las reacciones químicas que se llevan a efecto caracterizan a cada una de las zonas de horno, así tenemos:

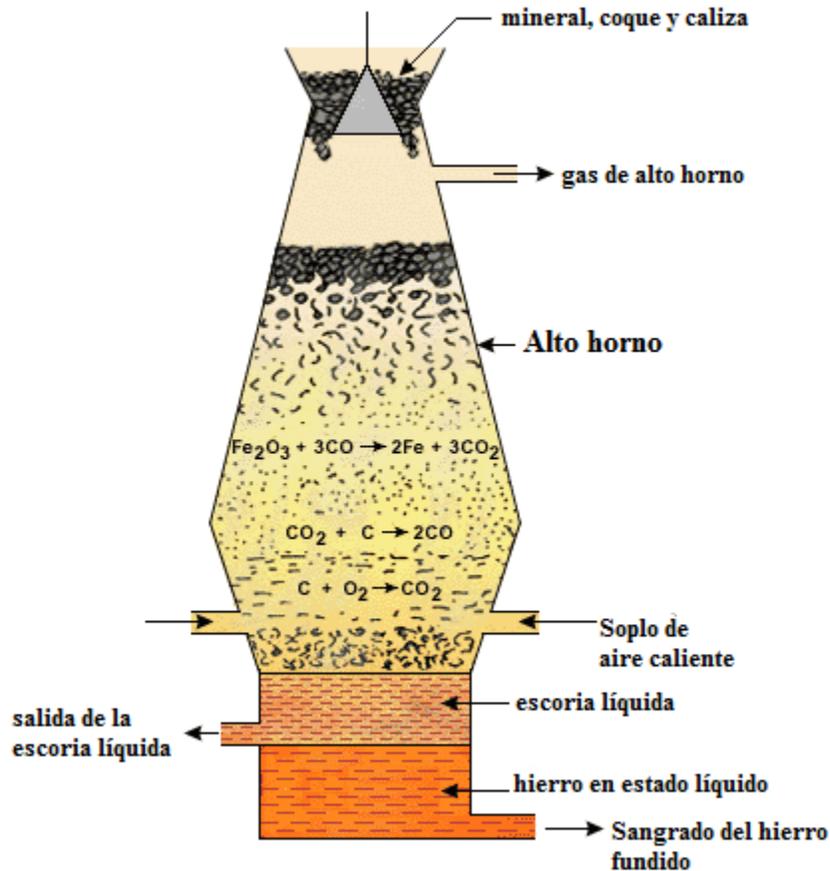


FIGURA 2.13 Reacciones químicas que se producen en el alto horno al reducir hematita

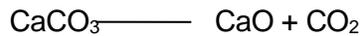
La reducción directa del mineral y la obtención del óxido ferroso ocurren en la cuba a una temperatura de 500 a 1000 °C, presentándose las siguientes reacciones:



Alrededor de 600 °C se realiza la descomposición del carbonato de hierro, en caso de estar presente, según:



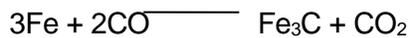
La descomposición de la caliza ocurre aproximadamente a 800 °C



La reducción del óxido ferroso se efectúa a temperaturas mayores a los 950 °C de acuerdo con la siguiente reacción:

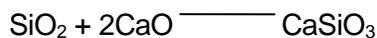
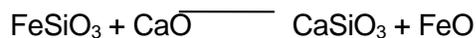
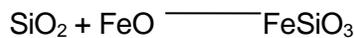


El hierro metálico obtenido en el alto horno se encuentra en sus primeros momentos en forma de esponja sólida, ya que su temperatura de fusión es muy elevada (1539 °C). Dicha esponja en presencia del monóxido de carbono se carbura, lo que se puede ejemplificar a través de la siguiente reacción:



Al absorber un alto contenido de carbono (1.5 a 3%), el hierro se funde en virtud de que su temperatura de fusión se ha reducido; luego, al descender en forma de gotas a través del coque incandescente, se carbura todavía más y llega al crisol con un 3 a 4% de carbono, con lo que se ha transformado en una fundición.

Al alcanzar las altas temperaturas de 1000 a 1350 °C, comienza entonces la formación de la escoria que está constituida por varios silicatos. Se debe tener en cuenta la proporción de cal y sílice que la componen (CaO/SiO), de tal manera que dicha relación sea aproximada a la unidad, para que así se favorezca la desulfuración y la temperatura de fusión de la escoria resultante sea mínima. Las reacciones de formación de escorias son:

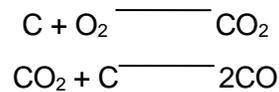


La reducción de los óxidos de manganeso y silicio es difícil, se logra solo a temperaturas mayores a 1350 °C. Puede considerarse que dichas reacciones ocurren por acción directa del carbono, según lo siguiente:



Estos elementos una vez reducidos pasan a la fundición. El aire que penetra en las toberas a gran velocidad (100 a 150 m/s) reacciona con el coque incandescente y produce una combustión incompleta con la formación del monóxido de carbono. En la proximidad de las toberas, se alcanzan temperaturas de 1850 a 2000 °C.

Las reacciones características son:



Con base en lo anterior, se tiene que las cuatro fases principales que se presentan en un alto horno para la obtención del arrabio son:

1. Combustión del coque y de otros combustibles, tales como hidrocarburos líquidos y gaseosos, con la finalidad de conseguir las condiciones necesarias para la reducción.
2. Reducción de los óxidos presentes.
3. Carburación del hierro y fusión del arrabio.
4. Separación del arrabio y escorias por diferencia de densidad.

El alto horno se puede considerar como un gran reactor que trabaja a contracorriente. Es atravesado de abajo hacia arriba por una columna gaseosa caliente de carácter reductor que tarda de 3 a 8 s ; por otro lado, la carga sólida en descenso dura de 12 a 18 h.

Si se analiza igualmente la columna sólida descendente se encontrarán tres zonas de trabajo (véanse las figuras 2.13 y 2.14):

1. Reducción indirecta del mineral
2. Reducción directa
3. Combustión, fusión del hierro y formación y fusión de las escorias.

Las escorias están formadas por la ganga del mineral, cenizas del coque, así como por el fundente.

La función del fundente es reaccionar con la ganga y las cenizas presentes, reduciendo la temperatura de fusión de la escoria resultante. La composición más idónea de la escoria se puede ajustar a través del índice de basicidad, que está definido por el siguiente cociente:

$$I.B. = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3}$$

Es conveniente que dicho índice sea del orden de 1, para que así la temperatura de fusión sea mínima.

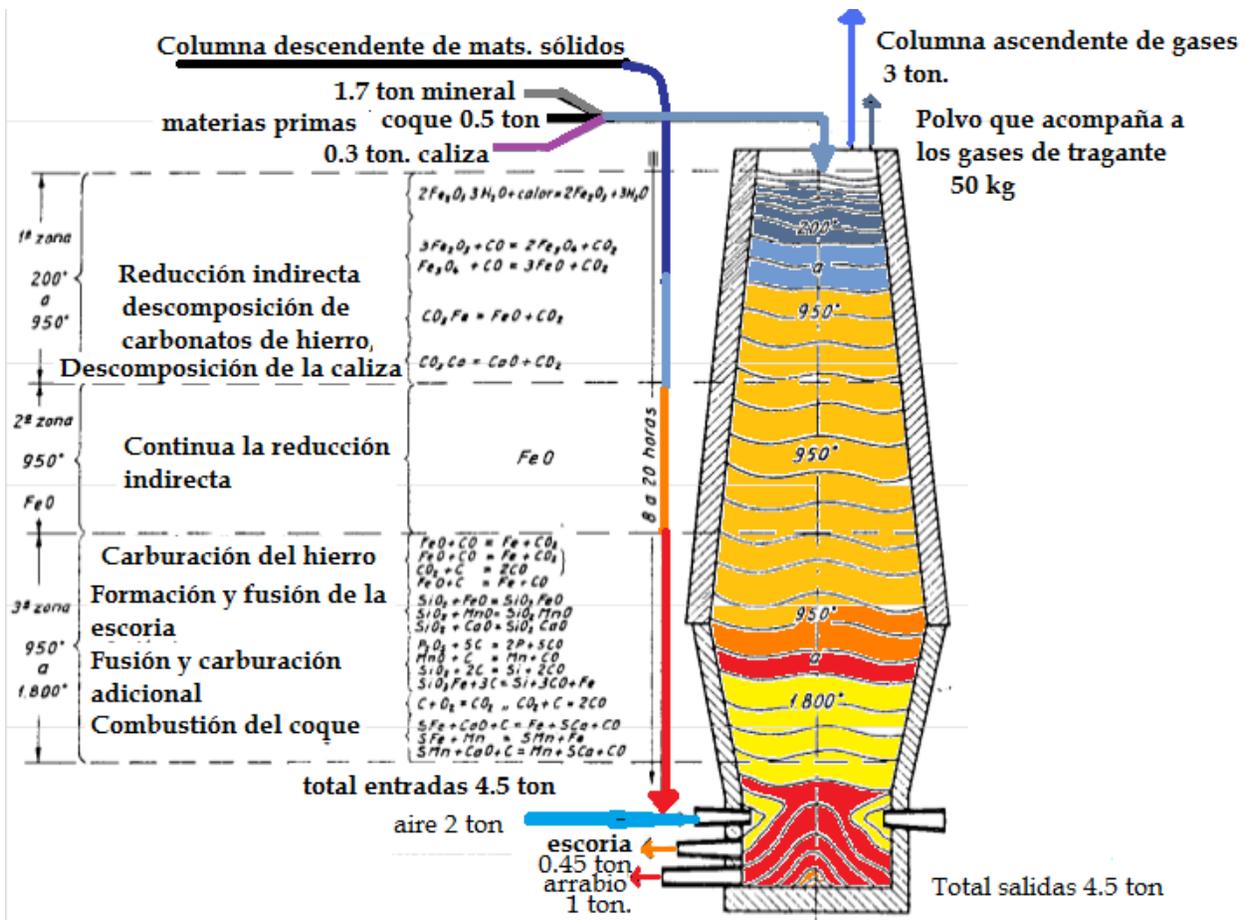


FIGURA 2.14 Descripción esquemática general de la marcha de un alto horno. [Fabricación de hierro, aceros y fundiciones, José Apraiz B., URMO, 1978]

2.5 PROCESO DE ACERACIÓN

El arrabio o hierro de primera fusión que se obtiene en el alto horno se caracteriza por contener elevados porcentajes de carbono, manganeso y silicio, así como también fósforo. Una composición típica es la siguiente:

C = 3.5%

Mn = 1%

Si = 2%

P = 0.1%

S = 0.04%

El arrabio presenta un elevado porcentaje de impurezas, por lo cual resulta indispensable eliminarlas, ya que el contenido característico de ellas en un acero es menor. La eliminación se efectúa por oxidación, dada la mayor afinidad del manganeso, silicio, carbono y fósforo con el oxígeno, lo cual permite entonces ajustar su composición hasta un rango aceptable, sin pérdidas importantes del hierro. De lo anterior se puede resumir que cualquier proceso de aceración representa la eliminación de las impurezas del arrabio líquido por oxidación de estas.

Los procesos de afino de arrabio se remontan al siglo XIV, cuando comienza el segundo período de la siderurgia, que se caracterizó por la obtención de hierro en dos etapas: no se entiende

1. La fundición se producía en estado líquido en el alto horno.
2. Partiendo de la fundición y oxidándola en los hornos bajos o de pudelar, se generaba el hierro en estado pastoso.

La técnica anterior fue abandonada a mediados del siglo XIX al aparecer los primeros convertidores Bessemer. Desde entonces, se han desarrollado una serie de procesos; entre los más importantes se encuentran: convertidores con soplo de aire (Bessemer y Thomas), horno de hogar abierto (proceso Siemens-Martin) y convertidores con soplo de oxígeno (convertidor LD u horno básico de oxígeno BOF).

Actualmente, las dos primeras técnicas han sido abandonadas y se sustituyeron por el BOF, fundamentalmente, y sus variantes.

Convertidor Bessemer (Soplador de aire). Mediante este fue posible obtener en estado líquido cualquier tipo de acero, así como aumentar drásticamente su producción.

Aunque ya anteriormente se habían realizado experiencias buscando la obtención de acero por soplado de aire, no fue sino hasta que Henry Bessemer, después de una serie de tropiezos, logró en el año de 1856 desarrollar a escala industrial el proceso. Bessemer se enfocó a resolver este problema debido a que requería construir cañones de mayor alcance; encontró entonces que el material ideal era el acero, el cual en la época no se producía en cantidad y calidad suficiente.

El convertidor consistía en una olla con forma de pera (figura 2.15), revestida con refractario ácido, esto a diferencia del Thomas (desarrollado posteriormente) que se revestía con refractario básico.

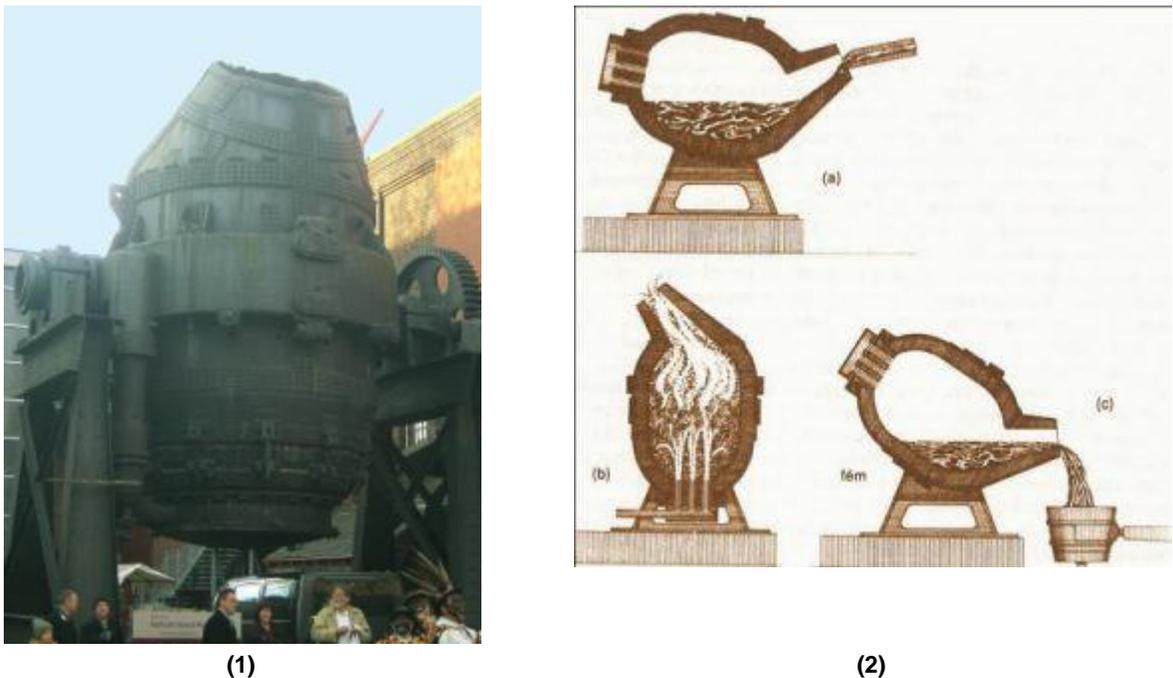


FIGURA 2.15 (1) Convertidor Bessemer. (2) Etapas: (a) Carga del arrabio líquido, (b) Soplo de aire a presión, (c) Descarga del acero líquido

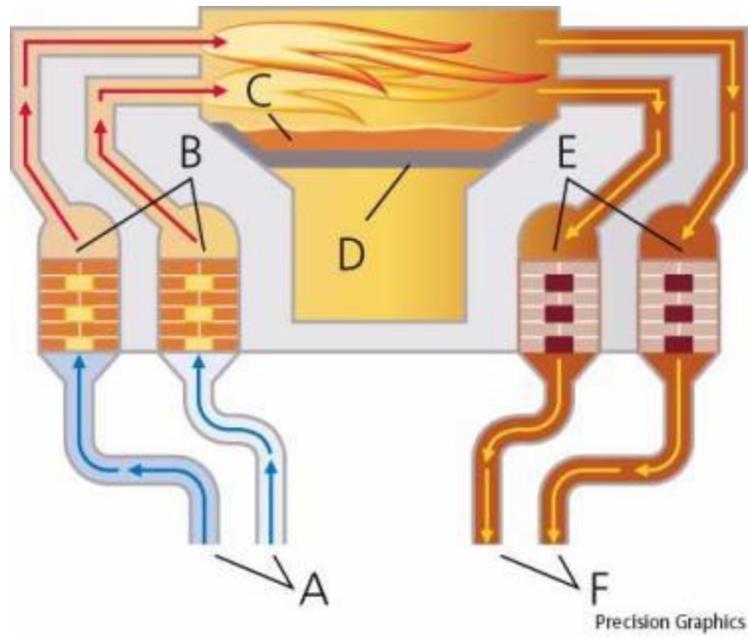
Proceso Siemens-Martin (Horno de hogar abierto). Fue la instalación de aceración más importante durante toda la primera mitad del siglo XX hasta 1968. Su nombre se deriva de los dos técnicos que lo desarrollaron y que preconizaron sus principios básicos de operación.

Durante toda la primera mitad del siglo XIX, se realizaron intentos para fabricar hierro y acero en hornos de solera. Estos ensayos fracasaron al no alcanzar la temperatura de colada del acero (1600-1650 °C). El sistema desarrollado por Friedrich Siemens aprovecha el calor latente de los humos de combustión, precalentando el aire, de esta forma, por vez primera logra fundir acero en un horno de solera. El primer horno industrial de este tipo fue instalado por Siemens, en 1866, en Inglaterra, quien además, con base en otras experiencias, concibió la idea de fabricar acero con fundición y mineral, y oxidar los elementos indeseados por acción del oxígeno del mineral, así como por los gases del horno. En principio, el proceso era similar al pudelado, con la diferencia de que en los hornos con regeneradores, las temperaturas alcanzadas permitían mantener en estado líquido el material.

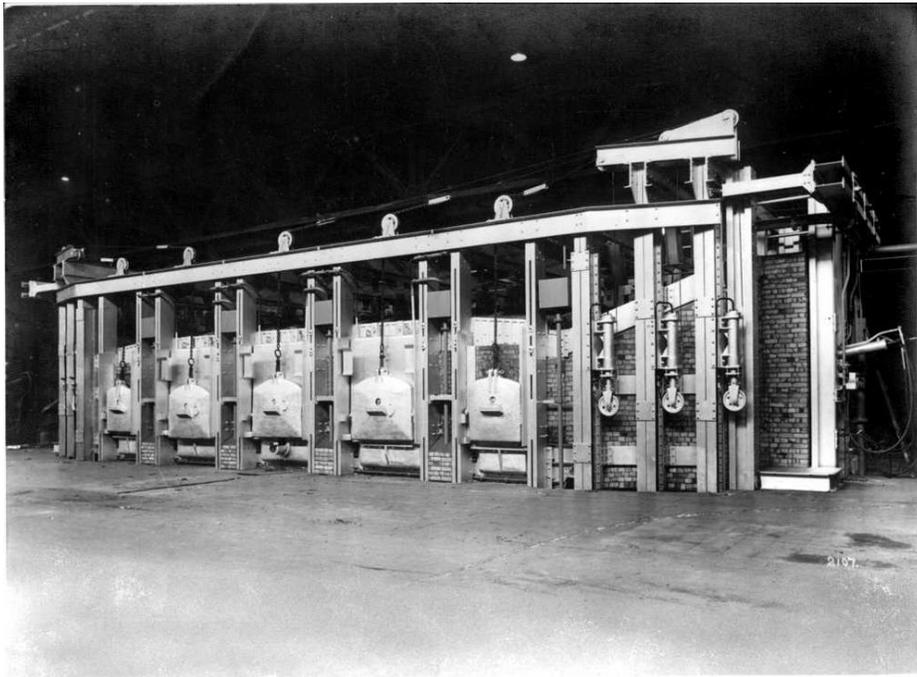
De manera independiente y en forma paralela, Pierre Martin intentó obtener acero partiendo de mezclas de aleaciones y desperdicios de hierro, en general, para lo cual empleó un horno de reverbero al que le había aplicado los regeneradores de calor inventados por Siemens. Lo anterior, desde el punto de vista teórico, en nuestros días podía parecer intrascendente, pero en 1865, cuando este horno fue patentado, el proceso produjo un cambio trascendental, debido a que en aquella época, la chatarra y desperdicios no tenían valor por no poder ser utilizados.

En este proceso la oxidación de impurezas se realiza por la acción combinada del óxido de la chatarra, de la llama oxidante y de la escoria.

Por lo anterior, a este proceso se le ha denominado Siemens-Martin y las unidades de fusión se conocen como hornos de hogar abierto, véase la figura 2.16.



(a)



(b)

FIGURA 2.16 (a) Esquema de operación de un horno de hogar abierto con regeneradores de calor (b) Horno de hogar abierto

Ventajas del proceso:

- La calidad del acero producido es mayor que la de Bessemer y Thomas, y similar a la obtenida en un BOF.
- La composición del baño se puede ajustar fácilmente. Era factible producir aceros de alta calidad.
- No existía ningún problema en la fabricación de aceros de mediano y alto carbono (0.3 a 0.8% C).

Limitaciones del proceso:

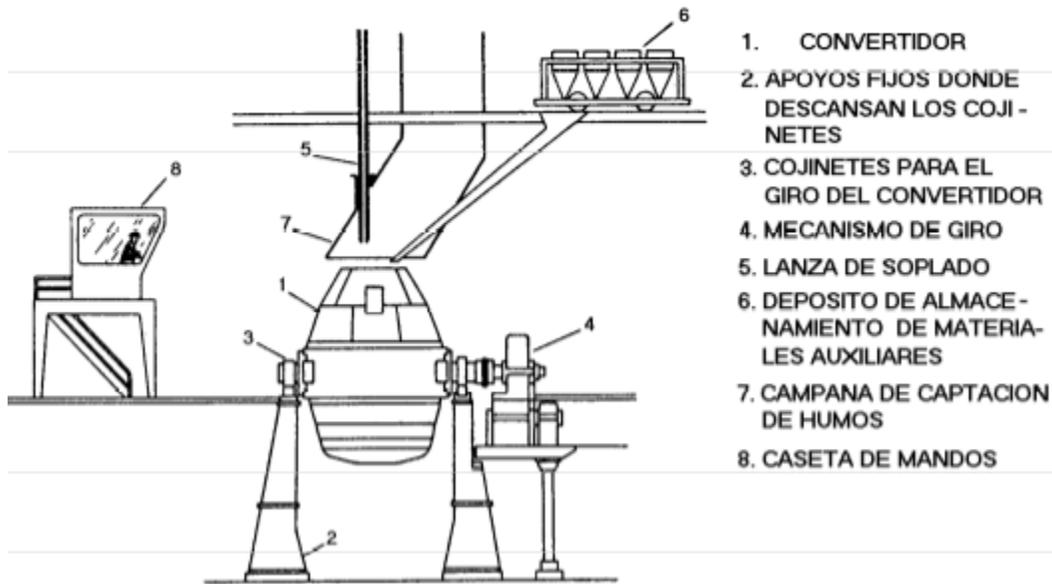
- Elevados tiempos de marcha (de 5 a 8 h).
- Costo de la instalación mucho mayor que un BOF
- Debido a su alto costo inicial, este tipo de instalación quedó obsoleto desde hace unos 50 años. Estos hornos fueron desmantelados en los años 80's, con excepción de Rusia y Ucrania, donde hasta la fecha (2017) continúan en operación y representan más del 30% de la producción total de acero en esos países.

Fabricación de acero con soplador de oxígeno. La designación de este proceso es muy variada; usualmente se conoce como convertidor LD (Linz-Durrer) en recuerdo tanto de la fábrica donde comenzó industrialmente como de la persona que lo inició. En Estados Unidos se le denomina BOF (Basic Oxigen Furnace). Es el proceso de fabricación de acero más importante de la segunda mitad del siglo XX. En general, se caracteriza por tratarse de convertidores básicos con lanza vertical para el soplado de oxígeno. Actualmente, ha desplazado totalmente a los convertidores con soplo de aire, así como a los hornos de hogar abierto.

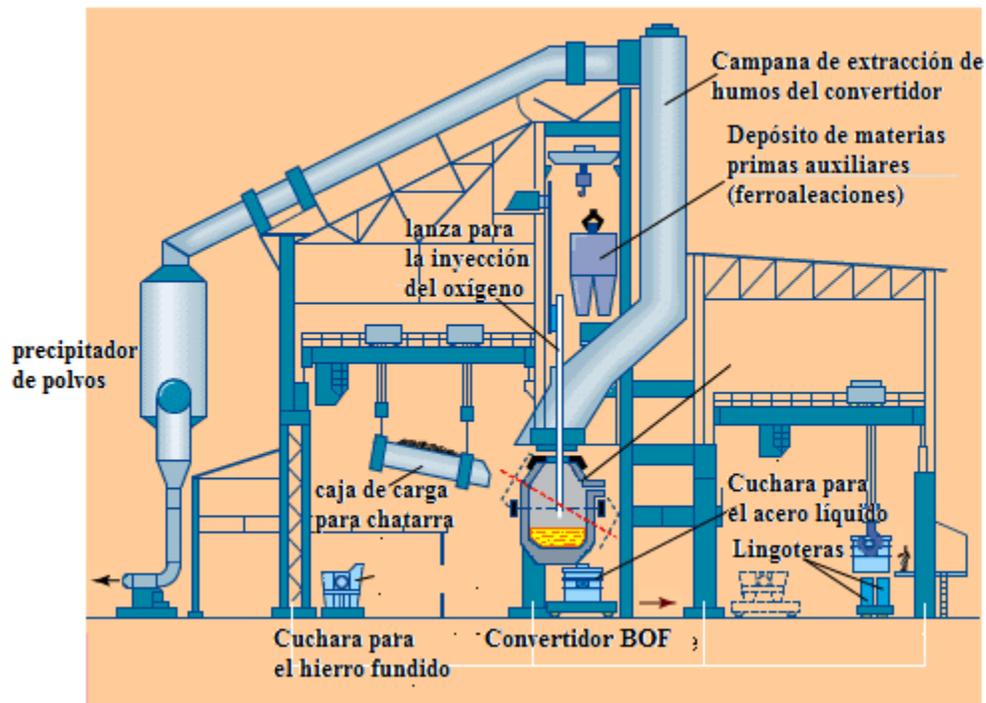
Descripción del equipo. Estos convertidores tienen forma de crisol (figuras 2.17 y 2.18). Su parte superior es troncónica, de tal forma que la abertura mide aproximadamente un 40% del diámetro de la zona cilíndrica. Son construidos de placa de acero soldada, de 30 a 50 mm de espesor; todo el convertidor está revestido con refractario básico y, generalmente, el espesor está comprendido entre 250 y 800 mm.

La capacidad de estos equipos varía de 30 a 300 t, en los que la carga fundida ocupa solamente 1/5 del volumen útil del convertidor.

Los elementos fundamentales son cuerpo del convertidor; apoyos fijos donde descansa el convertidor y sobre los cuales gira; mecanismo de giro; lanza de soplado con sus elementos de elevación y ajuste; depósito de almacenamiento y dispositivos de carga de materias primas; campana de captación de humos y sistema de depuración.



(a)



(b)

FIGURA 2.17 (a), (b) Vistas generales de un convertidor LD [BOF]

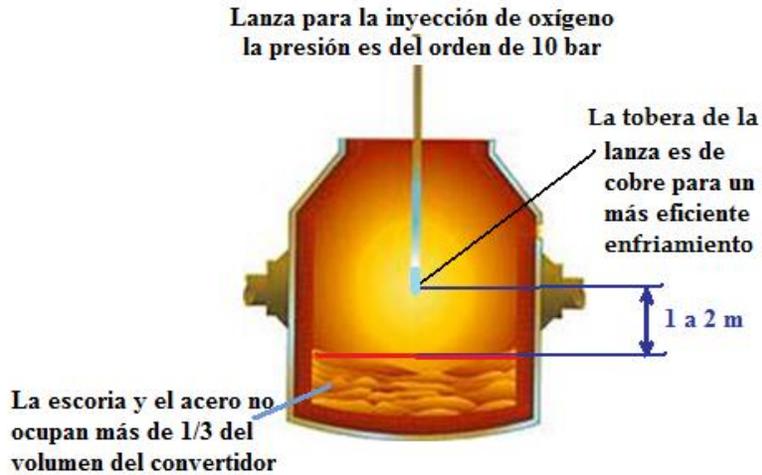


FIGURA 2.18 La lanza de oxígeno se posiciona muy arriba del nivel del metal líquido, su alta presión y las reacciones exotérmicas producen un elevado flujo en el metal, lo cual ayuda a mantener la temperatura y a eliminar las impurezas

2.6 FABRICACIÓN DE ACERO A PARTIR DE PRERREDUCIDOS

Los procesos más antiguos para la obtención de hierro se caracterizaban por la reducción directa del mineral. Este tipo de marchas fueron totalmente abandonadas y olvidadas, y pronto se sustituyeron por los primeros altos hornos. En la figura 2.19 se comparan esquemáticamente ambos procesos. Actualmente, los procesos de reducción han tomado de nuevo validez: existen una gran diversidad de patentes y procedimientos de los cuales el HyL de origen mexicano es uno de los más usuales.

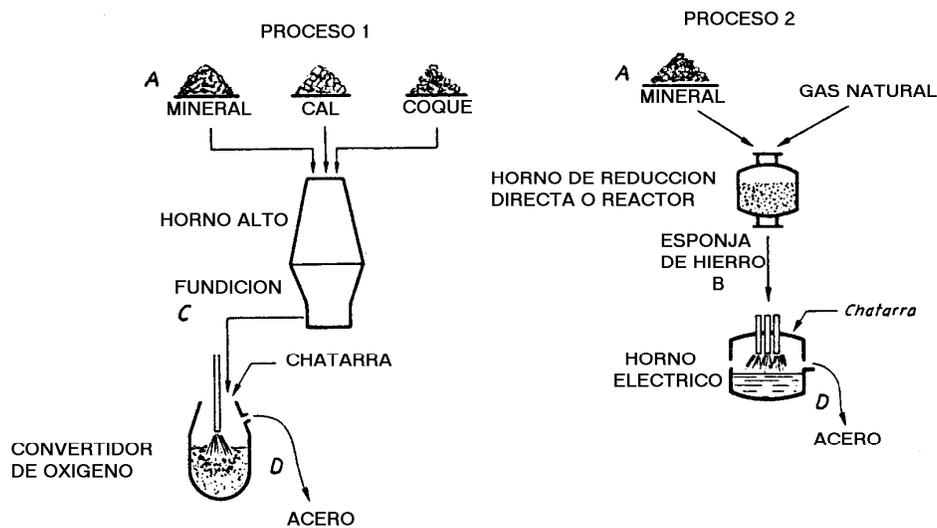


FIGURA 2.19 Comparación esquemática de los procesos de alto horno y reducción directa

Un proceso de reducción directa se caracteriza por la obtención del hierro a partir del mineral sin que se presente fusión de este, de ahí entonces su nombre. Las instalaciones empleadas son de costo reducido comparadas con un alto horno.

Las principales ventajas de este proceso son: bajo costo inicial de las instalaciones; se puede emplear el hierro esponja como sustituto de la chatarra, la cual en países como el nuestro escasea y es de mala calidad; no se requiere de coque para el proceso; mayor versatilidad para absorber variaciones de la demanda. Todo lo anterior ha provocado que estos procesos (principalmente el HyL) sean muy estimados en países con reducidos recursos económicos y que cuentan a la vez con gas natural; asimismo, son ideales en la instalación de miniacerías.

En el proceso HYL III (figura 2.20), el mineral es reducido en un reactor u horno reductor. Se emplea para tal fin monóxido de carbono e hidrógeno, preparados por reacción catalítica de vapor de agua, gas natural y el mismo gas utilizado anteriormente en el proceso.

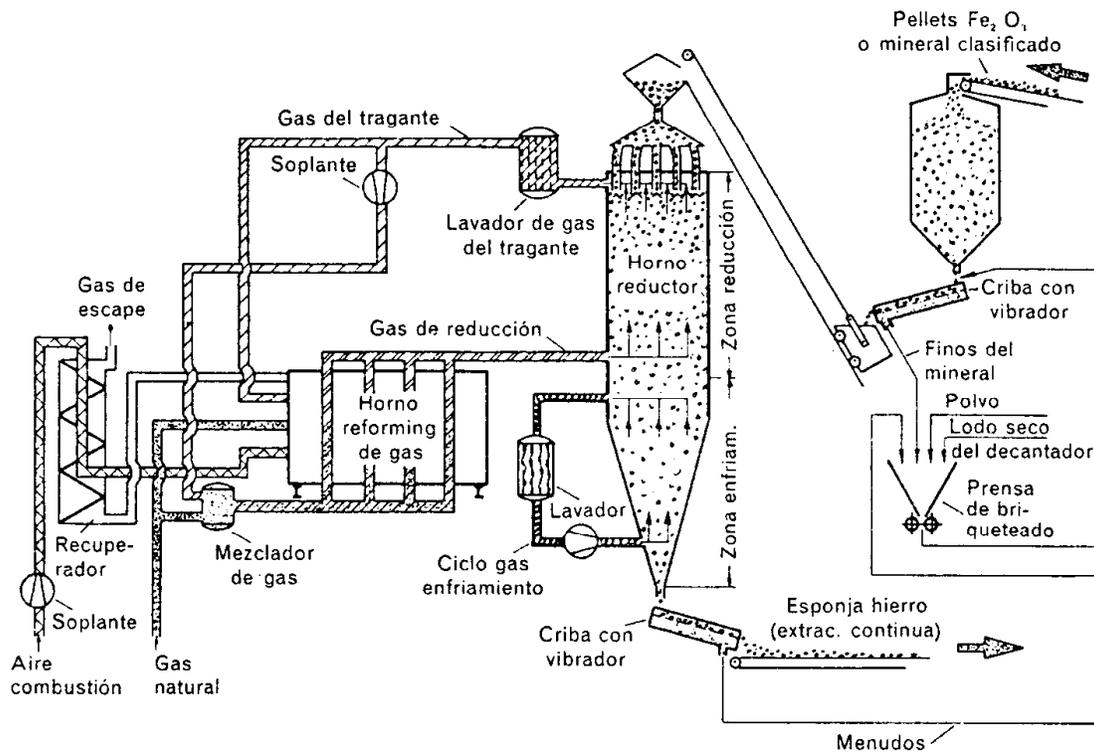


FIGURA 2.20 Esquema general de una instalación HYL III

Una de las principales características del método es que la reducción es continua, o sea, el mineral se va desplazando por gravedad a través de las diversas zonas del reactor, de tal forma que al ser descargado se encuentra ya en un 90% en estado metálico.

Descripción del proceso HyL-I. Emplea cuatro reactores de lecho fijo para efectuar de manera semicontinua la reducción de los minerales de hierro. La operación de los reactores es cíclica y cada uno de los cuatro pasa por las diferentes etapas de reducción, lo cual se logra al modificar la secuencia en la circulación de los gases (véase figura 5.21).

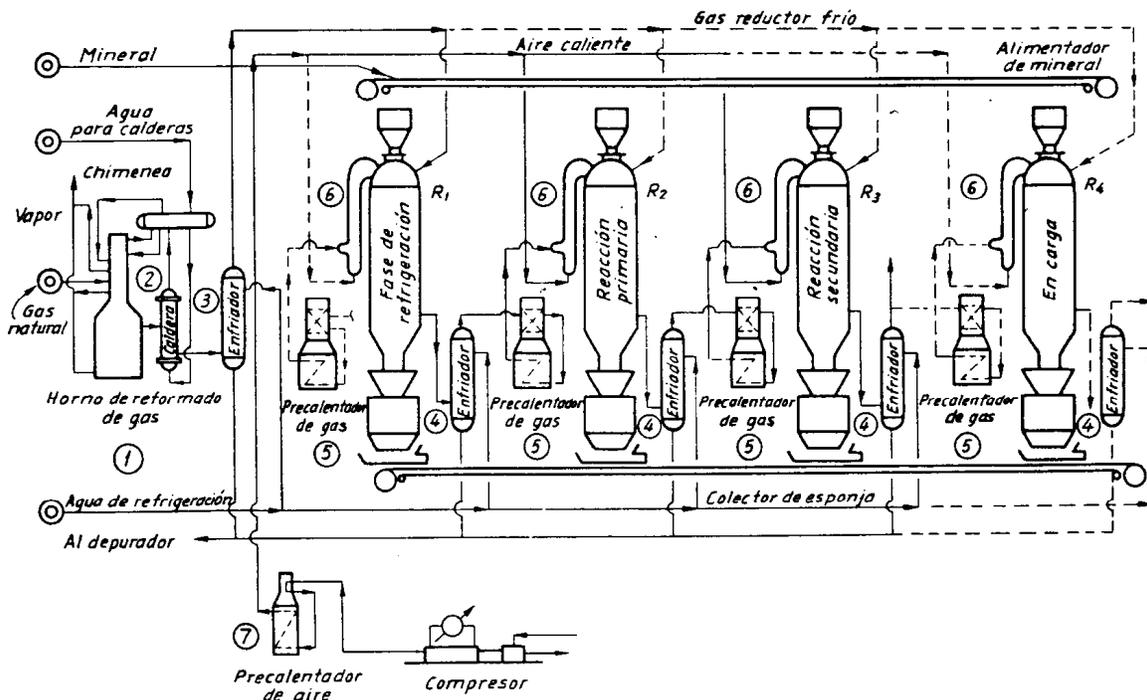


FIGURA 2.21 Esquema general de una instalación HyL-I para fabricar esponja de hierro

El proceso tiene una duración total de 12 horas. Las etapas se modifican cada 3 horas en promedio, estas son: maniobras (descarga de prerreducido y carga del mineral), precalentamiento y reducción del mineral, reducción final y enfriamiento. El gas reductor es producido en un reformador catalítico a partir de gas natural y vapor de agua. El gas proveniente del reformador se utiliza primero para enfriar el producto, dicho gas al salir del reactor es enfriado para condensar el agua formada y, posteriormente, se calienta hasta aproximadamente 1000 °C. Pasa entonces al reactor que se encuentra en la etapa de reducción (final) primaria. El gas de salida tiene bajo

potencial reductor, pero aun así es empleado para iniciar la reducción del mineral y, asimismo, es utilizado como combustible en los calentadores y reformador.

Las características típicas del hierro esponja son el contenido de carbono y el grado de metalización (*GM*). Es conveniente mencionar que el carbono resultante en el acero depende del grado de metalización y del contenido de carbono en el hierro esponja.

$$GM = \frac{Fe}{Fe+FeO}$$

A medida que el proceso HyL-I se fue modificando y perfeccionando, se instalaron plantas cada vez de mayores tamaños y más eficientes en el consumo de energía. Paralelamente, a partir de 1969 se desarrollaron investigaciones para implementar un proceso continuo de lecho móvil, que ha dado lugar al proceso HyL-III.

Descripción del proceso HyL-III. Es un procedimiento continuo en donde el reactor está dividido en tres zonas (véase figura 2.22): reducción en la parte superior, enfriamiento en la inferior y una zona intermedia que busca evitar el mezclado de los gases.

El mineral frío se alimenta al reactor por la parte superior, fluye a contracorriente con un gas reductor caliente que es alimentado en la parte media del reactor. El sólido reducido y caliente pasa a la zona intermedia, y después a la zona donde se enfría mediante la acción de un gas que fluye a contracorriente y que está compuesto por gas natural y gas reductor, dependiendo de las características que debe tener el producto.

En principio el proceso está diseñado para utilizar gas natural que es reformado con vapor de agua para producir los gases reductores (H_2 , CO) de manera similar al proceso HyL-I. Se han continuado las investigaciones con la finalidad de disminuir el consumo de gas y aumentar la productividad de la planta.

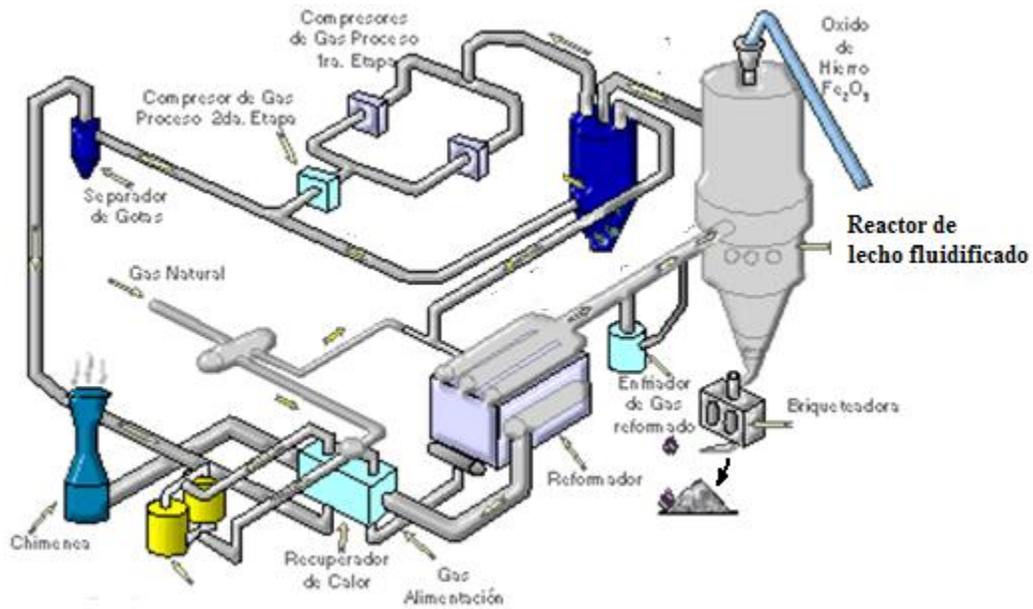


FIGURA 2.22 Descripción esquemática del proceso de reducción directa con un reactor de lecho fluidificado



FIGURA 2.23 Planta con tres reactores de reducción directa [Libyan Iron and Steel Complex, Misratah]

2.7 PRODUCCIÓN DE LOS LINGOTES DE ACERO

La última etapa en la fabricación del acero en estado líquido es precisamente la solidificación del mismo. Esta etapa no siempre ha existido, ya que en tiempos remotos el material se obtenía en estado pastoso. En realidad, la necesidad de solidificar el acero nació en 1740 cuando se desarrolló el proceso de producción de acero al crisol. A partir del descubrimiento de Bessemer (1856), todo el acero producido se fabrica en estado líquido, de ahí la importancia del procedimiento.

El acero fundido no pasa directamente del horno a la lingotera, sino que con una parte de la escoria va a la cuchara de colada, donde permanece el tiempo suficiente para que se pueda separar la escoria por su diferencia de densidad, esto también sirve para ajustar la temperatura de vaciado del material.

El colado se efectúa de tres maneras diferentes: vaciado en lingoteras, fabricación de lingotes en un equipo de colada continua y vaciado de piezas (figura 2.24).

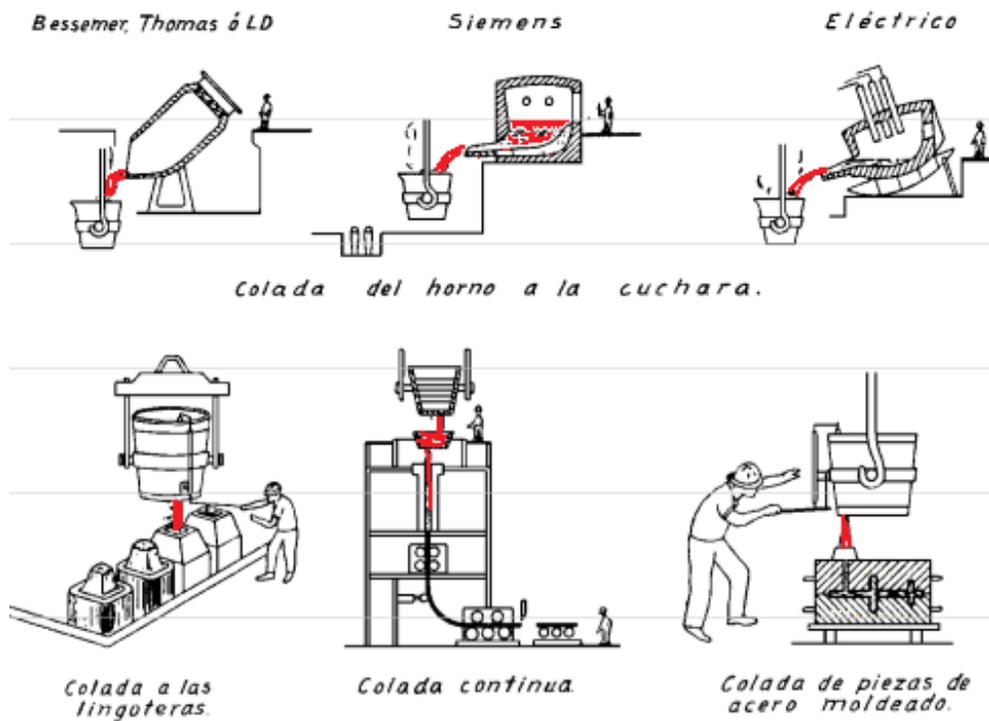


FIGURA 2.24 Colada del acero

El proceso más utilizado es el de colada continua. La mayor parte del acero producido se aplica en la fabricación de lingotes, los cuales tienen normalmente secciones cuadradas o rectangulares, aunque en algunas ocasiones se trabaja con secciones hexagonales y también octagonales. La forma y dimensiones del lingote están determinadas por el producto que se pretende elaborar a partir de este.

Colada continua. Este proceso, junto con el convertidor de sople de oxígeno, fue uno de los desarrollos siderúrgicos más importantes del siglo XX. El método, patentado por Junghans en 1933, ha sido perfeccionado de tal forma que en la actualidad la mayoría de las instalaciones siderúrgicas de gran capacidad cuentan con este tipo de máquina, tanto para la producción de palanquilla como de planchón.

En este proceso se pueden obtener los productos semiterminados antes mencionados, en espesores variables, generalmente de 50 a 300 mm, en lugar de fabricar lingotes de mayores dimensiones y después laminarlos.

La colada continua consiste en el vaciado de acero en una lingotera sin fondo que se caracteriza por estar oscilando de manera continua para obtener entonces un lingote cuya longitud teóricamente puede ser infinita.

Las lingoterías son de cobre y están cromadas en la superficie de contacto. Su longitud es de 0.5 a 0.8 m. La frecuencia oscilatoria va de 1 a 2.5 Hz, normalmente. El recorrido tiene unos 0.022 m de amplitud, regularmente la velocidad de ascenso es mayor que la de descenso. La velocidad de producción varía de 0.5 a 3 m/min.

Las principales ventajas del proceso son:

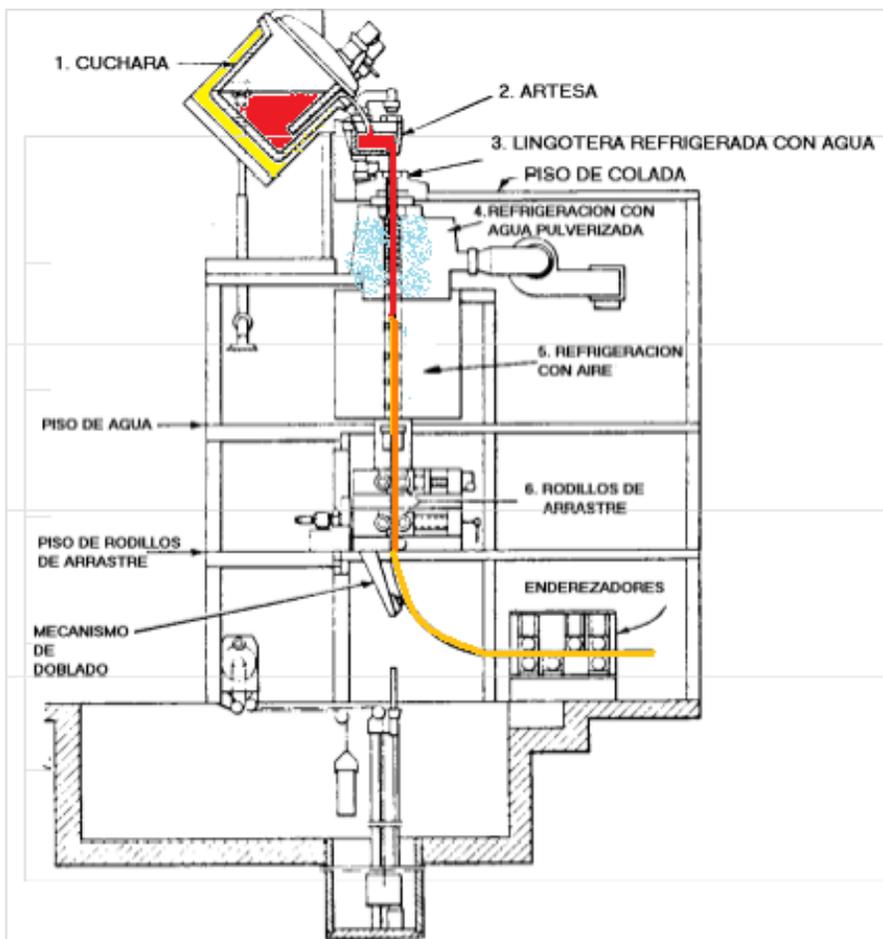
Los costos inicial y de operación se reducen en virtud de que requieren 50% menos de personal para una misma producción. Al no necesitar tren de desbaste, se reduce la inversión inicial requerida.

La eficiencia del metal líquido es de 94 a 97%, mientras que por el procedimiento de colada en lingoterías es de 83 a 90% lo que representa una disminución de los costos operativos.

El producto es homogéneo y se evitan segregaciones.

El principal inconveniente del proceso es que no se pueden fabricar piezas de secciones transversales grandes debido a que es necesaria una fuerte deformación plástica para garantizar la eliminación de la estructura de solidificación.

Descripción del proceso. En colada continua (figura 2.25) se vierte el material líquido desde la cuchara hasta una artesa intermedia, de donde pasa de manera continua e ininterrumpida a uno o varios moldes de cobre sin fondo refrigerados por agua, cuyo hueco central tiene el mismo perfil que se desea obtener. Estos moldes están sometidos a un movimiento vertical de oscilación que facilita el deslizamiento del metal solidificado.



(a)

FIGURA 2.25 (a) Descripción esquemática del proceso de colada continua

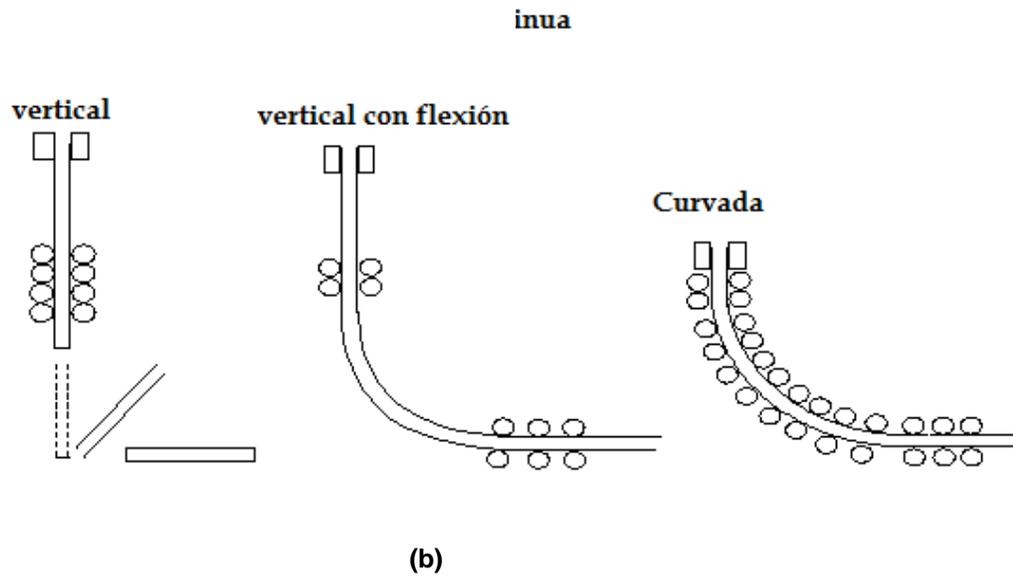


FIGURA 2.25 (b) Tipos de sistemas de colada continua

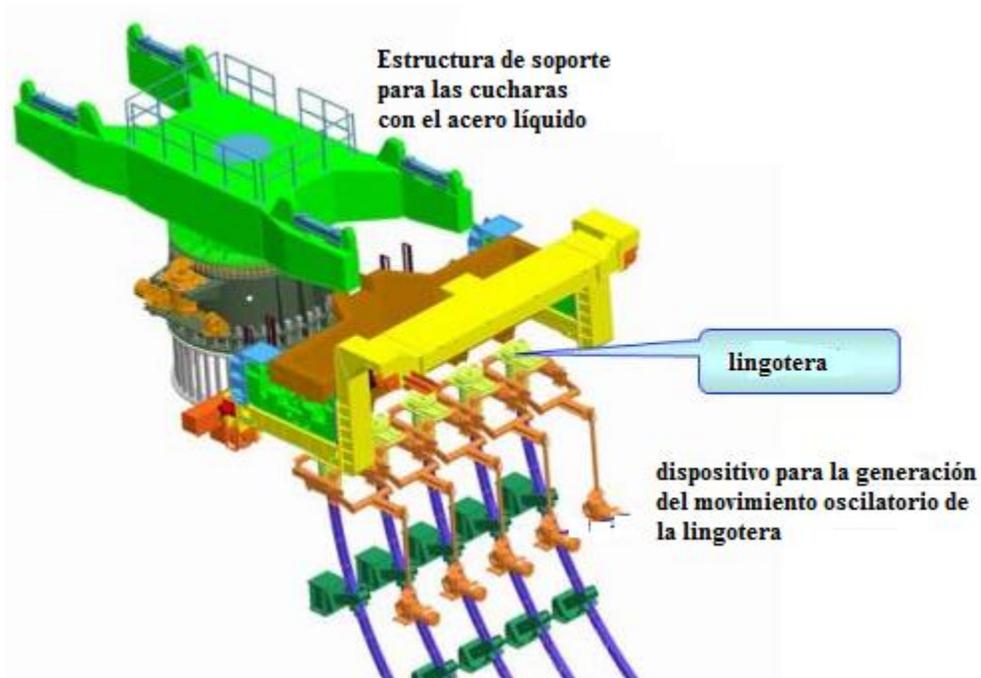


FIGURA 2.26 Descripción esquemática de una máquina de colada continua de 5 hilos



FIGURA 2.27 Planta de colada continua de planchón de Arcelormittal, Dunkerque, Francia



FIGURA 2.28 Planta de colada continua de palanquilla de 5 hilos

2.8 SUSTENTABILIDAD EN LA PRODUCCIÓN DE ACERO

El acero es el principal material empleado por el hombre y su demanda ha seguido creciendo aceleradamente en los últimos 25 años, los cuales se caracterizan por un incremento geométrico

del consumo así como también en su producción, principalmente en India y en China, donde este último ha pasado a ser el principal productor de mineral y de acero, superando con mucho a países como Japón y Rusia. En la producción del acero no solo debe considerarse el consumo de energía para la extracción del mineral y hasta la obtención del acero líquido, sino la huella de carbono producto de las reacciones características del proceso de reducción. En la figura 2.24 se muestra el consumo por las diversas vías de producción del acero, siendo por demás evidente la notable reducción en el consumo de energía que se tiene mediante el reciclado. Si bien por cuestiones económicas, la tendencia siempre ha sido la reducción del consumo de energía, lo cual se observa en la figura 2.25, aún existen nichos de mejora con lo que se logre una producción sustentable de este material tan demandado por nuestra civilización. Aunque el consumo de energía y la huella de carbono se han venido reduciendo de manera sistemática, la demanda también ha crecido sobre todo en las últimas décadas, lo cual se traduce en una mayor emisión de CO₂ (figura 2.31).

Las proyecciones realizadas indican que en las próximas décadas el consumo se duplicará, tal como se muestra en la figura 2.27, dando un mayor énfasis al reciclado.

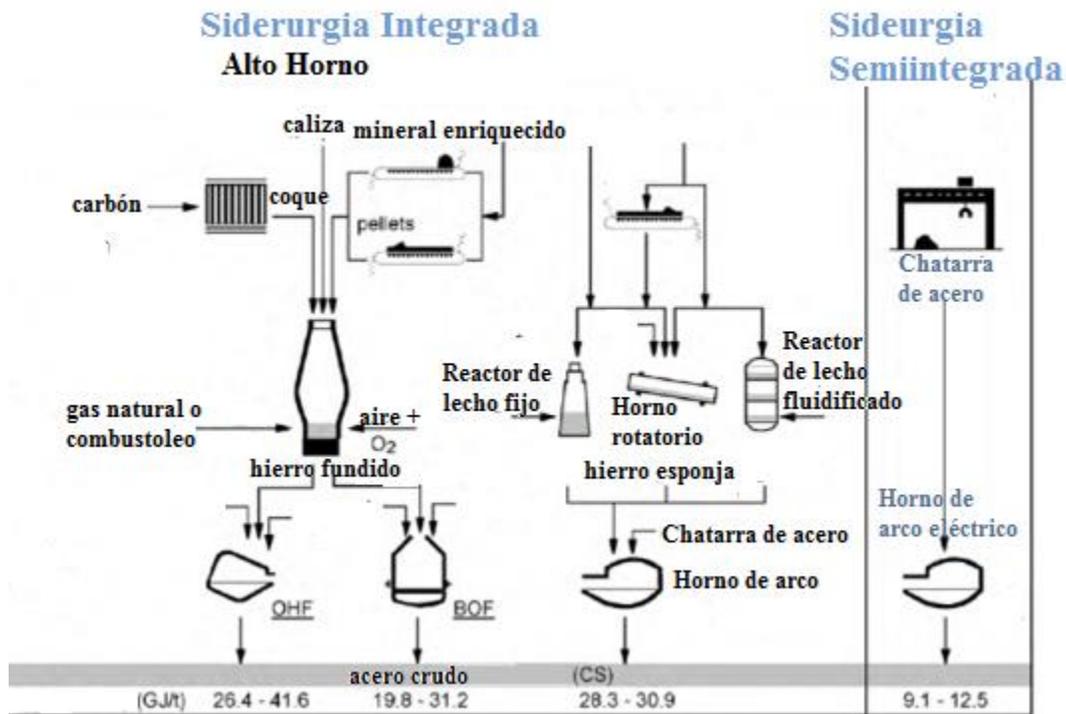


FIGURA 2.29 Consumo de energía [GJ/t] a través de las diferentes vías de producción del acero, a esto habrá que sumar la requerida para el transporte [Worldsteel, 2009]

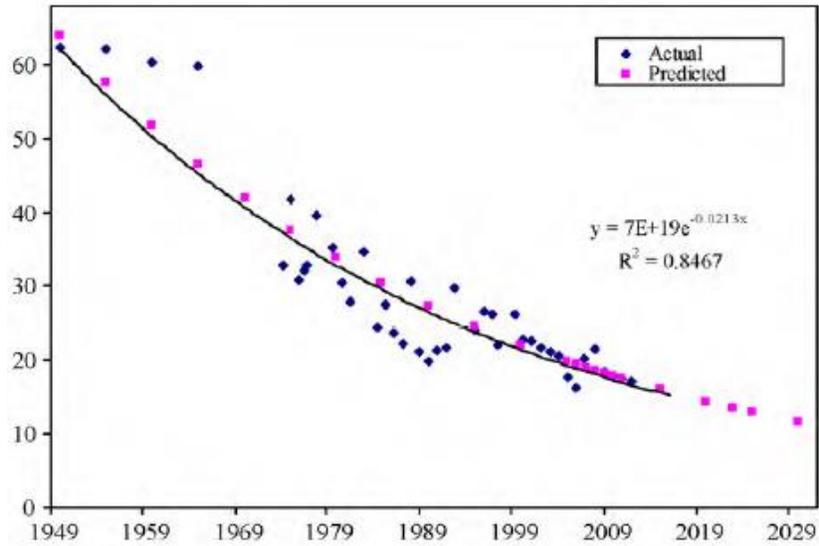


FIGURA 2.30 Consumo de energía estimado para la industria siderúrgica GJ/t

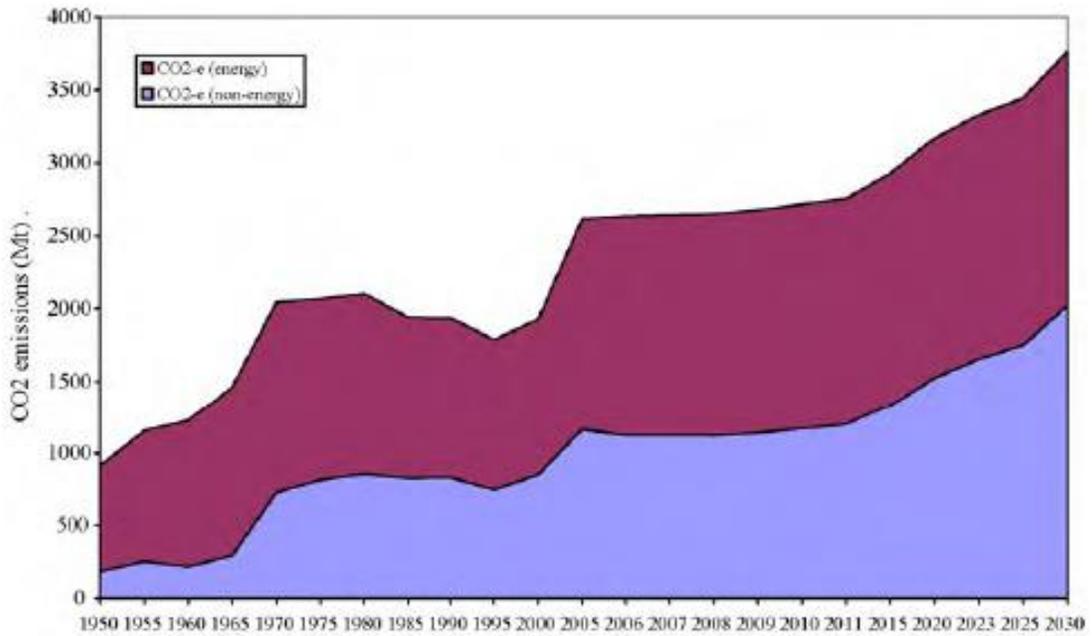


FIGURA 2.31 Producción de CO2 por tonelada de acero producida, se considera el consumo de energía y las reacciones de calcinación y reducción involucradas

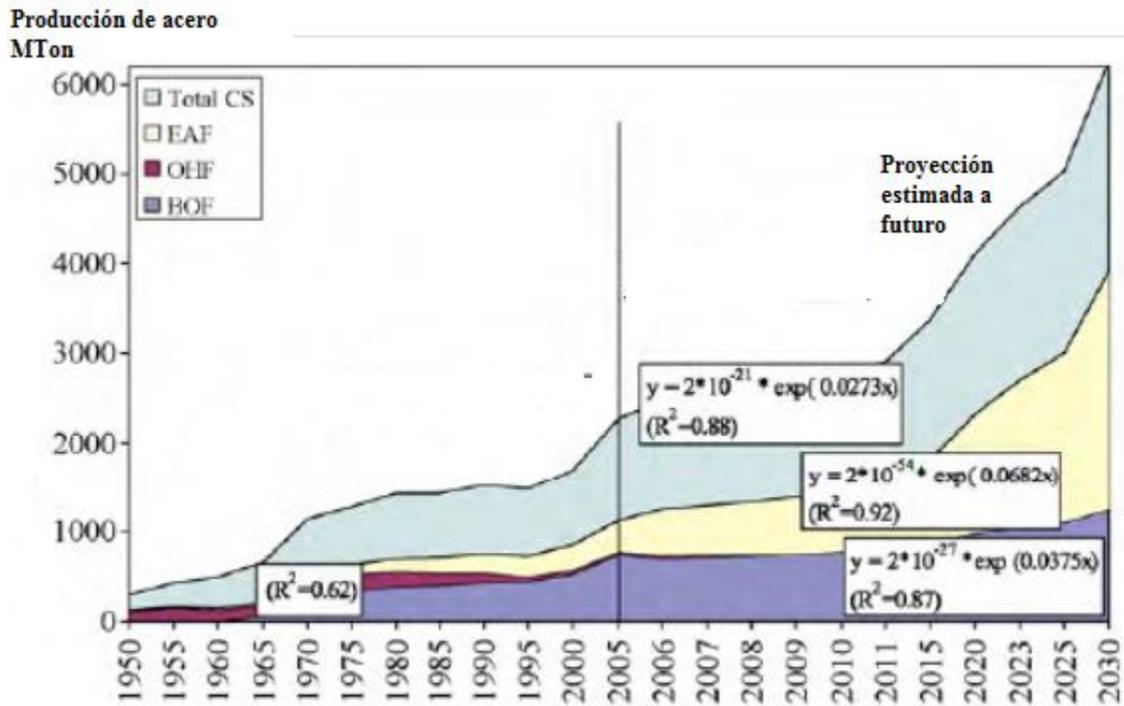


FIGURA 2.32 Producción anual de acero

País	BOF [%]	Horno de arco [%]	Horno de hogar abierto [%]
Australia	82.18	17.79	
Brasil	76.15	22.02	
China	85.56	12.63	
UE	57.86	42.12	
India	48.95	41.80	2.45
Japón	74.35	25.65	
Rusia	61.61	16.33	22.07
Ucrania	49.95	9.83	40.24
EUA	45.00	55.00	
Mundo	64.75	31.54	2.79

FIGURA 2.33 Principales productores de acero en el mundo (2010)

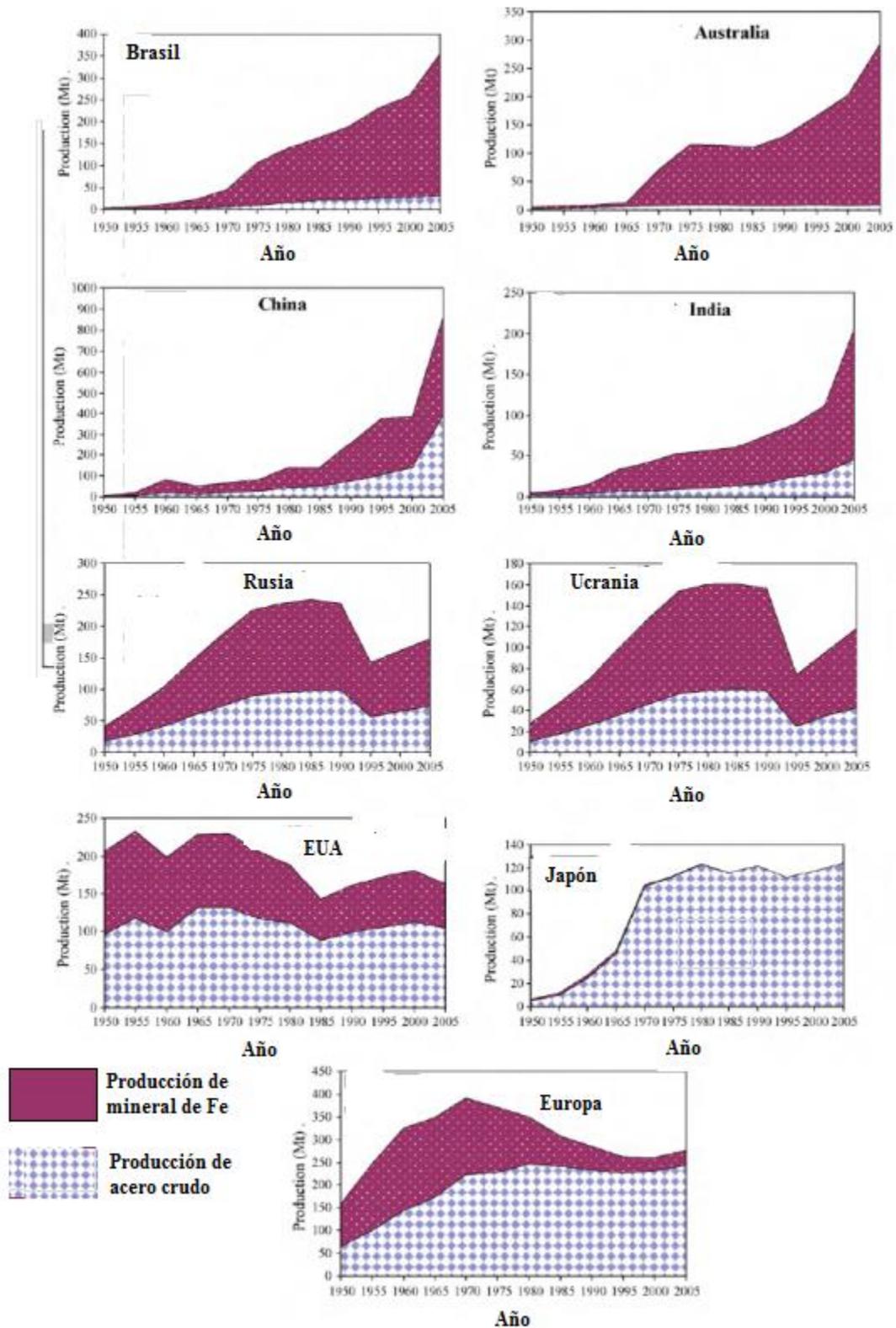


FIGURA 2.34 Producción de mineral y acero crudo de los principales países productores

2.9 LA INDUSTRIA SIDERÚRGICA EN MÉXICO

Es bien sabido que los pueblos mesoamericanos a la llegada de los españoles no habían desarrollado la metalurgia del hierro, sin embargo, desde el primer momento en que Hernán Cortés pone sitio a la gran Tenochtitlan fue necesario tener un abasto de hierro que permitiera fabricar el alambre, los clavos para fabricar los bergantines con los que se proponía poner cerco a la capital de los Aztecas, disponer de las herraduras para los caballos, a la vez de reparar y producir algunas armas. Para esto se utilizó hierro español y se instalaron algunas forjas que permitirían la producción de los elementos antes citados. Durante el virreinato la situación no se modificó en un principio, ya que el hierro que se utilizó en la Nueva España provino fundamentalmente de las minas de Vizcaya, y las forjas y fundiciones estaban a cargo de artesanos ibéricos. Al avanzar el virreinato se permitió que mestizos e indios aprendieran el oficio, desarrollándose un estilo, que a partir del gótico se modificó gradualmente hasta definirse los estilos populares propios de las diferentes regiones (Oaxaca, Zacatecas, Durango, San Luís Potosí y Guanajuato).

En el siglo XIX, se tuvo necesidad de abastecerse con suficiente hierro, debido a las guerras napoleónicas, las cuales habían dado lugar, en la Nueva España, al desarrollo de ferrerías en regiones donde abundaba el mineral de hierro. Lo anterior permitió que en 1805, por instrucciones del Real Seminario de Minería, uno de los grandes maestros del Colegio de Minería, Don Andrés Manuel del Río se dedicara a la instalación de la ferrería de Nuestra Señora de Guadalupe, en Coalcomán, Michoacán; primera en su género en Latinoamérica. En esta, Don Andrés instaló dos hornos [forja catalana], cuyos fuelles eran accionados por energía hidráulica, en los que después de innumerables experimentos obtuvo, el 29 de abril de 1807, la primera colada exitosa. Estas instalaciones surtieron de hierro, cañones, municiones y otros implementos, tanto a las tropas de Hidalgo como a las de Morelos, hasta ser totalmente inutilizadas por los realistas en 1813. Ya en la época independiente, esta y otras ferrerías instaladas a su semejanza emularon el camino inaugurado por la pionera Ferrería de Nuestra Señora de Guadalupe; entre otras, la Ferrería de Piedras Azules en Durango contó ya, para 1857, con un alto horno y hornos bajos de afine o pudelado y, de esta manera, a la par de la demanda y de la inversión de capitales, estas compañías sustituyeron sus instalaciones viejas, como el horno catalán, por tecnologías modernas, como el alto horno. También tuvieron mucha importancia las ferrerías de Tula (en Tapalpa, Jalisco) propiedad de Don Manuel Corcuera,

quien en 1879 las renovó con maquinaria fabricada por la empresa Siemens de Alemania. Estas herrerías fueron las primeras en fabricar, ruedas dentadas, soleras, varillas corrugadas y hierro estirado, para convertirse en proveedoras locales de las empresas ferroviarias.

El umbral de la moderna industria siderúrgica mexicana se remonta a 1900, año en que se crea la primera empresa siderúrgica en México, equipada con la más moderna tecnología de la época [Cía. Fundidora de Monterrey], en Monterrey, Nuevo León. La capacidad instalada de arranque de la planta fue de 100 mil toneladas al año, para lo cual se instaló un alto horno, ya usado, y convertidores Bessemer. En 1942 se crea en Monclova, Coahuila Altos Hornos de México (AHMSA), con una capacidad instalada de 60 mil toneladas al año. Para esta empresa se considera explotar los yacimientos de carbón de Coahuila (región carbonífera Monclova-Piedras Negras y los minerales de hierro ubicados en Chihuahua, principalmente los de la Perla). Por otra parte, a mediados de los años 50 del siglo pasado y por efecto de la guerra de Corea, el costo de la chatarra se elevó a la vez que se escaseó, lo que motivó a la compañía Hojalata y Lámina (HYLSA) de Monterrey en 1957, que producía aceros planos a partir de chatarra, a iniciar un programa de investigación, cuyo resultado fue el proceso de reducción directa del mineral de hierro denominado como Proceso HyL-I, tecnología que si bien no resultaba novedosa, si volvía práctica la producción de acero a partir de prerreducidos o hierro esponja, tecnología que por sus menores costos de inversión inicial resultó muy atractiva a países tercermundistas.

En la zona de la desembocadura del río Balsas, en el estado de Michoacán, se conocía desde antes del siglo XX la existencia del mineral de hierro, por lo que en 1907, la Compañía Minas y Hierros del Pacífico consigue la concesión para explotar los yacimientos de hierro de las Truchas. Dicha concesión es revocada y añadida a la reserva nacional por el presidente Venustiano Carranza, hacia 1918. Para 1961, la empresa alemana Krupp entregó al gobierno federal el proyecto para establecer una siderúrgica que aprovechara los yacimientos de Las Truchas, el cual ya había sido esbozado desde la presidencia de Lázaro Cárdenas, y que debía desarrollarse en paralelo con un nuevo puerto en la zona de Petatlán, estado de Guerrero. Este proyecto estuvo bajo la dirección del General Cárdenas hasta su muerte en 1970. Dada la infraestructura requerida [puerto, siderúrgica, mina, ferroaducto, hidroeléctrica] el proyecto fue de largo plazo, razón por la que el Alto horno realizó su primera colada a fines de 1976. Esta planta

se orientó a la producción de barra de refuerzo (varilla) y alambón. Para 1985 se inauguró la ampliación de la planta Lázaro Cárdenas-Las Truchas II, la cual cuenta con 4 reactores de lecho fluidificado, con capacidad de 500,000 Ton/año cada una (Proceso HyL-III) y una acerería con hornos de arco y planta de colada continua de planchón.

En la década de 1980, la creación de organismos auxiliares con funciones de coordinación, asesoría e investigación dio impulso a este sector, con la participación de la Cámara Nacional de la Industria y el Acero.

El crecimiento económico de fines de los 70 y principios de los 80, se tradujo en una demanda creciente de acero, la cual impulsó el surgimiento y crecimiento de diversas empresas acereras en México (públicas y privadas), esto dio como resultado ampliaciones en instalaciones y nuevos proyectos como la planta de II del proyecto Lázaro Cárdenas las truchas. Dado que el tiempo necesario para desarrollar un proyecto siderúrgico es muy amplio (en ocasiones hasta mayor a una década) lo que ocurrió es que muchas de estas ampliaciones estuvieron listas cuando la demanda ya se había contraído (mediados de la década de los 80), que sumado a la ola de políticas neoliberales que se suscitaron en el mundo en la década de los 80, y esto a su vez agravado por la crisis económica surgida en México en 1982, dieron lugar a que durante los gobiernos de Miguel de la Madrid y Carlos Salinas [1982-1994] se desencadenaron transformaciones importantes en este sector, sobre todo en el periodo 1986-1992. Esto se tradujo en el cierre de Fundidora de Monterrey [1986] y la privatización de Altos Hornos de México y de las Plantas I y II de la Siderúrgica Lázaro Cárdenas. Mucho antes de que ese propósito fuera llevado a la práctica, tanto en SICARTSA (Siderúrgica Lázaro Cárdenas-Las Truchas) como en AHMSA (Altos Hornos de México) se llevaron a efecto procesos de reestructuración tecnológica, organizacional y laboral que buscaron que esas empresas fueran atractivas para el capital privado.

A partir de 1991 y en los siguientes años, se han presentado diversos sucesos que han afectado a este sector, como el cierre temporal de algunas empresas para readecuarse y cumplir con la normatividad ambiental y la suspensión definitiva de otras. En el mencionado año, la privatización de la industria siderúrgica paraestatal constituyó uno de los sucesos más relevantes al pasar a manos privadas, tanto nacionales como extranjeras. Los estudios más recientes sobre Altos Hornos de México, y sobre lo que fuera SICARTSA, han discutido en detalle los resultados que

esos intereses privados obtuvieron una vez que se hicieron cargo de la administración de las empresas¹.

Por otra parte, también grandes empresas privadas como Hojalata y Lámina [HyLSA] pasaron a manos extranjeras al inicio del siglo XXI. En 2005, HyLSA fue comprada por el grupo ítalo-argentino Techint para formar Ternium

De lo ya expuesto, se percibe que el desarrollo de la industria siderúrgica en México estuvo de la mano de la intervención del gobierno federal. Sin embargo, a mediados de la década de los años 80, junto con la recesión económica y el progresivo deterioro y obsolescencia de la industria nacional del acero, se puso en marcha el proceso de reestructuración y modernización productiva de la industria siderúrgica mexicana. El cambio tecnológico en la siderurgia mexicana se ha hecho continuo, por lo que las plantas más importantes operan con tecnología avanzada, lo cual les otorga una ventaja competitiva desde el punto de vista tecnológico. El proceso de modernización de la cadena de producción administrativa y comercial de las empresas siderúrgicas nacionales, ha permitido la mejora en la eficiencia productiva y el avance cada vez más efectivo hacia la elaboración de productos con mayor valor agregado.

Para entender el desarrollo de la industria siderúrgica nacional se tiene que en 1969 se producían 3.5 millones de toneladas de acero (mdt); para inicios de los años ochenta, la producción alcanzó los 10 millones, mientras que para 2011 se produjeron del orden de 18.1, con un consumo estimado de 20 millones, este volumen de producción se ha mantenido con algunas variaciones durante el periodo 2010-2016, teniéndose en este último año un producción del orden de 17.28 millones de toneladas de acero crudo.

La volatilidad en el consumo agravado por las crisis internas ha dado como consecuencia severos retos para la industria del acero en México, la cual no solo ha pretendido reducir los costos de producción, sino también hacer frente al estancamiento de la demanda de productos siderúrgicos, resultado del menor crecimiento de la economía nacional [los años 80, periodo 1995-1996 y 2008-

¹ *Estudios Sociológicos*, El Colegio de México, ISSN (versión impresa): 0185-4186. Reseña de "Las Fuentes del crecimiento en la siderurgia mexicana, innovación, productividad y competitividad" de Alenka Guzmán, pp. 477-479.

2009]. Para ello, se buscó colocar los productos siderúrgicos en el mercado externo con el fin de evitar la disminución de la escala de producción y aumentar la subutilización de su capacidad instalada.

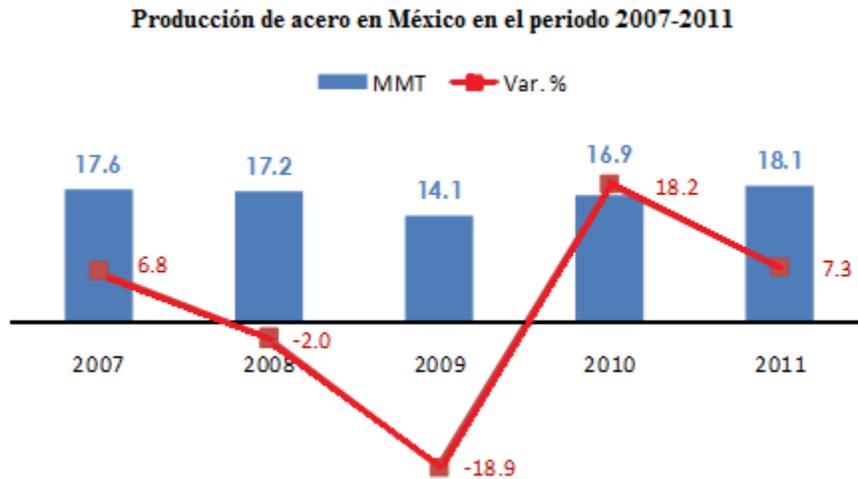


FIGURA 2.35 Producción de acero en México en el periodo 2007-2011 [fuente CANACERO]

El objetivo principal de la reconversión de la industria siderúrgica en México tuvo como finalidad reducir los costos de producción, mejorar la calidad de los productos para elevar su competitividad en el mercado internacional e incrementar su participación en las exportaciones, así como añadir valor agregado. Los resultados de la reconversión tienen dos vertientes: la primera de forma directa busca aumentar las exportaciones siderúrgicas y la otra, indirecta, busca producir acero barato y de calidad para abastecer a las industrias nacionales que lo utilizan como insumo y a quienes lo producen para la exportación. Con el aumento considerable de las exportaciones de algunas ramas de la industria manufacturera, se observa que esta vertiente es la que está adquiriendo mayor importancia.

La industria siderúrgica en México al inicio del siglo XXI

En 2011, México se ubicó como el productor de acero número 13 del mundo, con un total de 18.1 millones de toneladas, lo que representó el 1.2% del total de la producción mundial.

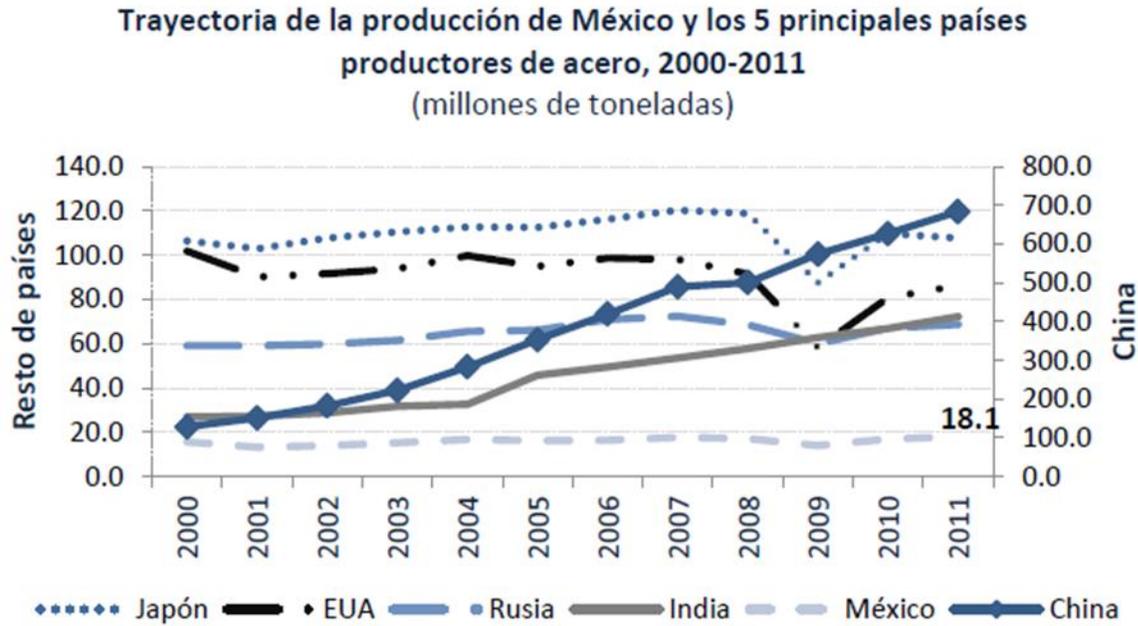


FIGURA 2.36 Producción de acero en México en comparación con los principales productores en el mundo [Fuente World Steel Association]

Principales productores en México

El mercado mexicano se encuentra dominado por 5 empresas: Arcelormittal [Sicartsa II], AHMSA [grupo acerero del norte], Ternium México [HyLSA], DeAcero y TAMSA, que en conjunto concentran el 85% de la producción nacional de acero, las cuales han mantenido una participación estable en la producción de acero. El 15% restante de la producción nacional de acero lo realizan otras acerías [productores semiintegrados] como ICH, Grupo San Luis, Aceros Corsa y Grupo SIMEC, entre otras.

Cabe resaltar que Arcelor Mittal perdió seis puntos porcentuales de 2007 a 2010, al pasar de 29.5 a 24%, mientras que sus competidoras AHMSA, Ternium México, DeAcero y Tamsa, mejoraron su posición aumentando en 2 puntos porcentuales al pasar de 20.2 a 21.7%, 18.3 a 19.8%, 12.1 a 14% y 4.6 a 5.1%, respectivamente. El resto de las acerías, en conjunto, no tuvo modificaciones.

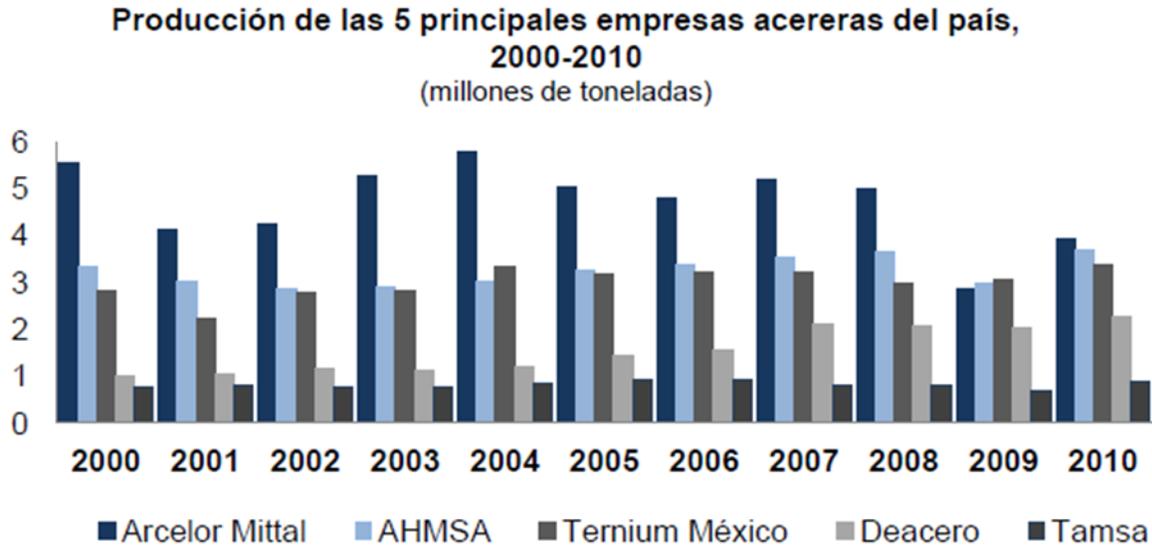


FIGURA 2.37 Comportamiento de las principales empresas siderúrgicas en México [datos CANACERO]

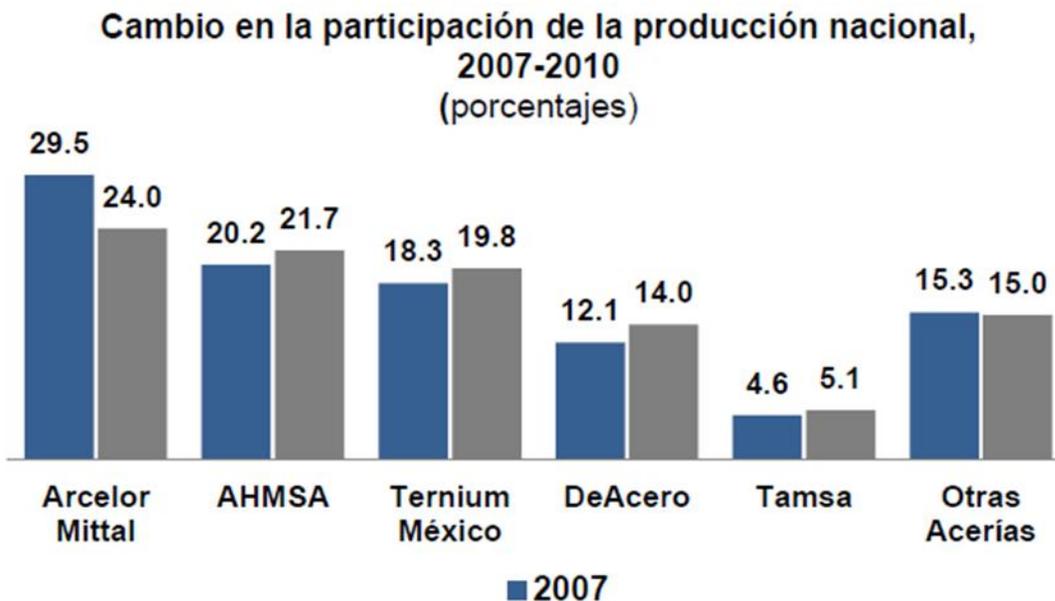


FIGURA 2.38 Comportamiento 2007-2010 en cuanto a la participación en la producción nacional de las principales empresas instaladas en México [fuente CANACERO]

De acuerdo con los datos de CANACERO, en el periodo 2010-2015 se invirtieron del orden de 13 mil millones de dólares, por parte de las empresas ya instaladas en México.

Dentro de las inversiones a realizar destacan los siguientes proyectos:

- Grupo *Deacero* tiene un proyecto en Ramos Arizpe, Coahuila (inversión de 700 mdd en la construcción de una nueva planta de acería).
- *Altos Hornos de México* (AHMSA) arrancó operaciones del alto horno 6 (abril del 2011) como parte del proyecto Fénix, un programa destinado a maximizar la eficiencia del proceso productivo. A inicios del año 2013, comenzaron a entrar paulatinamente en operación las nuevas unidades, que incrementarán significativamente la competitividad de AHMSA, con una capacidad instalada de 5.5 millones de toneladas de acero líquido y productos de mayor valor agregado. Después de un primer mantenimiento mayor al alto horno en 2015, para octubre de 2016 ya se ha alcanzado una producción diaria de 5236 tde arrabio/día.
- *TenarisTamsa* recientemente abrió las puertas de su nueva planta: una línea de tuberías en Veracruz.
- *Ternium* anunció en 2011 que trabaja con *Nippon Steel* en un proyecto de coinversión para instalar una planta de galvanizado para la industria automotriz.
- *ArcelorMittal* inyectará capital en sus plantas que ya tiene en territorio nacional.
- *Gerdau-Corsa* construyó una nueva acería para producir perfiles pesados para la industria de la construcción en el estado de Hidalgo, la cual entró en operación a finales de 2015.

Retos de la industria siderúrgica instalada en México

Reducción de costos. La situación energética en México complica sobremanera esta meta ya que el costo del gas natural es mayor que en otros países, lo mismo sucede con la energía eléctrica. En este caso, la producción de aceros en horno eléctrico por parte de toda la industria semiintegrada, así como por aquellas plantas que cuentan con procesos de reducción directa [Ternium, Tenaris Tamsa, Arcelor Mittal], dan como resultado que más del 50% de la producción de acero en México se procese en dicho tipo de hornos, lo cual, de acuerdo con la limitada capacidad de suministro por parte de CFE, así como las elevadas tarifas industriales dan como resultado la falta de competitividad de la industria.

Si bien en México existen reservas de carbones minerales, la mayoría de estos son no coquizables, lo cual afecta a las empresas que cuentan con alto horno [AHMSA-GAN], por el costo para la explotación de mineral y escasez de yacimientos de calidad. El carbón mexicano es de baja calidad; su poder calorífico apenas llega a las 5000 kcal/kg.

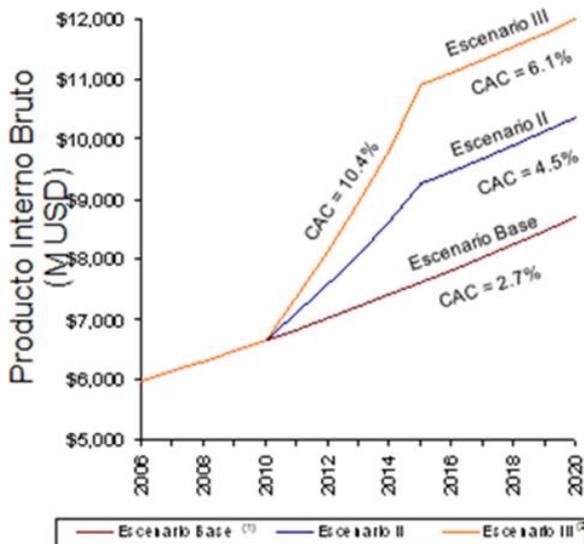
Dada la dificultad de competir por precio, la industria siderúrgica instalada en México requiere producir aceros de mayor calidad, como los utilizados por la industria automotriz, aceros al silicio (demandados por la industria eléctrica) y, en general, productos con mayor valor agregado.

La industria siderúrgica nacional debe enfocarse en producir el volumen de acero demandado por el mercado, y en generar una balanza positiva entre importaciones - exportaciones, considerando no solo lo referente a la producción de los aceros, sino a los insumos requeridos en todo el proceso.

Como meta, se plantea que la industria siderúrgica mexicana duplique su PIB de 6 MM USD al 2006, a 12 MM USD para el 2020

ESTIMADOS

Evolución del PIB de la Industria siderúrgica en 3 escenarios diferentes



Impacto en la economía para los diferentes escenarios

	PIB (M USD)	Volumen de prod. acero (MMTon)	Valor de prod. acero (M USD)	PIB/Ton (USD/Ton)
Escenario III al 2020	\$12,000	32.0	\$23,800 ⁽⁴⁾	\$375
Escenario II al 2020	\$10,335	29.0	\$21,250	\$356
Escenario base (sin cambios) al 2020	\$8,700	26.0	\$18,700	\$335
Situación al 2006	\$6,000	17.8	\$12,800 ⁽³⁾	\$337

Nota: (1) El escenario base se obtuvo proyectando el PIB siderúrgico a partir del PIB nacional; resultando una elasticidad entre el PIB nacional y el siderúrgico de 0.74
 (2) El crecimiento en el escenario III se basa en la visión de aspiración del sector siderúrgico mexicano de duplicar el PIB en 10 años a partir del 2010.
 (3) Para la situación actual se considera un precio promedio de 719USD/Ton
 (4) Para el escenario III, se consideró un precio promedio de 744 USD/Ton
 Fuente: Análisis de A.T. Kearney

FIGURA 2.39 Escenarios año 2020 para la industria siderúrgica instalada en México

CAPÍTULO 3

MÉTODOS DE FUNDICIÓN O COLADA

3.1 CONCEPTOS GENERALES

En el proceso de fundición, el metal fundido fluye por gravedad u otra fuerza dentro de un molde, donde se solidifica y toma la forma de la cavidad del molde (figura 3.1). El término **fundición** se aplica también a la parte resultante de este proceso. Es uno de los procesos más antiguos de formado de metales que se remonta 6 mil años atrás. El principio de la fundición es simple: se funde el metal, se vacía en un molde y se deja enfriar.

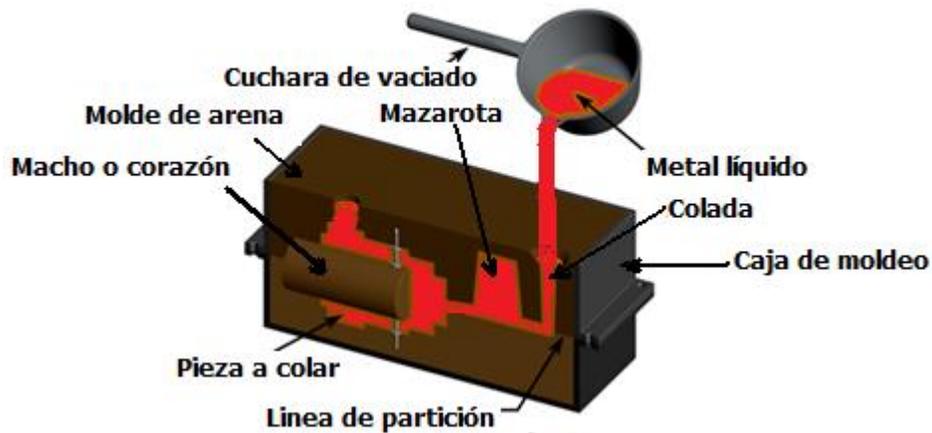


FIGURA 3.1 Descripción esquemática del proceso de colada

La fundición incluye la producción de lingotes y la fundición de piezas de forma particular. El término **lingote** se asocia usualmente con las industrias de metales primarios; describe la producción de una pieza, generalmente grande de forma simple, diseñada para volver a formarse en procesos subsiguientes como laminado o forjado. La producción de piezas de geometría

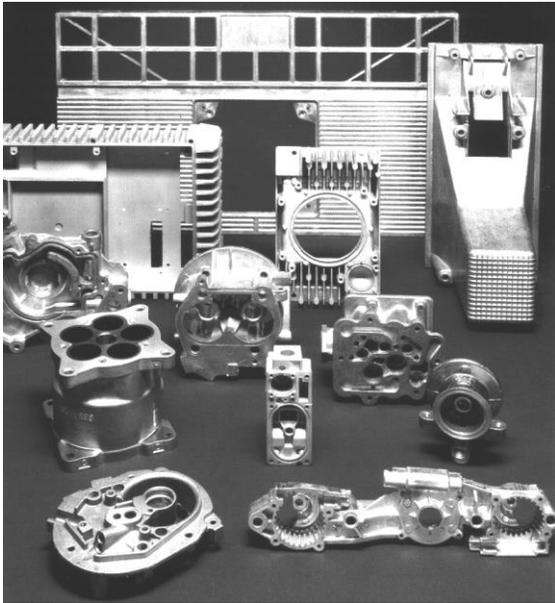
compleja involucra la producción de elementos que solo serán modificados en su geometría y dimensiones, mediante procesos con arranque de viruta.

Existen diversos métodos utilizados en la producción de piezas de geometría irregular, lo cual hace de este proceso uno de los más versátiles en manufactura. Sus posibilidades y **ventajas** son las siguientes:

- La fundición se puede usar para crear partes de geometría compleja (figura 3.2)
- Algunos procesos de fundición pueden producir partes de forma neta que no requieren operaciones subsecuentes para llenar los requisitos geométricos y dimensionales de la pieza.
- Se puede usar la fundición para producir partes muy grandes. Se han fabricado piezas fundidas que pesan más de 100 toneladas (figura 3.3).
- El proceso de fundición puede realizarse en cualquier metal o aleación que pueda calentarse y pasar al estado líquido. En este caso, el proceso está limitado a materiales con temperaturas de fusión menores a los 1750 °C, por lo que los metales refractarios no son procesados mediante estas técnicas.
- La factibilidad de aproximarse a la geometría y dimensiones finales vuelve a los procesos de fundición una opción muy económica en el caso de que el diseño conlleve a una geometría irregular.

No obstante, también hay **desventajas** asociadas con la fundición y sus diferentes métodos. Estas incluyen la porosidad y las propiedades mecánicas inherentes al proceso de solidificación y enfriamiento.

Las piezas de fundición fluctúan en **tamaño**, desde pequeños componentes que pesan solamente unos cuantos gramos hasta grandes productos de más de 100 toneladas. La lista incluye coronas dentales, joyería, estatuas, estufas de hierro fundido, bloques y cabezas para motores automotrices, bases para máquinas, ruedas para ferrocarril, utensilios de cocina, carcasas para bombas. Se pueden fundir casi todas las variedades de metales ferrosos y no ferrosos.



(a)



(b)



(c)

FIGURA 3.2 Algunos ejemplos de piezas obtenidas por fundición. **(a)** Piezas de aleaciones de aluminio. **(b)** Piezas de hierro gris. **(c)** Piezas de acero inoxidable



FIGURA 3.3 Por fundición se pueden producir piezas de decenas de toneladas

Para llevar a cabo un proceso de fundición se requiere del metal líquido y el molde o matriz en que se depositará el metal (figura 3.4). Es por consecuencia que al analizar el proceso es necesario referirse al molde o matriz, sus materiales, duración y su producción; al metal líquido y a las técnicas de fusión utilizadas, tipo de hornos y mecanismos de preparación y desgasificación.

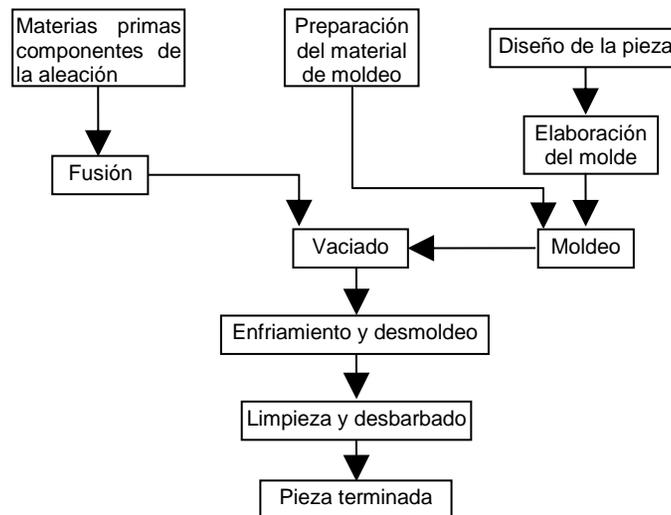


FIGURA 3.4 Etapas principales del proceso de fundición

Tipos de molde

La cavidad en donde se deposita el metal recibe el nombre de molde o matriz y está en función de su duración. Si solo permitirá un vaciado y posteriormente se destruye se denomina como molde, mientras que el término matriz corresponde con aquel molde que permite más de una operación de vaciado. Si la duración de la matriz es de unas cuantas operaciones se considera como semipermanente, mientras que si su duración es mayor a las 1000 operaciones de vaciado se denomina como permanente.

En el caso de colada en molde desechable, el proceso de fundición se inicia con la producción de un molde, para lo cual se requiere de un modelo de la forma y dimensiones de la pieza a producir. Usualmente el molde contiene una o varias cavidades cuya forma geométrica determina la forma de la parte a fundir. La cavidad debe ser ligeramente sobredimensionada, esto permitirá compensar la contracción del metal durante la solidificación y enfriamiento; asimismo, se deberán considerar sobre-espesores para el maquinado de aquellas superficies que así lo demanden. Los moldes se producen de varios materiales que incluyen arena, yeso y cerámica. Los procesos de fundición se clasifican frecuentemente de acuerdo con los diferentes tipos de moldes.

El modelo es la pieza que se pretende reproducir, pero con algunas modificaciones derivadas de la naturaleza del proceso de fundición:

Debe ser ligeramente más grande que la pieza final, ya que se debe tener en cuenta la contracción de la misma una vez se haya enfriado a temperatura ambiente. El porcentaje de contracción estará asociado con el material a vaciar en el molde. Como ya ha sido mencionado, a esta dimensión se debe dar una sobre medida en los casos en el que se dé un proceso adicional de maquinado o acabado por arranque de viruta.

Las superficies del modelo deberán respetar unos ángulos mínimos con la dirección de desmoldeo (la dirección en la que se extraerá el modelo), con objeto de no dañar el molde de arena durante su extracción. Este ángulo se denomina *ángulo de salida*, que generalmente es del orden de 0.5° a 2° . En el caso de que el modelo se extraiga de la cavidad en forma líquida (fundición a la cera perdida) o gaseosa (lost foam casting o colada sin cavidad) no se requerirá de ángulos de salida.

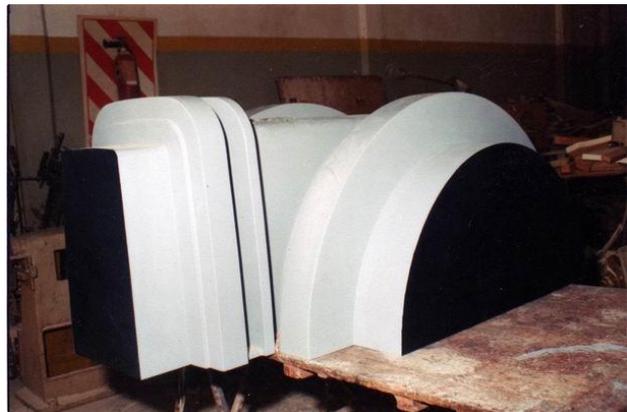
Para permitir que el metal llene la cavidad del molde será necesario contar con canales de alimentación (coladas) y elementos que garanticen que la solidificación termina en zonas externas a la pieza (mazarotas). Asimismo, el molde contendrá cavidades para la colocación de los machos o corazones (los cuales permiten generar cavidades complejas en la pieza fundida).

Producción del modelo

Los modelos deben de ser resistentes a la compresión, humedad o temperatura (esto de acuerdo con el proceso de moldeo seleccionado) (figura 3.5), en ocasiones pueden servir para la producción de una sola pieza (modelos desechables) como es el caso de las técnicas de colada sin cavidad (lost foam casting) o a la cera perdida (precisión casting); en los que son producidos de poliestireno expandido o una mezcla de parafina con polietileno, respectivamente. Lo más usual es que el modelo sirva para varias operaciones de moldeo; en este caso, se pueden emplear desde madera o plásticos como el uretano, hasta metales como el aluminio o el hierro fundido.



(a)

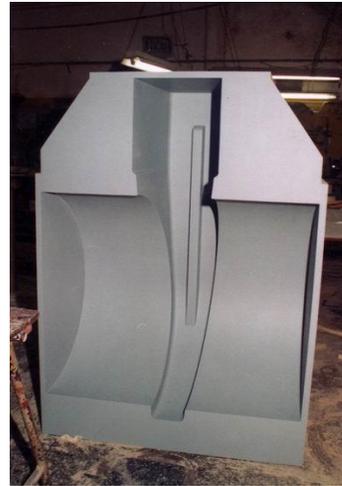


(b)

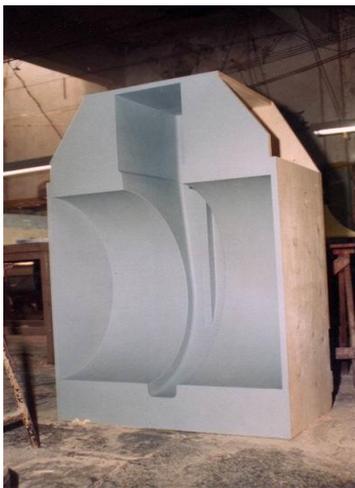
FIGURA 3.5 Modelos para fundición: (a) Impulsor, (b) Válvula de compuerta de 36"



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)

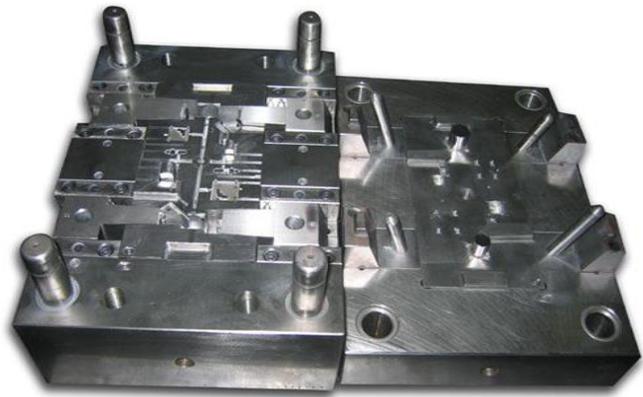
FIGURA 3.5 Modelos para fundición: (c) Válvula de compuerta de 36", (d, e) Caja de machos o corazón para la válvula de exclusiva, (f) Modelo de espuma de poliestireno para un block de motor de 4 cilindros, (g) Placa modelo para proceso Shell, (h) Modelo de aluminio para rotor

Usualmente se fabrican dos semimodelos correspondientes a sendas partes del molde que es necesario fabricar.

Existen métodos de fundición en los que el molde es permanente (figura 3.6), en este caso se denomina matriz, por ejemplo en los procesos de fundición a presión (pressure casting), colada por gravedad en matriz (die casting) y colada a baja presión (low pressure die casting). En el caso de que los moldes sean desechables (arena, cáscara cerámica o yeso), normalmente el llenado será por acción de la gravedad.



(a)

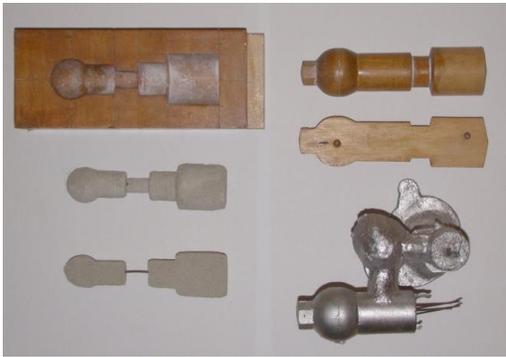


(b)

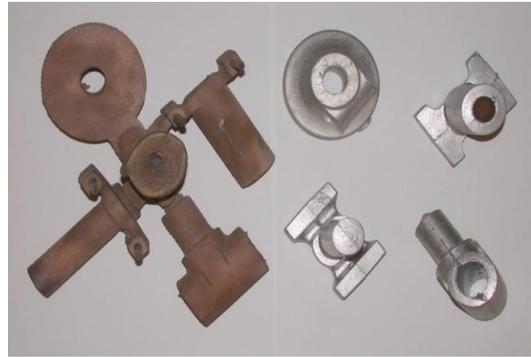
FIGURA 3.6 Matrices: (a) Colada por gravedad. (b) Inyección

En general, los procesos de fundición con molde no permanente requieren en primera instancia de la generación del molde, el cual consiste de:

- a. Compactación de la arena alrededor del modelo. Operación que puede ser manual o mecánica (generalmente por medios automáticos mediante sistemas neumáticos).
- b. Si la pieza que se quiere fabricar es hueca, será necesario disponer machos o corazones que eviten que el metal fundido rellene dichas cavidades. Para la fabricación del corazón se emplean técnicas (cáscara, caja caliente, CO₂) de aglomerado que garanticen una mayor resistencia (dadas las dimensiones de estos), una vez formados y endurecidos se procederá a su colocación, para el posterior cerrado del molde.



(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURA 3.7 (a) Modelo, corazón de arena y la pieza ya vaciada todavía con sistema de alimentación. (b) Conjunto ya vaciado y diversas piezas una vez retiradas de la colada. (c) Molde de arena con las piezas que se obtienen de este. (d) Cabeza de un motor diésel

Terminado el molde e instalados los machos (corazones), se produce el colado del metal líquido para que una vez que este se ha solidificado y enfriado hasta una temperatura en que se pueda manipular sin mayor inconveniente, se proceda al desmoldeo, limpieza y corte de coladas y mazarotas. La etapa de enfriamiento y solidificación es crítica en todo el proceso, ya que un enfriamiento excesivamente rápido puede provocar tensiones mecánicas en la pieza, e incluso la aparición de grietas, mientras que si es demasiado lento disminuye la productividad. El desmoldeo implica la destrucción del molde y la extracción de la pieza. En el desmoldeo también debe retirarse la arena del macho. Toda esta arena es comúnmente reciclada (esto dependerá de la técnica de aglomerado utilizada) para la producción de nuevos moldes. El desbarbado consiste en la eliminación de los conductos de alimentación, mazarota y rebabas

procedentes de la línea de partición y de las regiones de acoplamiento de los corazones. Durante el acabado y limpieza se eliminan los restos de arena adheridos. Posteriormente, la pieza puede ser maquinada o sufrir algún tipo de tratamiento térmico que garantice las propiedades requeridas.

Métodos de moldeo más comunes

Moldeo en arena en verde. Consiste en la elaboración del molde (figura 3.8) con arena y arcillas, tal como la bentonita, las cuales se activan por la presencia de humedad. Es el método más empleado y económico ya que puede ser utilizado para casi cualquier metal o aleación sin importar mayormente las dimensiones de las piezas. No se emplea en el caso de piezas muy grandes o de geometrías complejas, ni cuando se requiera de buenos acabados superficiales o tolerancias reducidas.



FIGURA 3.8 (a) Vaciado de aluminio en moldes de arena en verde. (b) Compactado de la arena alrededor del modelo

Procesos CO₂, con resinas autofraguantes y de resinas con caja caliente. En estos casos, se adiciona a la arena seca un aglomerante tal como el silicato de sodio Na₂SiO₃ o resinas de origen orgánico, todos los cuales se caracterizan, después de su fraguado o endurecimiento, por la obtención de moldes o machos con una elevada resistencia mecánica, lo que permite fundir piezas de mayor tamaño y mejor acabado superficial.

Moldeo en arena seca. En este tipo de proceso antes de la colada, el molde se seca. De este modo se incrementa su rigidez, lo que permite fundir piezas de mayor tamaño, sin inconvenientes debidos a la presencia de humedad durante el vaciado (en este caso se emplean arcillas como la bentonita sódica).

Moldeo en cáscara (Shell molding). En ocasiones se utilizan mezclas secas de arena con resinas fenólicas, que se polimerizan (se enduren) a temperaturas entre 200 y 300 °C incrementando sensiblemente su rigidez, lo cual permite la producción de moldes (cáscaras) que solamente conllevan el contorno de la pieza, y facilitan la producción de piezas pequeñas y medianas con una alta precisión y un excelente acabado (figura 3.9).

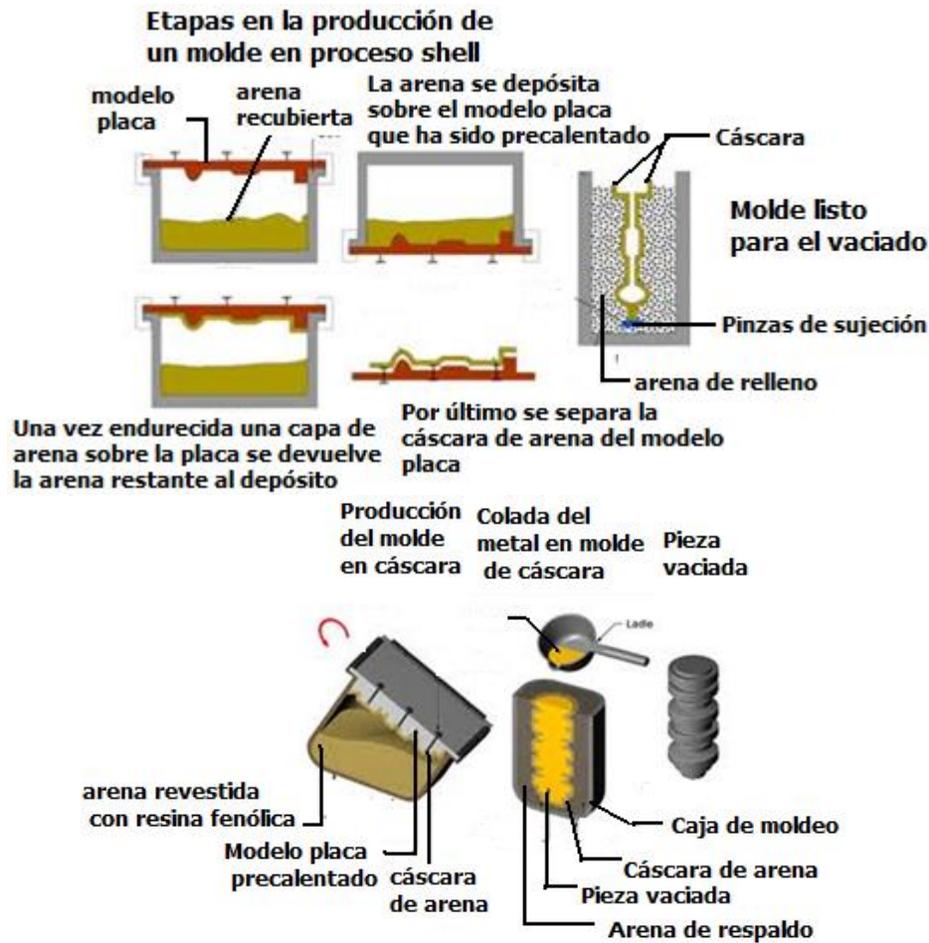


FIGURA 3.9 (a) Moldeo en cáscara (Shell)

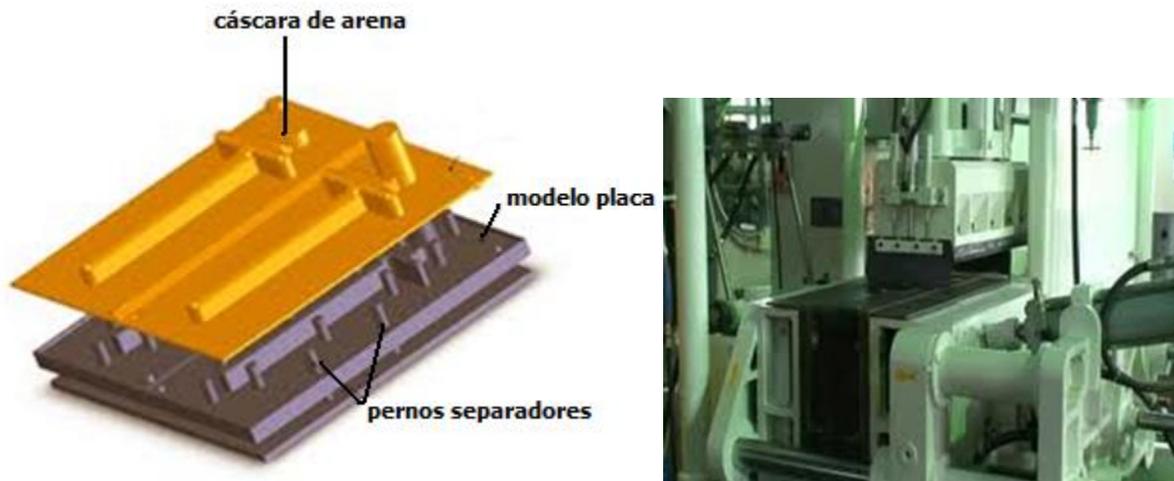


FIGURA 3.9 (b) Moldeo en cáscara (Shell)

El empleo de yeso de ceramista (*plaster mold casting*) (figura 3.10) es usual en aplicaciones odontológicas o artísticas y emplea para tal fin procesos a la cera perdida (*lost wax casting*) o microfundición. En este caso, el modelo se fabrica en cera o plástico. Una vez que se ha completado el molde, se calienta para endurecer el recubrimiento y derretir la cera o el plástico para extraerla del molde en el que se verterá posteriormente el metal fundido. Este método tiene dos ventajas principales, la ausencia de machos y de líneas de partición, con lo que se logran fieles reproducciones del modelo original sin defectos superficiales (líneas de junta y rebabas), todo esto aunado a una excelente precisión. Para estos métodos también se emplean cáscaras cerámicas, denominándose en este caso como fundición de alta precisión (*investment casting*). Estos procesos se destinan sobre todo a la producción de piezas pequeñas y medianas en metales ferrosos o de alto punto de fusión con orientación industrial. En estos casos, el modelo se recubre de una serie de capas (formando una cáscara cerámica), que garanticen un buen acabado superficial y rigidez al conjunto.

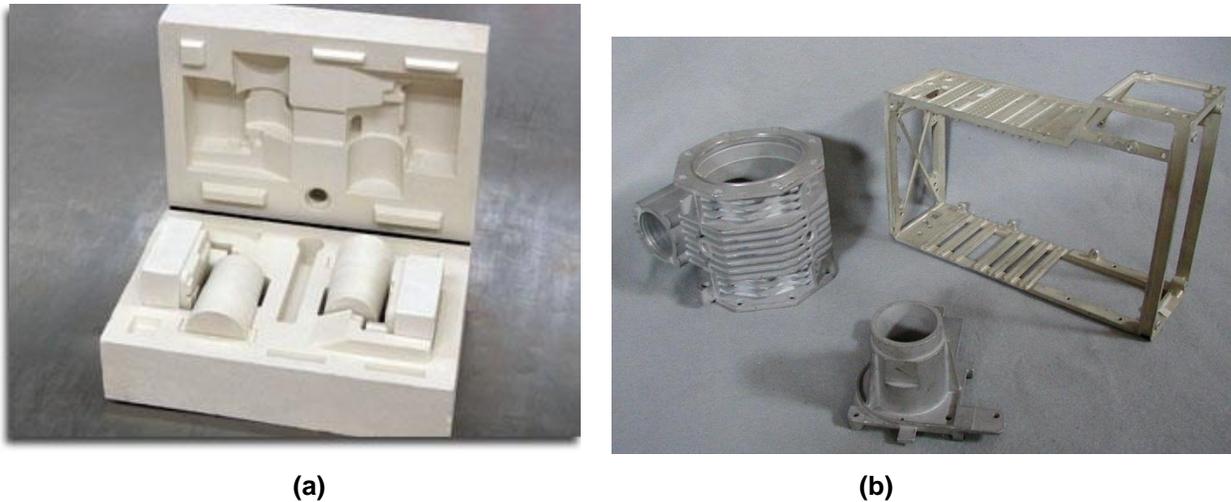


FIGURA 3.10 (a) Molde en yeso ya terminado. (b) Piezas en aluminio producidas por este método

La **colada en matriz o fundición en coquilla** (figura 3.11), se caracteriza por el empleo de moldes metálicos (matrices) producidos en hierro gris o acero. Este tipo de proceso se emplea para lotes grandes de producción de piezas medianas cuya geometría permite su llenado por acción exclusiva de las fuerzas de gravedad (por ejemplo pistones automotrices).

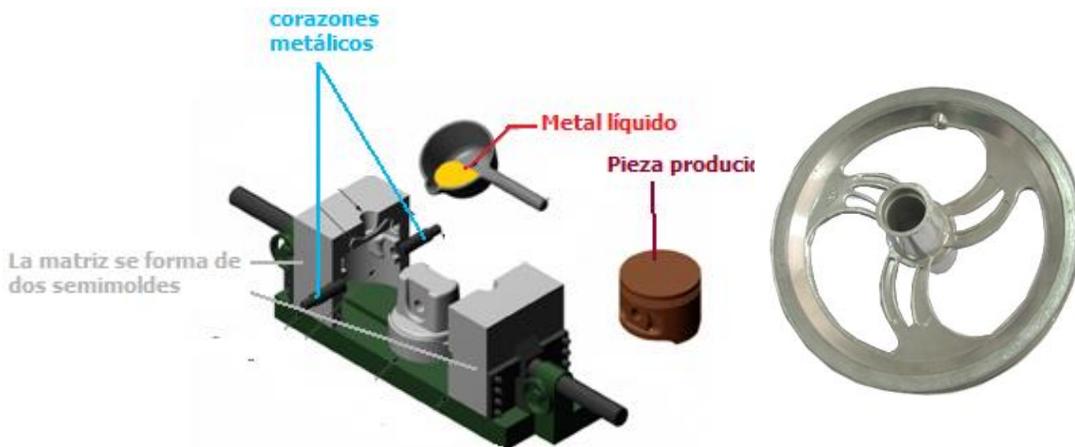


FIGURA 3.11 Colada en matriz

La **fundición a presión o inyección de metales** (figura 3.12) se emplea para piezas medianas y pequeñas (desde unos gramos hasta unos 50 kg) en metales y aleaciones de bajo punto de fusión (generalmente menor a 650 °C; aleaciones de aluminio y de zinc), de geometrías

complejas y espesores pequeños (del orden de unos cuantos mm), en lotes de producción muy grandes (mínimo del orden de unas 10,000 piezas). Se caracteriza por su reducido costo de operación, aunado a excelentes acabados y tolerancias cerradas.

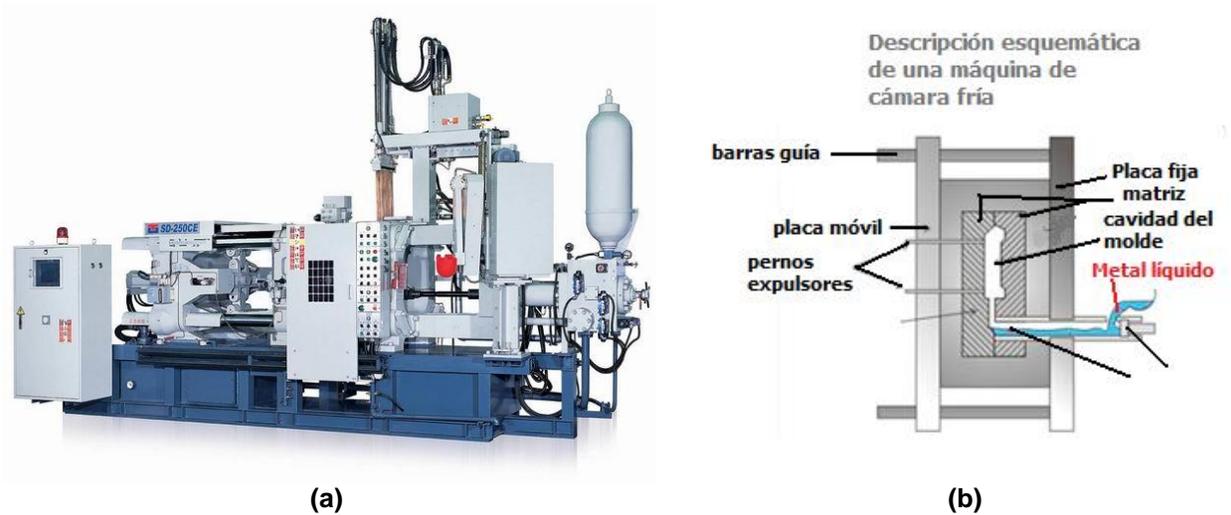


FIGURA 3.12 (a) Máquina para inyección de metales (b) Descripción esquemática del proceso

La técnica de **fundición prensada (squeeze casting)** fue desarrollada ya en la segunda mitad del siglo XX (hacia 1960) e involucra la solidificación del metal bajo alta presión; con esto se pretende combinar la forja con la colada, afinar la microestructura y obtener mejores propiedades mecánicas.

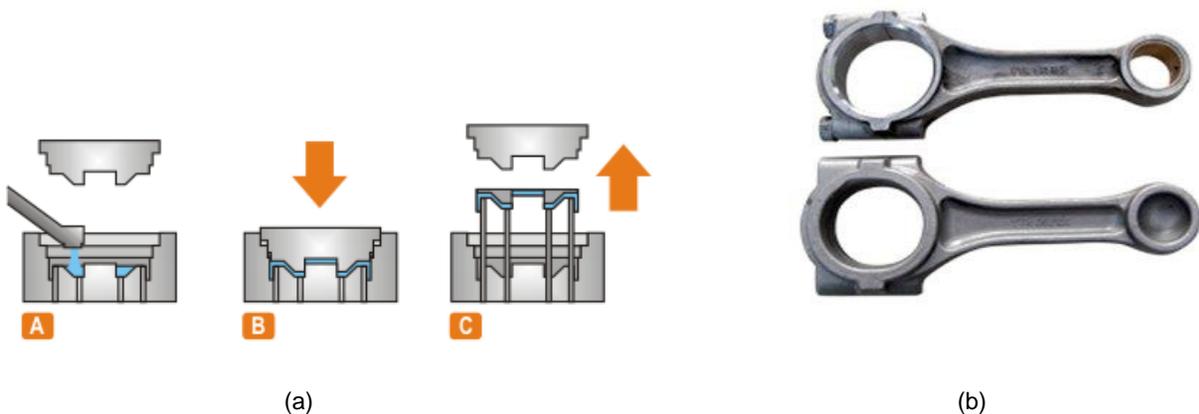


FIGURA 3.13 (a) Descripción esquemática del proceso de fundición prensada (b) Ejemplo de piezas producidas por squeeze casting

Fundición a baja presión (low pressure casting). En este caso, se emplean moldes de grafito o también matrices metálicas. El proceso se caracteriza en que el llenado es en flujo laminar por la parte inferior del molde (figura 3.14), la presión necesaria para que el metal ascienda y llene el molde se aplica a través de un gas inerte. El molde, colocado encima del recipiente con el metal líquido, cuenta con un sistema de enfriamiento que garantiza la transferencia de calor que permita la solidificación secuencial, iniciando en la parte superior y dirigida hacia abajo de tal forma que una vez totalmente solidificada la pieza, se elimina la presión descendiendo el metal líquido de nueva cuenta al crisol. Con esto se garantiza la eliminación de defectos producto de la solidificación, a la vez de eliminar los costos asociados a la presencia de coladas y mazarotas. La microestructura obtenida garantiza excelentes propiedades mecánicas. Este proceso se puede emplear tanto para los blocks de motor como para las ruedas.

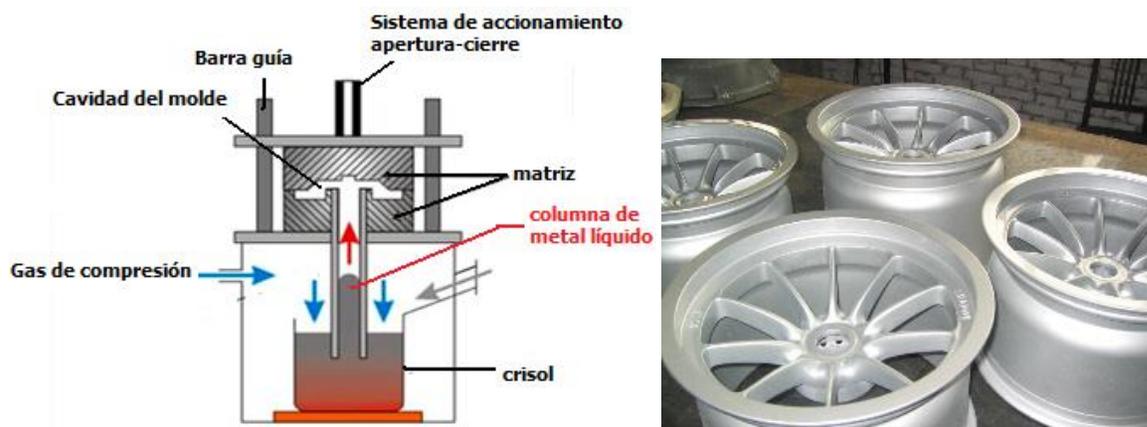


FIGURA 3.14 Fundición a baja presión (*low pressure casting*) y ejemplo de aplicación del proceso (ruedas de aleación de aluminio)

Las operaciones de **centrifugado y semicentrifugado** (figura 3.15) se caracterizan por llevar a efecto el llenado del molde por la acción de las fuerzas generadas por la rotación de este. Estos métodos permiten la obtención de piezas sanas (eliminación de defectos) y la disminución o, en su caso, la eliminación de conductos de llenado y mazarotas.

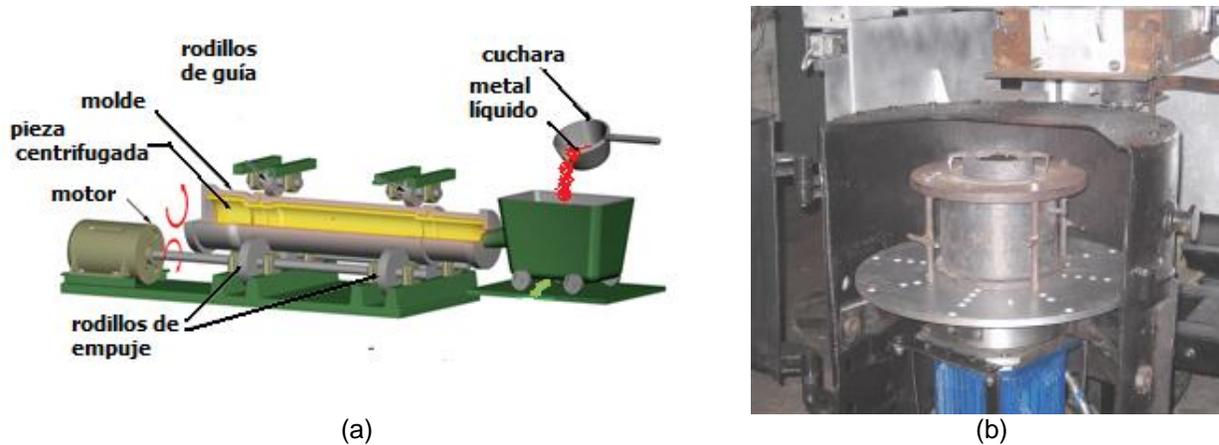


FIGURA 3.15 Centrifugado. **(a)** Descripción esquemática para centrifugado en eje horizontal. **(b)** Máquina para centrifugado vertical

Como ya ha sido mencionado, en el proceso de fundición se calienta primero el metal a una temperatura lo suficientemente alta para transformarlo completamente al estado líquido, después se vierte directamente en la cavidad del molde. En un molde abierto, el metal líquido se vacía simplemente hasta llenar la cavidad (producción de contrapesos). En un molde cerrado, una vía de paso llamada sistema de vaciado o colada permite el flujo del material fundido desde fuera del molde hasta la cavidad. Es por demás evidente que el empleo de molde cerrado es la forma más importante de producción en operaciones de fundición.

Tan pronto como el material fundido empieza a enfriarse en el molde, y conforme desciende la temperatura lo suficiente, empieza la solidificación que involucra un cambio de fase del metal. Se requiere tiempo para completar este cambio de fase, porque es necesario disipar una considerable cantidad de calor. Durante este proceso, el metal adopta la forma de la cavidad del molde y se establecen muchas de las propiedades y características de la fundición.

3.2 MOLDEO EN ARENA

La fundición en arena es, con mucho, el proceso de moldeo más importante. Para describir las características básicas del molde se usará un molde para fundición en arena. Muchas de estas características y términos se aplican también a los modelos de otros procesos de fundición. El molde consiste en dos mitades: la tapa o semicaja o semimolde superior y la semicaja o

semimolde inferior. Ambas están contenidas en la caja de moldeo, que también se divide en dos partes: una para cada parte del molde; las dos mitades del molde están separadas por el plano de separación (figuras 3.10, 3.12, 3.13 y 3.16).

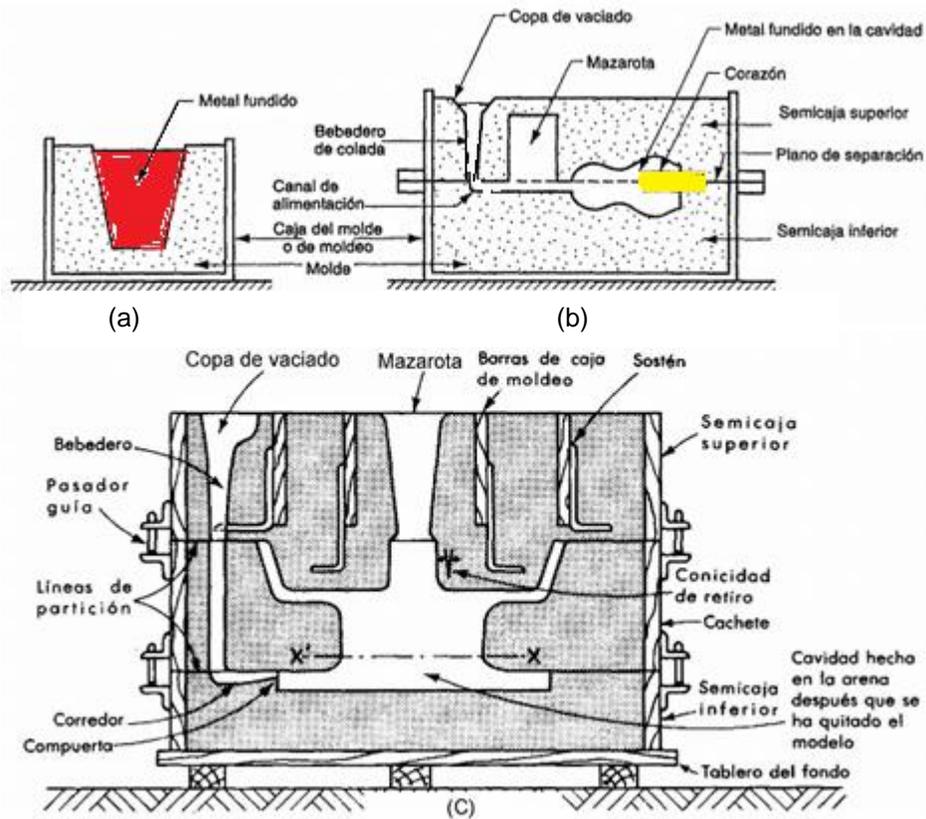


FIGURA 3.16 Molde de fundición en arena. **(a)** Representación de un molde abierto. **(b)** Molde con un macho o corazón y una mazarota ciega. **(c)** Sección transversal del molde listo para el vaciado, con una mazarota abierta sobre la pieza

En la fundición en molde de arena (y otros procesos de molde desechable) la cavidad del molde se forma mediante un modelo de madera, metal, plástico u otro material (figura 3.4), que tiene la forma de la pieza que será fundida. La cavidad se forma al recubrir el modelo de ambas cajas con arena en partes iguales, de manera que al remover el modelo quede una cavidad que tenga la forma deseada de la pieza. El modelo se sobredimensiona para compensar la contracción del metal cuando este se solidifica y enfría. La arena húmeda del molde contiene un aglomerante para mantener su forma.

La cavidad del molde proporciona las superficies externas de la fundición, pero además puede tener superficies internas, que se definen por medio de un corazón, el cual es una forma colocada en el interior de la cavidad del molde para formar la geometría interior de la pieza. En la fundición en arena, los corazones se hacen generalmente de arena, aunque pueden usarse otros materiales como metales y cerámicos.

El sistema de vaciado (figura 3.17) en un molde de fundición es el canal o red de canales por donde fluye el metal fundido hacia la cavidad desde el exterior del molde. El sistema de vaciado consta típicamente de un bebedero de colada (también llamado simplemente bebedero) a través del cual entra el metal a un canal de alimentación que conduce a la cavidad principal. En la parte superior del bebedero existe frecuentemente una copa de vaciado para minimizar las salpicaduras y la turbulencia del metal que fluye en el bebedero.

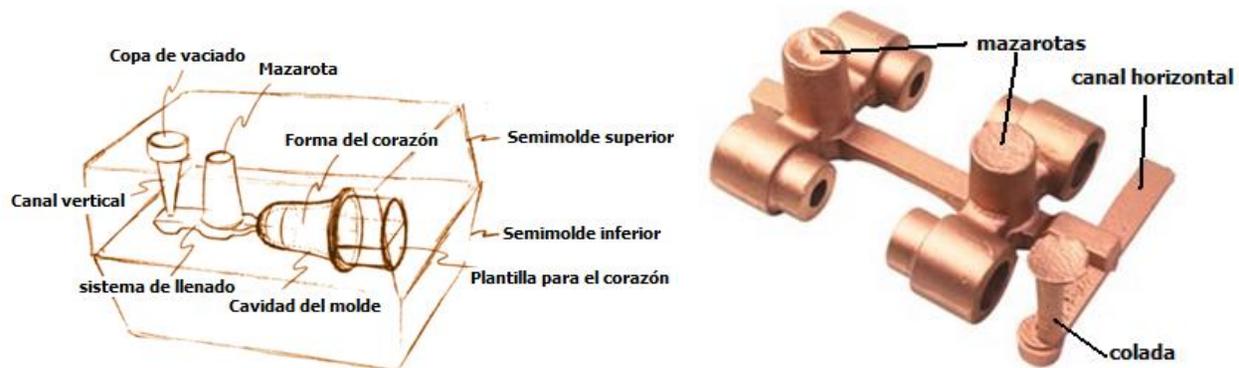


FIGURA 3.17 Sistema de llenado colada y alimentadores y mazarotas

En cualquier fundición cuya contracción sea significativa se requiere, además del sistema de vaciado, una mazarota conectada a la cavidad principal. La mazarota es una reserva en el molde que sirve como fuente de metal líquido para compensar la contracción de la fundición durante la solidificación. A fin de que la mazarota cumpla adecuadamente con su función, debe diseñarse de tal forma que solidifique después de la fundición principal.

A medida que el metal fluye dentro del molde, tanto el aire que ocupaba previamente la cavidad, como los gases calientes formados por la reacción del metal fundido deben evacuarse para que el metal llene completamente el espacio vacío. En la fundición en arena, la porosidad natural del molde permite que el aire y los gases escapen a través de las paredes de la cavidad. En los

moldes permanentes se taladran pequeños agujeros de ventilación dentro del molde o se maquinan en el plano de separación para permitir la salida del aire y los gases.

Moldeo con arena en verde

En la figura 3.18 se muestra el procedimiento manual de moldeo en verde, el cual emplea una mezcla de moldeo cuyos constituyentes principales son: arena, bentonita y humedad. Este proceso se caracteriza por ser el más económico, aunque su precisión y acabado superficial no son tan perfectos.

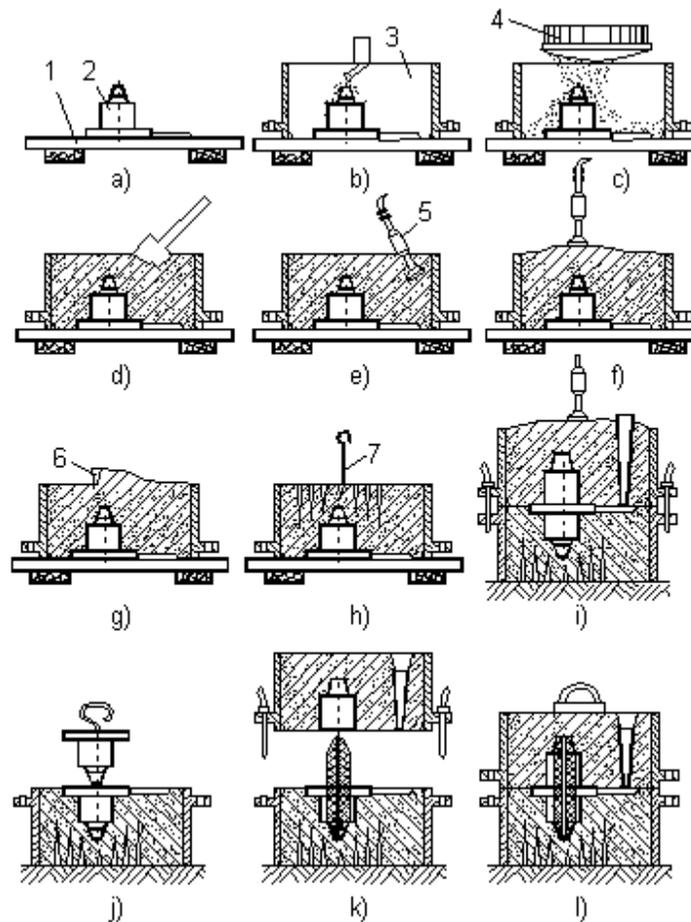


FIGURA 3.18 Etapas del moldeo en arena en verde mediante un procedimiento manual

El proceso consiste en compactar la arena alrededor del modelo, el cual, a su vez, se coloca sobre una tarima o tablero de apisonar, se rodea por la semicaja inferior. Compactada esta mitad se le da vuelta y se coloca la mitad restante del modelo, a la vez se ensambla la semicaja superior;

asimismo, se ponen en posición el bebedero de colada y demás elementos que forman el sistema de alimentación. Antes de colocar la arena en el molde, se recubren las superficies con arena seca, para evitar así que se adhieran durante el compactado; es necesario que el modelo se recubra o revista con separador, se coloca entonces la arena y se procede al compactado. Debe tenerse cuidado de no golpear el modelo. Es necesario que la dureza del molde sea uniforme y suficiente para evitar que se desgrane o rompa antes o durante el vaciado, ya que puede haber penetraciones del metal, lo que provocará el rechazo de la pieza.

Una vez compactado el molde se procede a retirar las clavijas de la colada y las mazarotas, se separan los semimoldes y así, se retira el modelo. Se abren las coladas y se colocan los corazones en posición, en caso de que la pieza los requiera. Se procede entonces a cerrar el molde y se colocan los seguros para evitar que el metal líquido separe los semimoldes, con el mismo fin se llegan a colocar contrapesos sobre la superficie del molde, y se procede al vaciado (figura 3.19). Una vez que la pieza se ha enfriado lo suficiente, se destruye el molde reiniciando el ciclo.



FIGURA 3.19 Vaciado de los moldes en un carrusel

El moldeo en verde se efectúa normalmente con máquina. El compactado de la arena se efectúa por percusión-prensado. En la figura 3.20 se pueden observar una máquina moldeadora típica. En estas solo se pueden emplear modelos placa; es común que una moldeadora produzca el semimolde superior y otra el inferior, haciendo el ensamble de los semimoldes ya en el carrusel.



FIGURA 3.20 Moldeo en verde con moldeadoras neumáticas

Cuando las piezas son muy grandes, el moldeo se efectúa en foso y es evidente que el compactado no se puede hacer en una moldeadora, para esto se emplean las lanzadoras de arena (figura 3.21), que consisten en una turbina que proyecta la arena sobre el molde. Varios de estos equipos llevan a efecto una acción de mezclado previa, pudiendo así ser empleados para otros procesos de moldeo como el de caja fría. Es usual el uso de pisonadores neumáticos para terminar el compactado del molde.



FIGURA 3.21 Moldeo con arena en verde de piezas de grandes dimensiones

Mezcla de moldeo. Para efectuar la operación de moldeo, es necesaria una mezcla con la cual se recubra el modelo y se pueda producir así una cavidad con la geometría y dimensiones de la pieza que se va a producir. El material de moldeo debe resistir el contacto con el metal líquido sin fundirse y sin modificar sus dimensiones apreciablemente; asimismo, es primordial que permita la salida del aire que ocupa la cavidad del molde, así como la de los gases producidos durante el vaciado. Una vez solidificada la pieza, se requiere que la mezcla se desprenda con facilidad de esta, así como de las cajas de moldeo. Por ello, una mezcla de moldeo debe presentar: *plasticidad* (facilidad para reproducir la geometría del modelo), *resistencia mecánica* (capacidad de la arena para conservar la forma de la cavidad y producir una pieza con la geometría requerida), *poder refractario* (capacidad para soportar el contacto con el metal fundido sin ser sinterizado por este), *permeabilidad* (capacidad para permitir la salida del aire y los gases producidos durante el llenado de la pieza), *estabilidad química y física* (la mezcla no deberá sufrir transformaciones que afecten las dimensiones de la pieza).

En general, para las operaciones de moldeo, la arena sílica (SiO_2) es la más común, sin embargo, se pueden llegar a utilizar arenas de zirconio (ZrSiO_4), olivinita (Mg_2SiO_4) y cromita

(FeO - Cr₂O₃). La arena sílica es la de empleo general por su costo. Las arenas de zirconio presentan mayor conductividad térmica y no se adhieren a la superficie de la pieza, lo que da como resultado su aplicación como pinturas y revestimientos en moldes grandes. La olivinita y magnesita se emplean en el vaciado de piezas de acero al manganeso, y se obtiene un buen acabado superficial.

TABLA 3.1 Composición típica de una arena para fundición

Composición	Arena sintética %	Arena natural %
SiO ₂	97.91	78.2
Al ₂ O ₃	1.13	
Fe ₂ O ₃	0.5	10.12
TiO ₂	0.04	
CaO	0.11	2.4
MgO	0.02	1.8
K ₂ O	0.65	2.1
Na ₂ O	0.07	0.2
Pérdidas por combustión	0.21	4.1

Para el moldeo en verde, las arcillas se emplean como aglomerantes, estas se caracterizan por ser regenerables ya que su fuerza de adhesión se obtiene mediante la adición de agua a diferencia de otros aglomerantes, en los que la cohesión se obtiene por reacción química y, por lo tanto, su acción es irreversible. De acuerdo con su composición, las arcillas se pueden clasificar como caoliníticas (Al₂O₃ - 2SiO₂-2H₂O), montmorilloníticas (Al₂O₃-4SiO₂-H₂O-nH₂O), hidromicáceas y poliminerales. Por sus características, las montmorilloníticas son las más utilizadas, también son conocidas como bentonitas. Estas arcillas se utilizan tanto para el moldeo en verde como en seco. En virtud de que algunos de los iones Al³⁺ son sustituidos por Mg²⁺, esto permite que la molienda absorba cationes de intercambio Na⁺ y Ca²⁺, a lo que las propiedades de la arcilla son particularmente sensibles. La máxima capacidad de hinchado de la bentonita sódica la hacen idónea para moldeo en seco, mientras que la cálcica promueve máxima resistencia en verde.

Al calentarse, la arcilla pierde humedad y se produce un encogimiento de la molécula, con lo que se mantiene y aún incrementa la resistencia de la unión; sin embargo, la permanencia a altas temperaturas elimina el agua combinada químicamente y causa la pérdida permanente de la capacidad de adhesión, esto se presenta entre los 400 y 700 °C. A mayores temperaturas se producen cambios cristalinos drásticos. Por tanto, es necesario que después de cada operación de vaciado se adicione de 1 a 4% de bentonita para reponer la que ha sufrido transformaciones irreversibles, así como la humedad necesaria.

En la figura 3.22 se muestra el efecto de la humedad y el contenido de arcilla en la resistencia de las mezclas de moldeo.

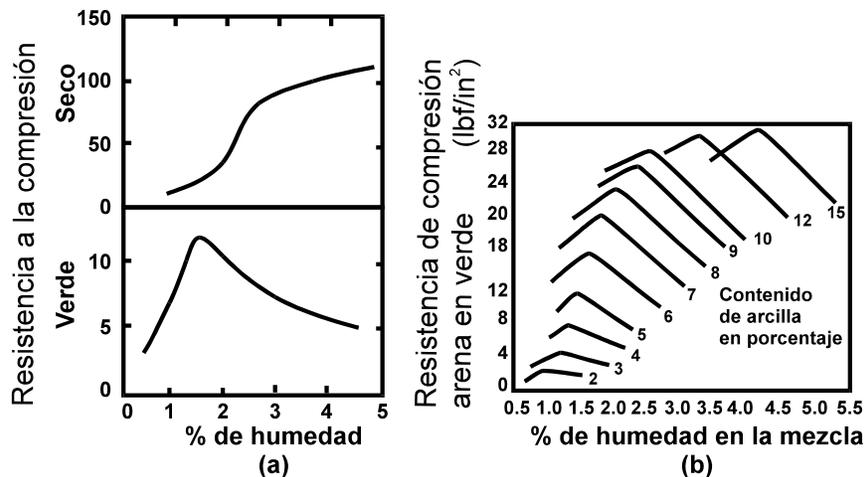
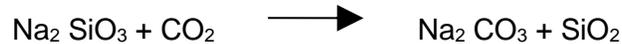


FIGURA 3.22 (a) Efecto de la humedad en la resistencia en verde y en seco. **(b)** Influencia de la humedad y del contenido de arcillas en la resistencia en verde

Moldeo en arena empleando aglutinante inorgánico (Proceso CO₂). En este proceso, el compactado del molde se realiza en forma similar a lo descrito para moldeo en verde, con la excepción de que se requiere hacer pasar una corriente de gas carbónico (CO₂), a través de la arena, lo que permite entonces su endurecimiento. De las resinas de origen inorgánico, la más usual es el silicato de sodio (Na₂SiO₃.nH₂O). La viscosidad de la mezcla está en función de la relación de Na₂O a SiO₂, donde son usuales las relaciones de 1.5 a 3.1. El endurecimiento se logra por el paso de CO₂ a través de la mezcla o por calor, lo cual provoca una serie de

reacciones químicas complejas que dan lugar a la formación de un gel sílice que actúa como puente entre los granos de arena. La reacción general se representa por:



La resistencia de la mezcla depende del flujo de gas y tiempo de envejecimiento, es del orden de 2.45 a 2.94 MPa contra 5.8 a 7.92 MPa del proceso en cáscara, y 1.7 a 2 para resinas autofraguantes.

En el caso de moldeo se puede tan solo utilizar una capa que recubra al modelo y el resto se rellena con arena en verde, con lo que se logra una sensible economía al no requerir tanta arena con silicato de sodio que es de un mayor costo.

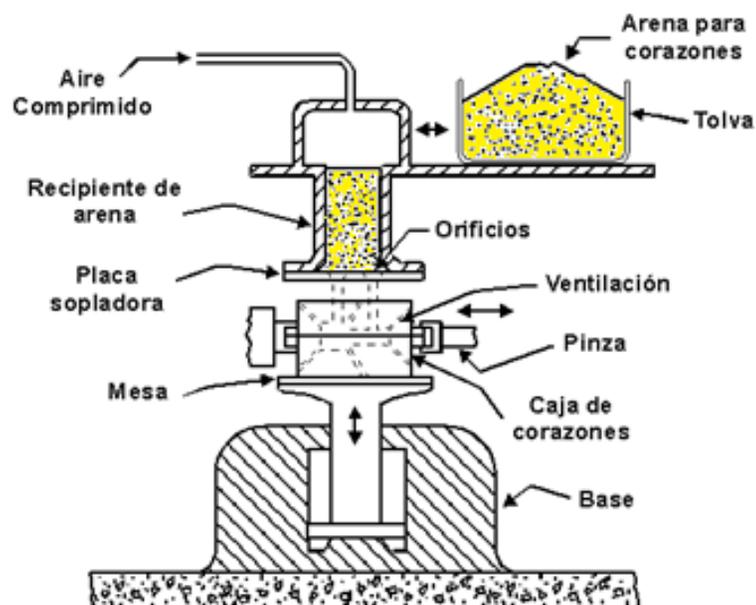


FIGURA 3.23 Máquina sopladora de corazones

El proceso CO_2 más que para moldeo se emplea en la producción de corazones, para lo que se emplean las máquinas sopladoras. En la figura 3.24 se muestra uno de estos equipos, y en la 3.25, algunos corazones (machos) producidos por este método.

La ventaja que ofrece este método sobre el moldeo en verde es su mayor precisión dimensional, así como su mejor acabado; además de que se obtiene geometría o detalles más complejos. Su principal desventaja radica en el costo de las resinas y en el reciclaje de la arena.



FIGURA 3.24 Máquina sopladora de corazones de caja caliente

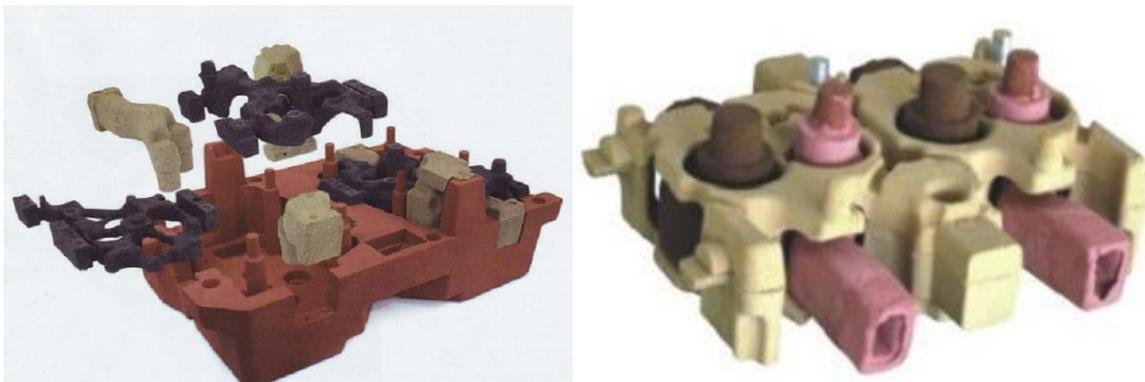


FIGURA 3.25 Corazones producidos por diferentes técnicas durante su ensamble

Proceso de caja caliente. Los aglutinantes resinosos fueron introducidos en la industria de la fundición por Hooker Chemical Corporation en 1929. Esta tecnología desde entonces ha permitido operaciones más simples y rápidas, y piezas más precisas. En el caso particular del método de caja caliente, se trata de un proceso húmedo a diferencia del moldeo en cáscara, en el que se utiliza una mezcla seca. Se emplea en la producción de corazones y su principal ventaja sobre el

de cáscara reside en la mayor velocidad de producción. En este proceso se aplican resinas líquidas sintéticas que, al reaccionar con un catalizador a la temperatura adecuada, produce una cáscara de resistencia suficiente para que resista el peso del corazón, permitiendo así su maniobra sin que se rompa. El macho continúa su curado después de haber sido extraído de la caja de corazones, quedando completamente endurecido antes de llegar a temperatura ambiente.

La reacción que se produce para lograr el endurecimiento es



La resina puede ser de tipo fenólico o furánico con modificaciones de urea para lograr un curado rápido, y se clasifica, entonces, como producto de reacción fenol-urea-formaldehído (aglutinantes fenólicos).

Alcohol furfural-urea-formaldehído (resinas furánicas)

En ambos casos, el aglutinante produce un porcentaje de carbono proporcional al fenol o alcohol furfural presente, el cual actúa como agente ligante a los granos de arena, manteniendo ese carácter hasta que exista oxígeno libre disponible, quemándose y desprendiendo CO y CO₂.

En general, también se pueden clasificar como AF/UF/FF, AF/UF, AF/FF, FF/UF (libre de alcohol furfural) en las que se va variando el nivel de nitrógeno libre, por esta razón, la resina estará en función del producto a vaciar.

Los catalizadores están constituidos principalmente por agua y sales inorgánicas, las que se descomponen por el calor y permiten al ácido ejercer su acción catalítica.

Para asegurar buenos resultados, se requiere emplear arena limpia y seca, ya que a temperatura ambiente se mezcla con la resina y el catalizador. También ha de tenerse cuidado con el tiempo de vida de la mezcla de moldeo.

TABLA 3.2 Constituyentes de las resinas para proceso en caja caliente

Constituyente	Composición química
Fenol	C ₆ H ₅ OH
Formaldehído	CH ₂ = O
Urea	O = C (NH) ₂
Alcohol furfural	

AF - alcohol furfural, FF - fenol formaldehído, UF - urea - formaldehído

3.3 PARÁMETROS IMPORTANTES EN EL PROCESO DE FUNDICIÓN

Calentamiento del metal

En función del material que se va a fundir, de su calidad y del volumen por producir se pueden utilizar diversos tipos de unidades de fusión (hornos), para calentar el metal a la temperatura necesaria. La energía calorífica requerida es la suma de: 1) el calor para elevar la temperatura hasta el *punto de fusión*, 2) *calor de fusión* para convertir el metal sólido a líquido y 3) el calor necesario para elevar el metal fundido a la *temperatura de vaciado*. Esto se puede expresar como:

$$H = \rho V [C_s (T_m - T_0) + H_f + C_l (T_p - T_m)] \quad (3.1)$$

donde:

H = Calor requerido para elevar la temperatura del metal a la temperatura de fusión [J]

ρ = Densidad [kg/m³]

C_s = Calor específico del metal sólido [J/kg °C]

T_m = Temperatura de fusión del metal [°C]

T_0 = Temperatura inicial, generalmente la ambiente [°C]

H_f = Calor de Fusión [J/kg]

C_l = Calor específico del metal líquido [J/kg °C]

T_p = Temperatura de vaciado [°C]

V = Volumen del metal que se calienta [m³]

Las unidades de fusión (hornos) se pueden clasificar de acuerdo con su medio de calentamiento, y en el caso de que la fuente de calor sea la combustión se considerará el contacto entre los gases de combustión y el material a fundir.

Considerando el medio de calentamiento se tiene:

- Hornos eléctricos: de arco, arco indirecto, inducción y resistencia.
- Hornos de combustión: por el tipo de combustible: sólido (coque), líquido (diésel o petróleo), gas (natural o LP). Si se considera el grado de contacto de los productos de combustión con el metal a fundir se pueden considerar aquellos sistemas de fusión en que el combustible (coque) está en contacto con el mineral (alto horno) o con el metal como en el de cubilote. Por otra parte, en ocasiones los gases de combustión transfieren el calor directamente al metal a fundir, como en el de horno reverbero y el de hogar abierto. En otras unidades de fusión el calentamiento es indirecto, como en todos los hornos de crisol.
- El horno de cubilote (cupola furnace) ha sido empleado desde hace varios siglos en la producción de hierro gris, las restricciones en cuanto al control de la composición han dado como consecuencia que este se emplee en combinación con hornos de inducción, los que actúan como unidades de mantenimiento de temperatura y ajuste de composición. El horno de cubilote (figuras 3.26 y 3.27) es una unidad de proceso semicontinuo diseñada para trabajar en campañas con duración de 6 horas a varios días, en algunos casos. Estos se cargan por la parte superior y su longitud vertical está limitada para garantizar el calentamiento y fusión del material, almacenándose este en su parte baja denominada crisol.

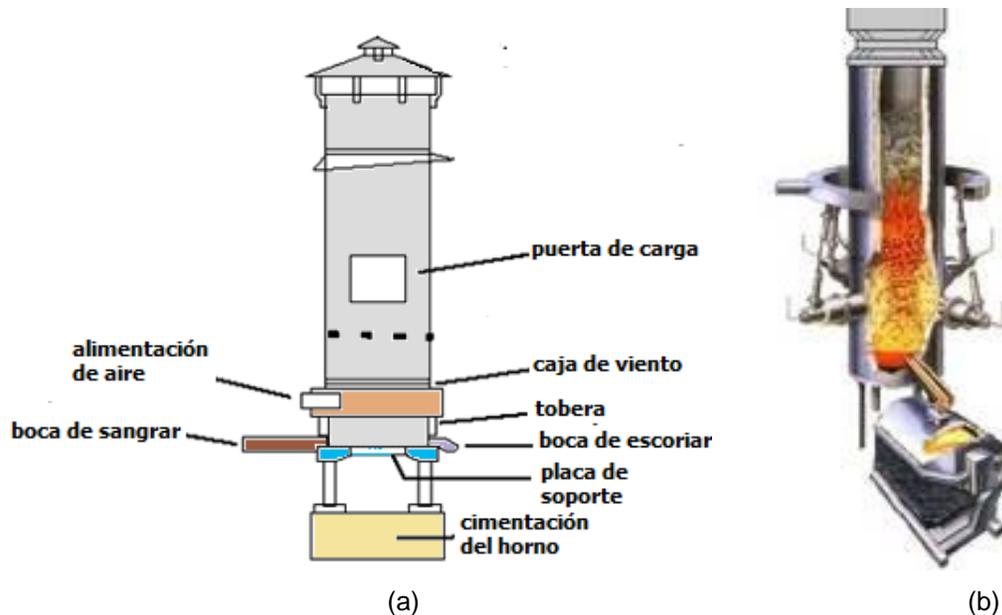


FIGURA 3.26 (a) Partes del horno cubilote (b) Diversas secciones de un horno con sangrado continuo



(c)

FIGURA 3.26 (c) Vista exterior de dos hornos de alta producción



FIGURA 3.27 Horno de cubilote. Aspectos diversos de dos hornos de pequeña capacidad (alrededor de una tonelada por hora)

- Horno de crisol. Estas unidades de fusión (figura 3.28) se utilizan sobre todo para metales no ferrosos cuyo punto de fusión es menor a 1000 °C, y cuando la producción requerida es limitada. Son hornos de ciclo discreto cuya capacidad está limitada por el tamaño del crisol, en general, usan gas como combustible (solamente en limitadas ocasiones emplean diésel) y, en general, no se emplean para grandes volúmenes de producción.



FIGURA 3.28 Horno de crisol

El horno de arco es la unidad de fusión más utilizada para la producción de aceros, (figura 3.29), el calor se genera al formar un arco eléctrico con un electrodo de grafito; el horno es trifásico con tres electrodos, cada uno conectado a una fase del circuito eléctrico, normalmente se trabaja con voltajes del orden de 500 V y densidades de corriente de 100 o más amperes por cm^2 de sección transversal del electrodo (lo cual representa entonces miles de amperes). Su capacidad va de unas 4 toneladas hasta 60 toneladas con tiempos de proceso de entre 2 y 3 horas.



FIGURA 3.29 Horno de arco eléctrico

Los hornos de inducción tienen la ventaja de que el calor se genera por circular una corriente eléctrica a través del propio material a fundir, razón por la que no existe contaminación de ningún tipo, (figura 3.30). Existen dos configuraciones básicas que son por inducción directa o indirecta, este último se emplea en materiales con muy alta conductividad eléctrica, como el cobre o el aluminio, los cuales debido a su conductividad son muy difíciles de calentar por el principio de inducción, utilizando para esto un crisol de grafito como elemento calefactor. Existen hornos de inducción con capacidad de unos cuantos gramos y frecuencias de miles de hertz, hasta de varias toneladas, los cuales trabajan a frecuencia de red (la capacidad mínima de uno de frecuencia de red es de 1.5 ton, hasta unidades de 60 ton); estos se emplean comúnmente en la industria automotriz para la producción de piezas de fundición de hierro (es común que la fusión del hierro gris se realice en un cubilote, mientras que el ajuste de temperatura y composición se realiza en un horno de inducción). En el horno de inducción rodeando al crisol se dispone de una bobina que hace las veces del primario del transformador mientras que el secundario es la carga a fundir. Como la penetración de la corriente está dada por la frecuencia es entonces que este es función inversa a la capacidad del horno. En general, la fusión en este tipo de unidades es costosa por lo que, en ocasiones, se emplean en combinación con otro tipo de hornos, donde la unidad de fusión permite el ajuste de composición y temperatura, garantizando así menor costo y alta calidad del producto.

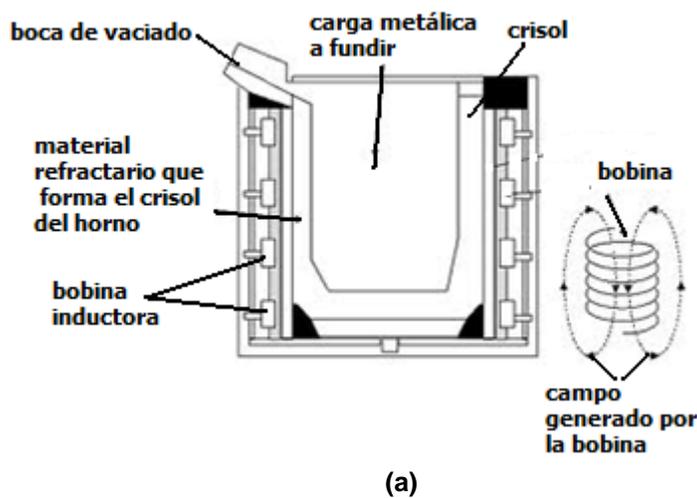


FIGURA 3.30 Imágenes diversas de hornos de inducción. **(a)** Principio de operación, **(b)** Vaciado de un horno de inducción de alta frecuencia



(c)



(d)

FIGURA 3.30 (Continuación) Imágenes diversas de hornos de inducción **(c)** Horno de 5 ton/h, **(d)** Horno de media frecuencia de hasta 1000 kW

Los hornos de resistencia eléctrica tienen aplicación para producciones reducidas (figura 3.31), normalmente de menos de 20 kg por carga, en metales no ferrosos con temperaturas de fusión por debajo de los 1000 °C (aleaciones de aluminio y cobre). Si bien la calidad del metal fundido es elevada, el costo de la energía eléctrica y la duración de las resistencias, cuya vida es muy susceptible a la temperatura de trabajo, vuelven incosteable el empleo de este tipo de hornos en grandes volúmenes de producción. Por todo lo expuesto, este tipo de unidades tienen mayor aplicación en operaciones de tratamiento térmico que para fusión.

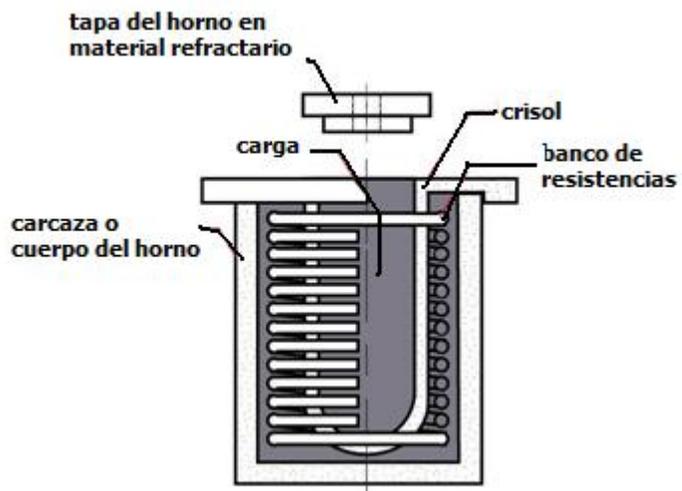


FIGURA 3.31 Horno de resistencia eléctrica

Vaciado del metal fundido

Después del calentamiento, y una vez alcanzada la temperatura adecuada (mínima a la que se puede producir una pieza sana), el material está listo para verterse en el molde, lo cual se refiere como vaciado (figura 3.32). La introducción del metal fundido en el molde y su flujo dentro del sistema de vaciado y de la cavidad es un paso crítico en el proceso. Para que este paso tenga éxito, el metal debe fluir a través de todas las regiones del molde antes de solidificarse. Los factores que influyen en la operación de vaciado son: la temperatura de vaciado, la velocidad de vaciado y la turbulencia generada durante el llenado del molde.



FIGURA 3.32 Vaciado del metal en el molde

La temperatura de vaciado es la temperatura del metal fundido al momento de su introducción en el molde. Lo importante aquí es la diferencia entre la temperatura de vaciado y la temperatura a la que empieza la solidificación (el punto de fusión para un metal puro, o la temperatura liquidus para una aleación). A esta diferencia de temperaturas se le llama algunas veces *sobrecalentamiento*. Este deberá ser el mínimo posible que garantice el correcto llenado del molde, lo anterior en virtud de que tanto la cinética de oxidación como la solubilidad de gas en el metal líquido dependen de la temperatura.

La velocidad de vaciado es el caudal con que se vierte el metal fundido dentro del molde. Si la velocidad es muy lenta, el metal puede enfriarse antes de llenar la cavidad. Si la velocidad de vaciado es excesiva provoca turbulencia y puede convertirse en un problema serio (se favorece la erosión de la arena del molde, así como que el metal atrape gases y escoria).

La turbulencia del flujo se produce al contacto del metal líquido con las paredes del molde, su presencia dependerá de la velocidad y de la viscosidad del metal líquido, así como de la geometría del sistema de llenado. El flujo turbulento debe evitarse ya que provoca una mayor interacción entre el metal y el aire, lo que favorece la formación de óxidos metálicos que pueden quedar atrapados durante la solidificación y degradando de esta forma la calidad de la fundición; también provoca una erosión excesiva del molde por efecto del impacto del flujo de metal fundido. Por último, el flujo turbulento promueve que el metal líquido atrape gas y escorias afectando con esto la calidad de las piezas producidas en forma negativa.

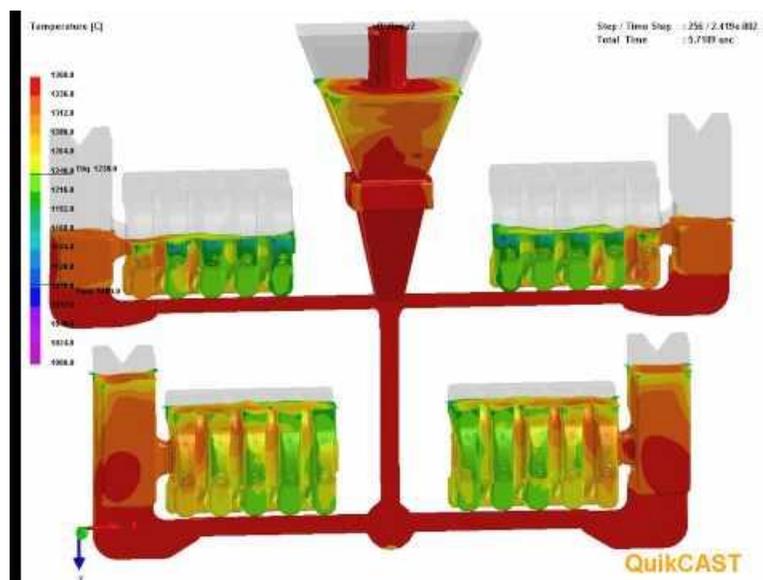


FIGURA 3.33 Simulación del llenado [Quik cast es una paquetería desarrollada por Atgroup software]

Análisis del vaciado

Varias relaciones gobiernan el flujo del metal líquido a través del sistema de vaciado y dentro del molde. Si se considera que el flujo es conservativo (lo cual no es verdad) se puede realizar un primer análisis empleando para tal fin la ecuación de *Bernoulli* (ecuación de conservación de energía que parte de considerar que el flujo es laminar), la cual establece que la suma de las

energías es igual (altura, presión dinámica y energía cinética) en dos puntos cualquiera de un líquido que fluye. Esto se puede escribir como:

$$h_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} \rightarrow h_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g}$$

y considerando pérdidas:

$$h_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + F_1 = h_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + F_2 \quad (3.2)$$

donde:

h = Altura [m]

P = Presión en el líquido [N/m²]

ρ = Densidad [kg/m³]

v = Velocidad de flujo [m/s]

g = Aceleración gravitatoria [m/s²]

F = Pérdidas de carga debidas a la fricción [m]

** Los subíndices 1 y 2 indican dos puntos cualesquiera en el flujo del líquido

La ecuación de Bernoulli se puede simplificar de varias maneras. Si no se consideran las pérdidas por fricción y se asume que la descarga es presión atmosférica en toda su extensión, entonces la ecuación puede reducirse a:

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (3.3)$$

La cual puede emplearse para determinar la velocidad del metal fundido en la base del bebedero de colada (ecuación de Torricelli):

$$v = \sqrt{2gh} \quad (3.4)$$

donde:

v = Velocidad del metal líquido en la base del bebedero [m/s]

g = Aceleración gravitatoria [m/s²]

h = Altura del bebedero [m]

Otra relación de importancia durante el vaciado es la ecuación de conservación de masa y dado que la densidad se considera constante, entonces:

$$Q = v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad (3.5)$$

donde:

Q = Velocidad de flujo volumétrico [m³/s]

v = Velocidad [m/s]

A = Área de la sección transversal del líquido [m²]

** Un incremento en el área produce una disminución en la velocidad y viceversa

Con la finalidad de que el metal no atrape gas durante el vaciado, entonces el conducto vertical del sistema de colada deberá ser cónico y, en general, las secciones transversales deberán reducirse, esto es, el área de la sección transversal del canal debe reducirse conforme el metal se acelera durante su descenso en el bebedero de colada; de otra manera, puede aspirar aire dentro del líquido debido al incremento de la velocidad del metal que fluye hacia la base del bebedero y conducirlo a la cavidad del molde.

Considerando que el canal alimentador de la base del bebedero a la cavidad del molde sea horizontal (y por tanto que la altura sea la misma que la de la base del bebedero), la velocidad volumétrica de flujo a través del sistema de vaciado y dentro de la cavidad del molde permanece igual a v_A en la base. Por consiguiente, se puede estimar el tiempo requerido para llenar una cavidad de volumen V , como sigue:

$$t = \frac{V}{Q} \quad (3.6)$$

donde:

t = Tiempo de llenado del molde [s]

V = Volumen de la cavidad del molde [m³]

Q = Flujo volumétrico [m³/s]

El tiempo de llenado del molde t , calculado por la ecuación 3.6, debe considerarse como tiempo mínimo debido a que el análisis ignora las pérdidas por fricción y la posible constricción del flujo en el sistema de vaciado; por tanto, el tiempo de llenado del molde será mayor que el resultante de la ecuación 3.6.

Solidificación y enfriamiento

Después de vaciar el metal fundido en el molde, este se enfría y solidifica. En esta sección se analizarán los mecanismos físicos de solidificación que ocurren durante la fundición. Los aspectos asociados con la solidificación incluyen el tiempo de enfriamiento del metal, la contracción, la solidificación direccional y el diseño de las mazarotas.

Tiempo de solidificación. Sea que se trate de un metal puro o aleación, su solidificación toma tiempo. El tiempo total de solidificación representa al periodo necesario para que la fundición solidifique después del vaciado. Este tiempo depende del tamaño (masa) y de la forma (superficie) de la fundición expresada por una relación empírica conocida como *regla de Chvorinov* que establece

$$t_s = C_m \left(\frac{V}{A}\right)^n \quad (3.7)$$

donde:

t_s = Tiempo de solidificación total [min]

V = Volumen de fundición [m³]

A = Área superficial de la fundición [m²]

n = Exponente que toma usualmente el valor de 2

C_m = Constante del molde

Dado que $n = 2$, las unidades de C_m son min/m^2 , su valor depende de las condiciones particulares de la operación de fundición, entre las cuales se incluyen el material del molde (calor específico y conductividad térmica), las propiedades térmicas del metal de fundición (calor de fusión, calor específico y conductividad térmica), y la temperatura relativa de vaciado con respecto al punto de fusión del metal. El valor de C_m para una operación dada se puede basar en datos experimentales de operaciones previas con el mismo material de molde, metal y temperatura de vaciado, incluso cuando la forma de la pieza fundida sea diferente en cada operación.

La regla de Chvorinov indica que una fundición con una relación de volumen a área superficial se enfriará y solidificará más lentamente que otra con una relación más baja. Este principio ayuda en el diseño de la mazarota del molde (sistema de alimentación). Para cumplir su función de alimentar el metal fundido a la cavidad principal, el metal en la mazarota debe permanecer en fase líquida más tiempo que el de la fundición. En otras palabras, el t_{SM} para la mazarota debe exceder a el t_s de la fundición principal. Como la condición del molde para la mazarota y la fundición es la misma, las constantes del molde serán iguales. Si el diseño de la mazarota incluye una relación de volumen a área más grande, se puede estar seguro de que la fundición principal solidificará primero y se reducirán los efectos de la contracción. Antes de considerar el diseño de la mazarota mediante la regla de Chvorinov es necesario tomar en consideración la contracción, razón por la cual se necesitan las mazarotas.

Contracción

En el análisis simplificado de la solidificación se ha omitido el impacto de la contracción que ocurre durante el enfriamiento y la solidificación. La contracción ocurre en tres pasos: 1) contracción líquida durante el enfriamiento anterior a la solidificación; 2) contracción durante el cambio de fase de líquido a sólido, llamada contracción de solidificación, y 3) contracción térmica de la fundición solidificada durante el enfriamiento hasta la temperatura ambiente. Los tres pasos pueden explicarse con referencia a una fundición cilíndrica hipotética hecha en un molde abierto, como se muestra en la figura 3.34.

El metal fundido inmediatamente después de vaciado se muestra en la figura 3.34(a). La contracción del metal líquido durante el enfriamiento, desde la temperatura de vaciado hasta la

temperatura de solidificación, causa que la altura del líquido se reduzca desde el nivel inicial, como se muestra en la figura 3.34(b). La magnitud de esta dependerá del metal y el sobrecalentamiento, sin embargo, en general es del orden del 0.5%. La contracción de solidificación que se observa en la figura 3.34(c) tiene dos efectos; en principio la contracción causa una reducción posterior en la altura de la fundición, para que después la cantidad de metal líquido disponible para alimentar la porción superior del centro de la fundición se reduzca. Esta es usualmente la última región en solidificar; la ausencia de metal crea un vacío en este lugar de la pieza. Esta cavidad producto del encogimiento es denominada como *rechupe* y se caracteriza por una geometría y superficies irregulares. Una vez solidificada, la fundición experimenta una contracción posterior en altura y diámetro mientras se enfría, como se observa en la figura 3.34(d). Esta contracción se determina por el coeficiente de expansión térmica del metal sólido, que en este caso se aplica a la inversa para determinar la contracción.

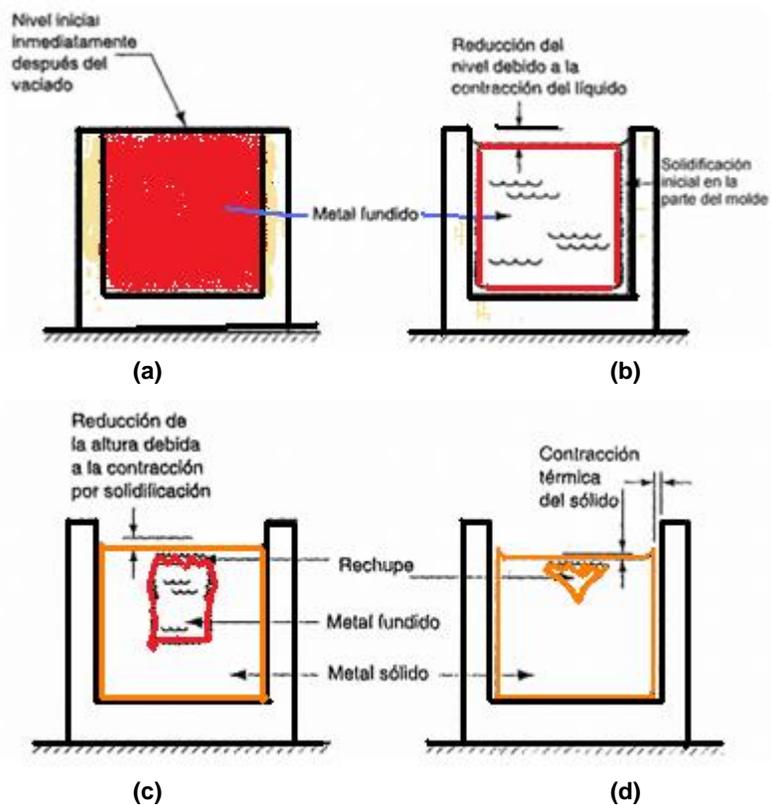


FIGURA 3.34 Descripción esquemática del proceso de contracción considerando una condición axisimétrica y un molde abierto

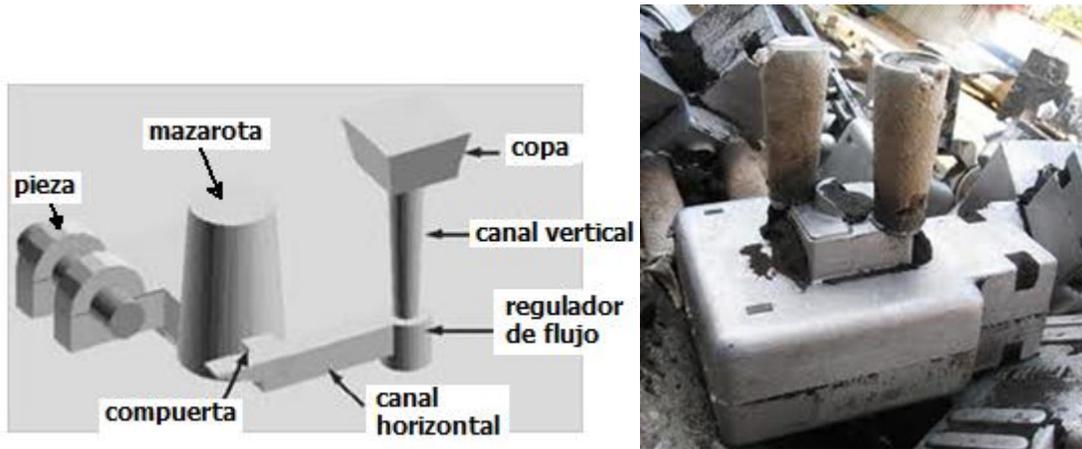


FIGURA 3.35 Sistema de llenado (colada) y alimentación (mazarotas)

Diseño de la mazarota

Tal como se describió antes, una mazarota se usa en un molde de fundición para alimentar metal líquido al proceso durante el enfriamiento y compensar así la contracción por solidificación. La mazarota debe permanecer en estado líquido hasta después de que la fundición solidifique. Para satisfacer este requerimiento, se puede calcular el tamaño de la mazarota usando la regla de Chvorinov.

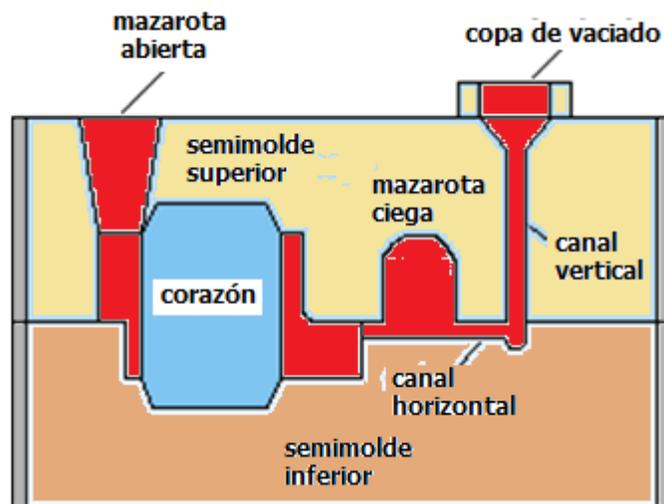


FIGURA 3.36 Sistema con mazarota ciega

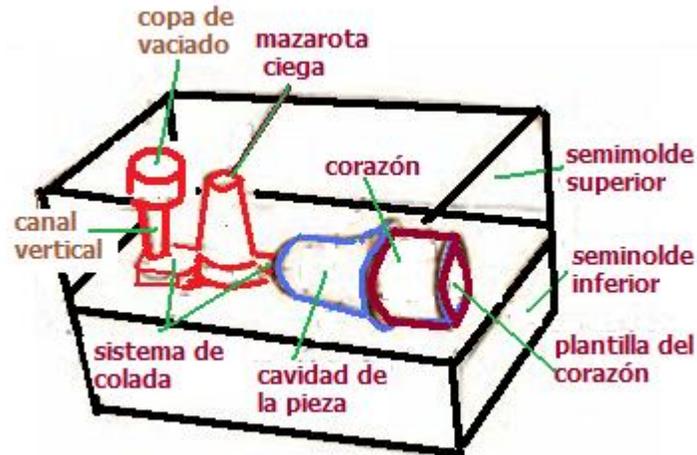


FIGURA 3.37 Colada y mazarota en serie

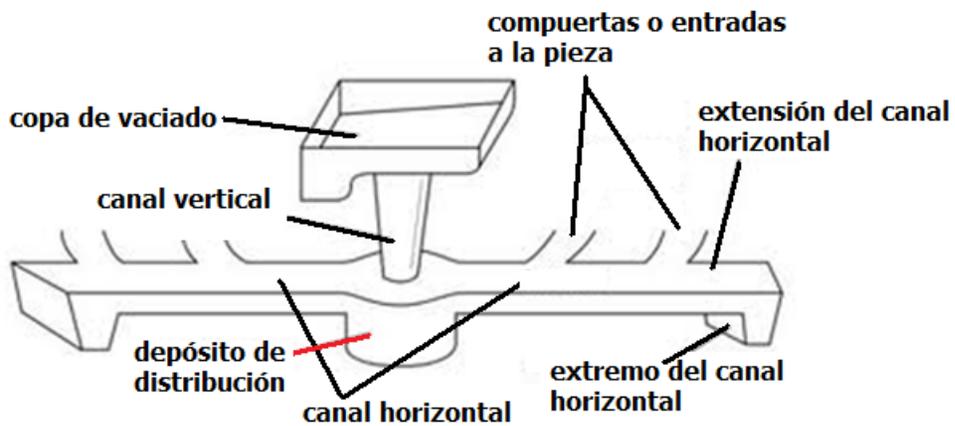


FIGURA 3.38 Elementos del sistema de llenado

Para el diseño de las mazarotas, a partir de la ecuación de Chvorinov, se tiene que:

$$C_m \frac{V_M}{A_M} \geq C_m \frac{V_p}{A_p}$$

Por lo que se consideran factores de aumento de 1.1 a 1.25

$$\Rightarrow 1.1 \frac{V_p}{A_p} \text{ a } 1.25 \frac{V_p}{A_p}$$

donde:

C_m = constante del molde

V_M = volumen de la mazarota [m^3]

A_M = superficie de la mazarota [m^2]

V_p = volumen de la pieza [m^3]

A_p = área de la pieza [m^2]

Al tomar en cuenta una geometría cilíndrica para la mazarota, se tiene entonces que el área de transferencia de calor de la mazarota está dada por:

$$V_M = \frac{\pi}{4} \phi^2 h$$

$$A_M = \pi \phi h + 2 \left(\frac{\pi}{4} \phi^2 \right)$$

donde:

ϕ = diámetro de la mazarota [m]

h = altura de la mazarota [m]

Y se considera la relación entre el volumen/área de la mazarota

$$\Rightarrow \frac{V_M}{A_M} = \frac{\frac{\pi}{4} \phi^2 h}{\pi \phi h + 2 \left(\frac{\pi}{4} \phi^2 \right)} = \frac{\phi h}{4h + 2\phi}$$

$$\therefore \frac{V_M}{A_M} \propto \frac{\phi h}{h + \phi}$$

Por lo que se puede fijar la magnitud de uno de los parámetros (altura h , diámetro ϕ) y, en consecuencia, verificar los valores respectivos del otro (diámetro ϕ , altura h). Como lo que se conoce es la altura de la caja de moldeo, es de especial interés, por lo general, la dimensión de semicaja superior, la cual es la condición de frontera al momento de diseñar la mazarota.

Diseño de coladas

Para el diseño de las coladas, a partir de la ecuación de Torricelli se puede conocer la velocidad del metal líquido al colar por gravedad

$$v = \sqrt{2gH}$$

donde:

v = velocidad del metal líquido [m/s]

g = aceleración gravitatoria [m/s²]

H = altura del bebedero (promedio en función de las condiciones de alimentación) [m]

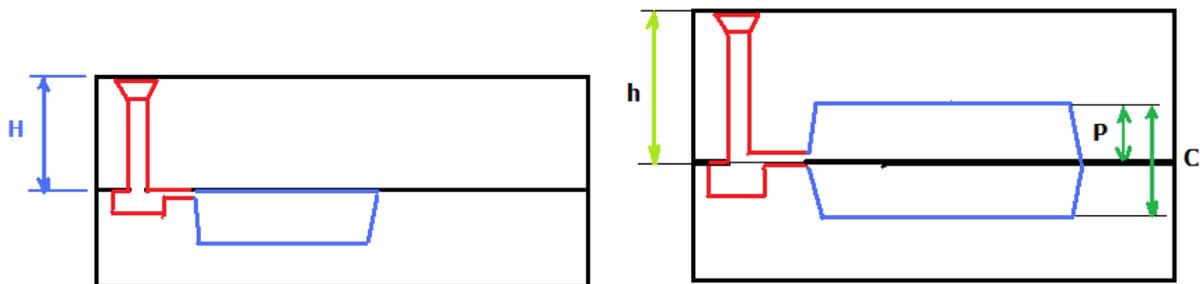


FIGURA 3.39 Posición de la alimentación con relación a la pieza

La altura H se toma como una altura promedio debido a las contrapresiones que puede generar el metal líquido al momento de realizar la colada, si la cavidad del molde tiene elementos por arriba del nivel del canal de alimentación.

$$H = \frac{2hC - P^2}{2C} = h - \frac{P^2}{2C}$$

donde:

h = altura del bebedero o colada [cm]

C = altura total de la cavidad a reproducir [cm]

P = distancia (altura) de la cavidad respecto del canal de alimentación [cm]

Se puede calcular un tiempo de duración de la colada considerando la masa total que será depositada al interior de la cavidad del molde y de los espesores de la pieza a reproducir

$$t = s\sqrt{M}$$

donde:

t = duración de la colada [s]

s = coeficiente que considera el espesor de las paredes de la pieza

M = masa de la pieza y la mazarota [kg]

El coeficiente s oscila entre diferentes valores dependiendo de los espesores de las paredes de la pieza de la siguiente forma:

Espesor de las paredes de la pieza [mm]	s
2.5-3.5	1.68
3.5-8	1.85
8-15	2.2

La ecuación anterior es válida para piezas con una masa hasta de 450 kg (y paredes de 2.5 a 15 mm).

Para piezas medianas y grandes con una masa hasta de 1000 kg y para fundiciones donde el material es acero (debido a la alta viscosidad que presenta este) la ecuación experimental utilizada es la siguiente:

$$t = s^3\sqrt{\delta M}$$

donde:

δ = espesor de la pieza [mm]

Para el coeficiente s

δ [mm]	s
Hasta 10	1
20	1.35
40	1.5
80 y mayores	1.7

Considerando la ecuación con la que se describe el flujo

$$\dot{Q} = vA$$

donde:

\dot{Q} = flujo volumétrico [m³/s]

v = velocidad del metal líquido [m/s]

A = área de la sección transversal de la colada [m²]

$$\Rightarrow \dot{Q} = \frac{V}{t} = \frac{M}{\rho t}$$

$$\Rightarrow \dot{Q} = \frac{M}{\rho t} = vA$$

donde:

ρ = densidad del metal [kg/m³]

Como la velocidad real del metal líquido es menor debido a las pérdidas por la fricción con la pared del molde, entonces se tiene que:

$$v_r = \mu v$$

donde μ es un factor debido a las pérdidas antes mencionadas, determinado basándose en datos empíricos y toma valores que por lo general oscilan entre 0.75 y 0.85 (en promedio 0.8). Para piezas con espesores hasta los 10[mm] este factor tiene una magnitud de 0.34.

$$\therefore A = \frac{M}{0.8(2gH)^{1/2} \rho t}$$

Por la magnitud de la sección transversal de la colada, se puede relacionar en forma proporcional la superficie del colector de escoria así como de las compuertas de alimentación de las piezas, esto con el fin de garantizar un flujo volumétrico del material constante.

a) Pieza con espesores delgados

A_{colada}	$A_{escoria}$	$A_{compuertas}$
1	1.06	1.11

b) Pieza con espesores medianos y pequeños

A_{colada}	$A_{escoria}$	$A_{compuertas}$
1	1.1	1.15

c) Pieza con espesores medianos y grandes

A_{colada}	$A_{escoria}$	$A_{compuertas}$
1	1.5	1.2

d) Pieza con espesores grandes

A_{colada}	$A_{escoria}$	$A_{compuertas}$
1	1.2	1.4

donde:

A_{colada} = área de la sección transversal de la colada [m²]

$A_{escoria}$ = área de la superficie del canal del colector de escoria [m²]

$A_{compuertas}$ = área de la sección transversal de las compuertas de alimentación [m²]

Finalmente, cabe destacar que los valores antes obtenidos (s, μ) han sido obtenidos considerando experiencias con fundiciones en hierro gris.

3.4 SUSTENTABILIDAD Y FUTURO DE LA INDUSTRIA DE LA FUNDICIÓN

Por sus características, la industria de la fundición representa una importante fuente de contaminantes ya que es un sector industrial con un elevado consumo de energía. Esto se traduce en un gran consumo de materias primas y de combustibles que genera, entonces, una importante huella de carbono. Sin embargo, representa también la oportunidad del reciclado de materias primas, reduciendo así la depredación indiscriminada de estos recursos no renovables. Para reducir el peso y el costo en algunas piezas hechas por fundición, la tendencia ha sido sustituirlas con plásticos o resinas reforzadas con fibras, sin embargo, como estos materiales son difícilmente reciclables, se crea entonces un severo inconveniente al final de su vida útil.

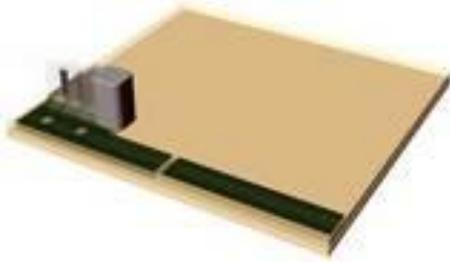
Una de las tendencias de la industria de la fundición ha sido la sustitución de aleaciones de alto punto de fusión (por ejemplo, ferrosas) por otras de menor temperatura, como son las de zinc

(zamak) o de aluminio (AlSi). En todos los casos en que las propiedades mecánicas requeridas así lo permiten, la anterior es una solución, que si bien puede representar un incremento en los costos es también una solución con una menor huella de carbono. Por otra parte, se ha buscado modificar los químicos empleados sobre todo como aglomerantes haciendo estos más eficientes (se requiere menor porcentaje de resinas por tonelada de arena) y reduciendo las emisiones generadas durante el endurecimiento y el vaciado del metal, una de las tendencias es el uso de aglomerantes inorgánicos. Otra de las líneas para lograr el objetivo de sustentabilidad ha sido lograr aplicaciones útiles para los efluentes del proceso como pueden ser las arenas y escorias a las cuales no solo se les ha encontrado uso como rellenos sino como fuente de minerales para los suelos agrícolas. Queda mucho por hacer, pero la industria se está moviendo en todo el mundo para lograr el efecto de sustentabilidad y, hasta el día de hoy y por las próximas décadas, la fundición seguirá siendo un engrane fundamental de la producción industrial de cualquier país.

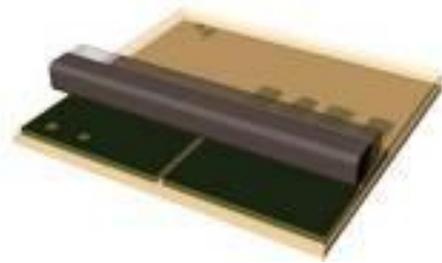
En la industria de la fundición se han aplicado principios similares a otras líneas de proceso, como es la integración de sistemas CAD/CAM, la integración de equipos que permiten el desarrollo rápido de prototipos, esto es el paso de una idea de diseño plasmada a través de un dibujo en un molde que permite el vaciado de una pieza en su geometría y dimensiones reales (figura 3.40). A lo antes indicado habrá que sumar sistemas inteligentes de colada que permiten el vaciado de los moldes sin ninguna intervención humana, o el control de modelos en almacenes totalmente robotizados, con lo cual la fundición ha logrado ser más eficiente y reducir sus costos, permitiéndole competir favorablemente.



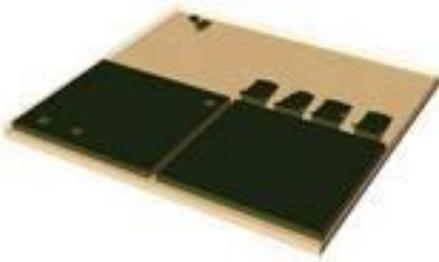
FIGURA 3.40 Impresora 3d para corazones y moldes en arena. Permite pasar del archivo CAD al molde [prometal RCT^R]



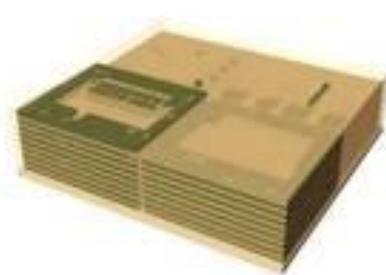
(a) La cabeza de impresión recorre la superficie donde se encuentra la arena con el activador (aglomerante)



(b) Una vez impresa una capa la plataforma desciende para imprimir la siguiente



(c) Una nueva capa de arena activada es aplicada a la superficie



(d) Las etapas anteriores se repiten hasta que se concluye la pieza



(e) Se remueve la arena que no se ha adherido y se ensamblan las piezas en el molde para proceder al vaciado

FIGURA 3.41 Etapas de procesamiento en una impresora 3d para arena, la cual se utiliza en la producción de moldes o corazones [Prometal RCT^R]

3.5 TENDENCIAS EN LA PRODUCCIÓN MUNDIAL DE PIEZAS COLADAS AL INICIO DEL SIGLO XXI

Como ya se ha mencionado, los productos fundidos han acompañado el desarrollo de la humanidad desde hace varios miles de años, adaptándose técnicas y procesos de acuerdo con las necesidades y desarrollos tecnológicos. Si bien desde el fin de la Segunda Guerra Mundial se ha venido dando la sustitución de muchas piezas metálicas por elementos de plástico, es también cierto que la demanda de piezas fundidas se ha incrementado de manera consistente.

Considerando del año 2000 en adelante, solamente se ha presentado disminución en la fracción correspondiente al hierro gris, incrementándose la producción de piezas en diversas aleaciones de aluminio, de hierro nodular y de acero. Aun con la reducción de la participación del hierro gris, su volumen de producción se incrementó, de tal forma que para 2014 la producción mundial de piezas fundidas se estimó del orden de casi 104 millones de toneladas, donde la principal demandante de estos productos es la industria automotriz.

En el periodo 2000-2014 la producción se ha trasladado sobre todo a Asia, destacando la participación de China e India las cuales concentran más del 56% de la producción mundial, mientras que las operaciones en Europa se han trasladado en el mismo periodo a países como Turquía y Ucrania. En ese mismo periodo, y no obstante el crecimiento de la industria terminal automotriz en México, la producción disminuyó de 1,761,000 ton a 1,651,679 ton (véase la tabla 3.3)¹.

A nivel mundial, el periodo 2000-2014 presenta tres espacios característicos: el primero que va de 2000 a 2007 se caracteriza por un crecimiento sostenido de la producción (64.75 millones de toneladas en 2000 a 94.92 millones en 2007). En el periodo de 2008-2009 presenta un retroceso del 15% (80.34 millones de toneladas en 2009), y retoma el crecimiento en 2010 hasta alcanzar una cifra superior a los 103 millones de toneladas en 2014.

¹ Soiński, M. S., P. Kordas y K. Skurka. *Trends in the Production of Castings in the World and in Poland in the XXI Century*, Archives of Foundry Engineering, 2016.

TABLA 3.3 Producción mundial de piezas fundidas en el periodo 2000-2014
(M. S. Soinski, P. Kordas, K. Skurka)

País	2000	2014	2000	2014	Cambio porcentual anual periodo 2000 a 2014
China	10 954 629	46 200 000	16.92%	44.58%	10.83%
EUA	13 129 200	10 470 939	20.28%	10.10%	-1.60%
India	3 120 000	10 021 000	4.82%	9.67%	8.69%
Japón	6 276 320	5 538 037	9.69%	5.34%	-0.89%
Alemania	4 542 010	5 246 557	7.01%	5.06%	1.04%
Rusia	6 200 000	4 200 000	9.58%	4.05%	-2.74%
Brasil	1 810 000	2 737 200	2.80%	2.64%	3.00%
Corea	1 651 300	2 630 900	2.55%	2.54%	3.38%
Italia	2 424 903	2 024 851	3.75%	1.95%	-1.28%
Turquía	965 000	1 750 000	1.49%	1.69%	4.34%
Francia	2 665 192	1 729 405	4.12%	1.67%	-3.04%
México	1 761 000	1 651 679	2.72%	1.59%	-0.46%
Ucrania	947 239	1 560 000	1.46%	1.51%	3.63%
Polonia	753 600	1 058 300	1.16%	1.02%	2.46%
Producción mundial [Toneladas]	64 750 239	103 641 518			3.42%

En Latinoamérica solo se presentan producciones relevantes, a nivel mundial, por parte de Brasil, Argentina y México [The latin america foundry industry, Remo De Simone, International Foundry Forum, 2014]. Sus principales fuentes de generación de energía son para Brasil 75% hidroeléctrica; Argentina 60% termoeléctrica y 36% hidroeléctrica; mientras que para México 72% se produce en termoeléctricas, situación que influye negativamente en los costos de la energía, sobre todo en los casos de Argentina y México, donde la mayor proporción se produce en termoeléctricas. En cuanto a lo que se refiere a las materias primas; principalmente aluminio y hierro, Brasil es autosuficiente, Argentina importa arrabio y es autosuficiente en Aluminio, mientras que México importa el total del aluminio que requiere y buena parte del arrabio. En lo que se refiere a producción, Brasil se orienta a fundiciones grises y nodulares (83%) y aceros (8%), con una participación de fundiciones de aluminio del orden del 8% del total. Argentina

distribuye su producción en un 63% de hierros grises y nodulares, 9% aceros y del orden de 21% de fundiciones de aluminio. México, por otra parte, destaca con un 45% del total de su producción orientada a no ferrosos, básicamente fundiciones de aluminio (36%) y de cobre y sus aleaciones (9%); el restante 55% se reparte en hierros grises y nodulares (50%), y fundiciones de acero (5%). En los tres casos, la industria de la fundición está orientada sobre todo a suplir las demandas de la industria automotriz, en el caso de Argentina 57%, Brasil 58%, mientras que para México representa de un 75 a 80%. De todo lo antes presentado se concluye que la tendencia de México está orientada a la producción de piezas de aluminio cuyo destino es la industria automotriz, razón por la que cualquier cambio en esta o en las relaciones comerciales con EUA (87% de piezas fundidas que se exportan en México tienen como destino EUA) afecta de manera muy directa a la industria de la fundición instalada en México de este siglo XXI.

TABLA 3.4 Composición de la producción mundial de acuerdo con los diferentes metales y aleaciones producidas por colada en el periodo 2000-2014 (M. S. Soinski, P. KOrdas, K. Skurka)

Producción de piezas fundidas (ton)	Producción anual		Fracción correspondiente a la producción total	
	2000	2014	2000	2014
Fundición gris	34 034 171	47 461 966	52.56%	45.79%
Fundición nodular	13 102 599	25 032 847	20.24%	24.15%
Fundición maleable	991 941	900 818	1.53%	0.87%
Fundición de acero	6 369 684	11 049 705	9.84%	10.66%
Cobre y sus aleaciones	1 058 120	1 680 630	1.63%	1.62%
Aleaciones de aluminio	8 045 648	16 230 137	12.43%	15.66%
Aleaciones de magnesio	104 873	192 637	0.16%	0.19%
Aleaciones de zinc	829 651	599 374	1.28%	0.58%
Otras aleaciones no ferrosas	213 552	493 404	0.33%	0.48%

CAPÍTULO 4

METALURGIA DE POLVOS

4.1 GENERALIDADES

En la actualidad se encuentra una gran variedad de elementos mecánicos metálicos, *que no han* sido producidos por fusión y vaciado o por procesos de conformado metálico como la laminación o la forja. Estas piezas, o en otros casos lingotes, se han fabricado a partir de mezclas de polvos metálicos y no metálicos por compactado y calentamiento. Dichos procesos reciben la denominación de pulvimetalurgia o metalurgia de polvos.

El Comité para Pulvimetalurgia de la *American Society for Metals* definió la pulvimetalurgia como: el arte y/o técnica de producir piezas de metal con base en polvos metálicos individuales, mezclados o aleados, compactándolos por presión o alguna otra técnica tal como vibración o decantación, dichos objetos pueden ser simultánea o subsecuentemente calentados para producir así una masa coherente, ya sea por difusión y crecimiento de grano o mediante la fusión de un constituyente de baja temperatura de fusión. Con otras palabras, la metalurgia de polvos es la técnica de producir polvos de metal y emplearlos para fabricar objetos útiles.

Los orígenes más remotos del proceso se remontan a unos 3000 años a. C. Los egipcios son el pueblo en el que recae el honor de emplear esta técnica en la fabricación de utensilios de hierro; más tarde, durante la Edad Media, fue común la aplicación de polvos de oro, plata, latón y estaño con fines ornamentales. La primera aplicación industrial de dicha técnica se debe al científico William Hyde Woolaston quien desarrolló un método para producir piezas de platino a partir de los polvos de dicho elemento, la descripción del proceso fue publicada hasta después de su muerte (1828) en 1839; asimismo, se reconoce que Sobleysky, en 1827, fabricó monedas de platino a partir de polvos de este metal.

La invención de la lámpara eléctrica incandescente, por Edison, requirió el desarrollo de un material adecuado para filamentos. Para su fabricación, en un principio se utilizaron polvos de osmio, tantalio y estroncio, pero dados los procesos metalúrgicos disponibles a principios del siglo XX, los filamentos que se obtenían eran muy frágiles. Desde el inicio fue evidente que un material ideal por su temperatura de fusión (3400 °C) era el tungsteno. Correspondió a Coodidge, en 1909, descubrir que dicho elemento puede trabajarse en cierto intervalo de temperatura y conservar su ductilidad a temperatura ambiente. Por las razones expuestas, a partir de 1910, el tungsteno sustituyó al osmio en los filamentos incandescentes. Para producirlos, el polvo de tungsteno se compactaba dando lugar a unos pequeños lingotes que eran calentados a una temperatura mucho menor a la de fusión; estos lingotes, frágiles a temperatura ambiente, se podían trabajar a temperaturas próximas a las del sinterizado. Esta deformación daba lugar a un aumento en la ductilidad del material, lo que permitió entonces alcanzar una etapa en la que el material podía estirarse en forma de alambre.

La aplicación con ciertas variantes de esta tecnología permitió que, en 1920, se empezaran a fabricar bronce porosos autolubricantes y, en 1923, aleaciones de carburo de tungsteno aglomeradas con cobalto, los cuales presentaban un amplio campo de aplicación para el corte y la fabricación de dados de estirado. Para los años sesenta, la tecnología se aplicaba en piezas para automóviles y ya para los ochenta, se producían piezas para turbinas de gas. En nuestros días, la técnica se ha sofisticado y ha ampliado bastante su campo de aplicación, permitiendo así la obtención de aleaciones o mezclas que por fusión serían imposibles de fabricar; asimismo, ha permitido lograr propiedades y características difíciles o imposibles de obtener (figura 4.1) por algún otro método (por ejemplo, materiales con porosidad controlada).

La pulvimetalurgia se considera un proceso amigable con el ambiente ya que permite la obtención de elementos metálicos sin necesidad de fundir el material, con el consiguiente ahorro de energía; por otra parte, es factible producir las piezas prácticamente en su forma y dimensiones finales sin necesidad de procesos de maquinado, lo cual reduce también el consumo de energía y de materias primas.

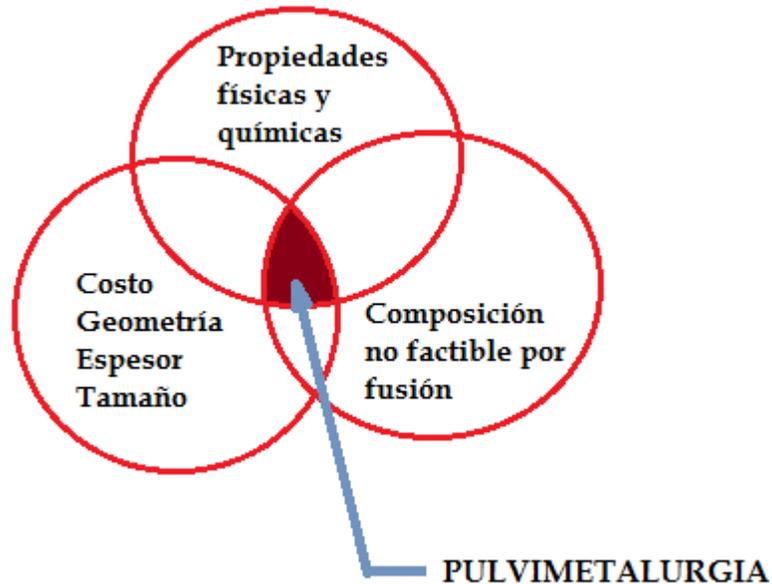


FIGURA 4.1 La metalurgia de polvos es adecuada para fabricar piezas pequeñas en composiciones imposibles de obtener por fusión

Lo más usual es la técnica de compactado y sinterizado (*press and sinter*) que permite obtener geometrías complejas en aleaciones difíciles de fundir (figura 4.2); caso particular es la de inyección de metal, donde los polvos metálicos muy finos (menos de 20 micras) son mezclados con un agente aglomerante para ser inyectados en un molde similar a los de fundición para, posteriormente, por calentamiento eliminar el agente ligante y dar mayor tenacidad a la pieza (en general, por este método se producen piezas muy pequeñas –de unos cuantos gramos–).

El compactado por presión isostática (*hot isostatic pressing*) es utilizado para piezas grandes que se van a producir en lotes pequeños (no más de 10 000 piezas/año). Es un proceso lento y costoso empleado para cualquier tipo de geometría y metales difíciles de trabajar por pulvimetalurgia. Por último, se tiene el proceso de forja de polvos (*powder forging*) en el que el polvo es cargado en una matriz con una geometría aproximada a la de la pieza que se va a producir, el compactado verde es sinterizado y empleado, posteriormente, como una preforma en un proceso de forja (por este método se producen, por ejemplo, bielas con una alta precisión dimensional y propiedades mecánicas excepcionales).



FIGURA 4.2 Diferentes piezas producidas por pulvimetalurgia [Taiwan Chu Shiang Industry]

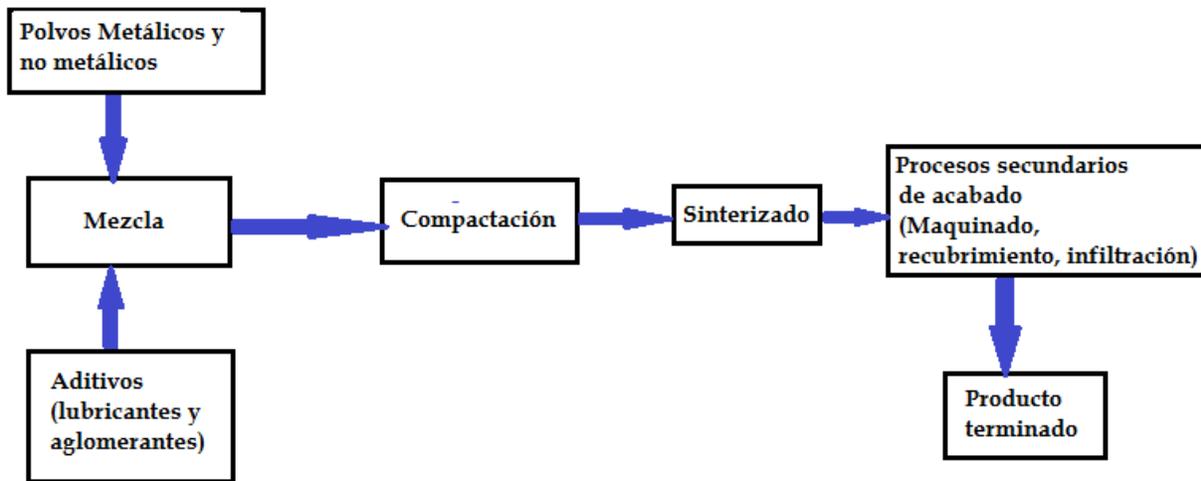
4.2 PROCESO DE PULVIMETALURGIA

El proceso de producción de piezas a partir de polvos consiste en varias etapas (figura 4.3), cuyas características dependerán de los elementos que van a producirse.

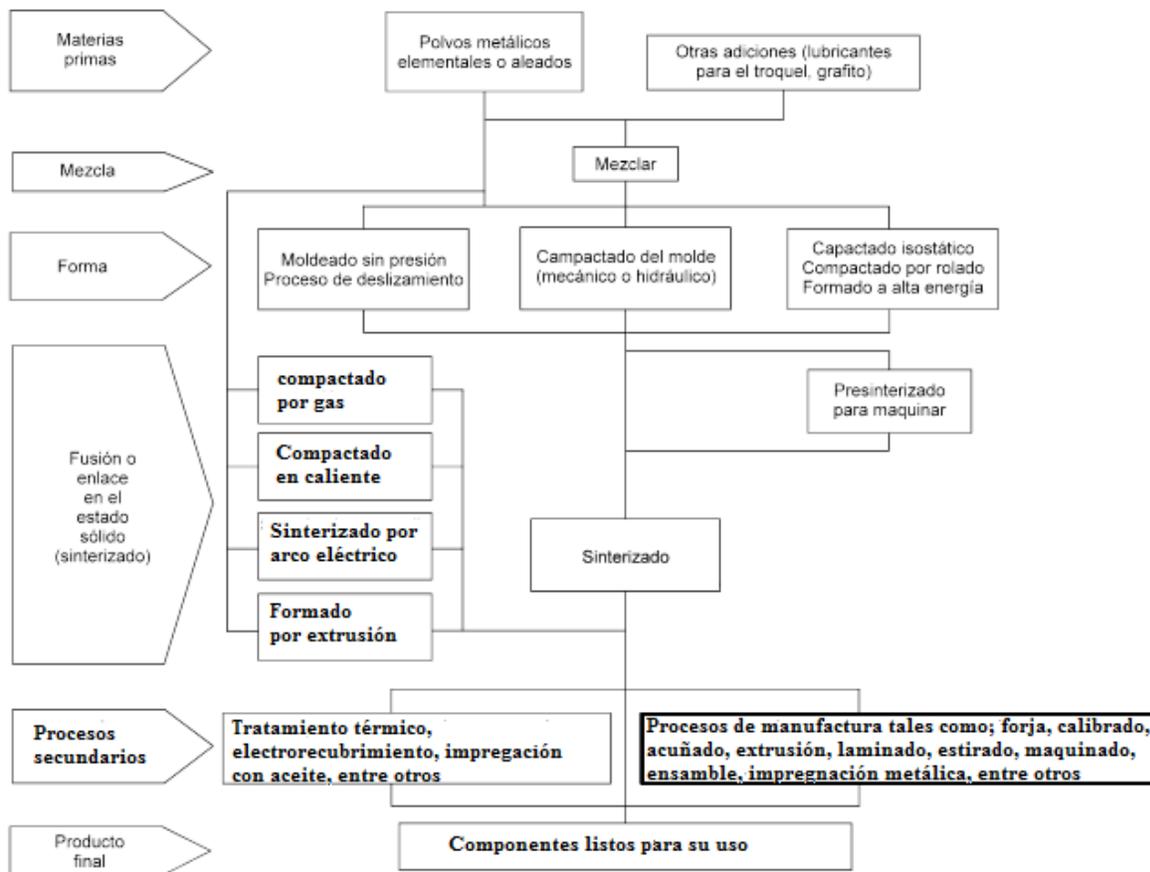
La primera etapa del proceso consiste en fabricar el polvo. El comportamiento de este durante su procesamiento, así como las propiedades del producto final, van a estar determinadas por características básicas del polvo, como el tamaño y la forma de la partícula, la distribución de tamaño, la microporosidad y microestructura. Estas características se pueden designar como primarias y tendrán influencia en propiedades cuyo control es común a nivel industrial, por ejemplo: densidad (densidad aparente, densidad de polvo vibrado), velocidad de derrame, compresibilidad, plasticidad, capacidad de endurecimiento, entre las más conocidas.

La forma de la partícula influye de manera determinante en las características del empaquetamiento y flujo de los polvos. Las partículas de forma esférica tienen excelentes cualidades de sinterizado y proveen características uniformes al producto; sin embargo, en la práctica se ha demostrado la conveniencia de emplear polvos de geometría irregular.

Tamaño y distribución. El tamaño de la partícula queda definido por su diámetro si son partículas esféricas, pero si son partículas irregulares, este se define por su diámetro medio. En virtud de la baja posibilidad de obtener partículas de tamaño uniforme, es práctica común analizar la distribución de tamaños. Estas características influyen durante el compactado y sinterizado.



(a)



(b)

FIGURA 4.3 (a), (b) Descripción esquemática del proceso de pulvimetalurgia

Etapas del proceso Las principales etapas que generalmente constituyen un proceso de pulvimetalurgia (figuras 4.3 y 4.4) son:

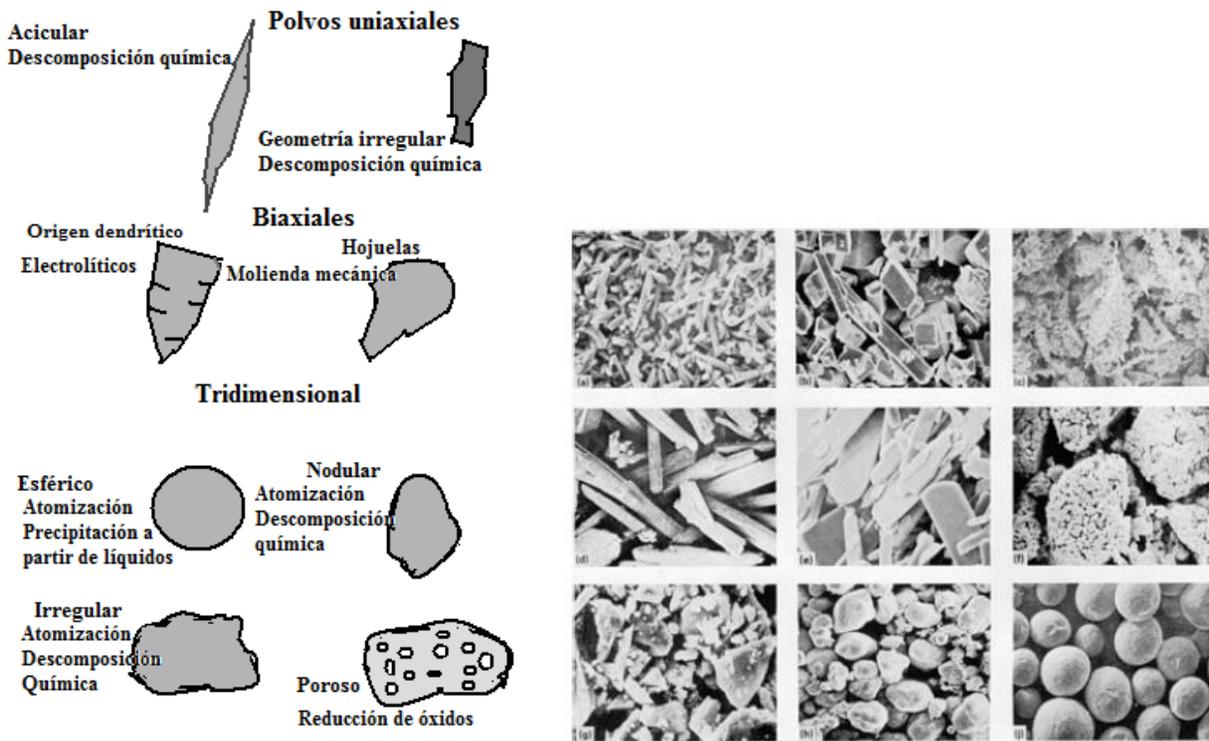
- Obtención de polvos:* Está en función del tipo de metal y de las características requeridas; los procesos más comunes son la atomización, la reducción química, el depósito electrolítico y la trituración mecánica.
- Tratamiento de los polvos:* Operaciones de purificación, recubrimiento, densificado, mezclado y recocido.
- Obtención de la forma requerida:* La operación de moldeo normalmente se efectúa por compresión, lo cual se puede combinar con calentamiento del molde, aunque generalmente se realiza a temperatura ambiente.
- Sinterizado:* En esta operación, los aglomerados verdes, o sea, aquellos compactados que aún no han sido sinterizados son sometidos a calentamiento a una temperatura menor a la de fusión, lo cual provoca un marcado incremento en la tenacidad y resistencia de la pieza.
- Operación de acabado:* En función de las características y aplicaciones de la pieza, se pueden presentar una gran variedad de operaciones secundarias, entre las cuales se encuentran la impregnación, el tratamiento térmico, el calibrado, el maquinado, electrodeposición e infiltración.



FIGURA 4.4 Proceso de pulvimetalurgia

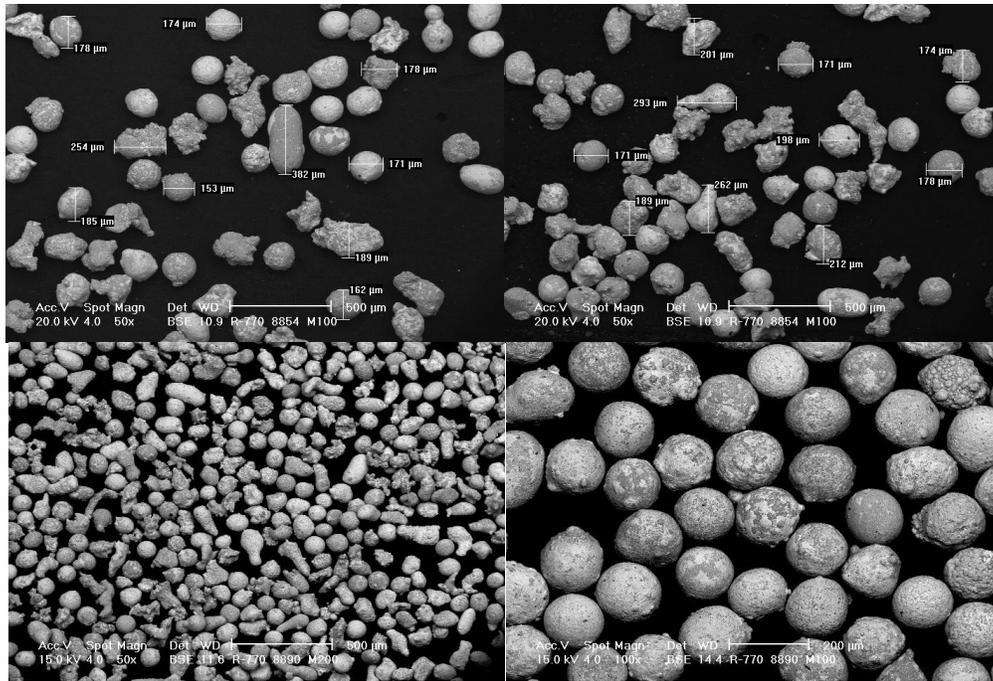
Compactado (Obtención de la forma requerida). Esta etapa tiene como finalidad dar forma y consistencia necesaria para que la pieza pueda ser manipulada. Aun cuando la mayoría de las ocasiones el compactado se realiza a temperatura ambiente, existen algunas aplicaciones en las que el formado se realiza en caliente.

La forma (figura 4.5) y dimensiones del compactado deberán estar tan cerca como sea posible de las dimensiones finales; y se tendrá en consideración los cambios volumétricos que resulten del sinterizado, la densidad dependerá de la presión de compactado (figura 4.6).



(a)

FIGURA 4.5 (a) Geometría de los polvos de acuerdo con la norma ISO 3252



(b)

FIGURA 4.5 (b) Diversas geometrías de polvos de CuPb. En la figura inferior de la izquierda se tiene geometría irregular y del lado derecho la forma es aproximadamente esférica [Udiatem FI]

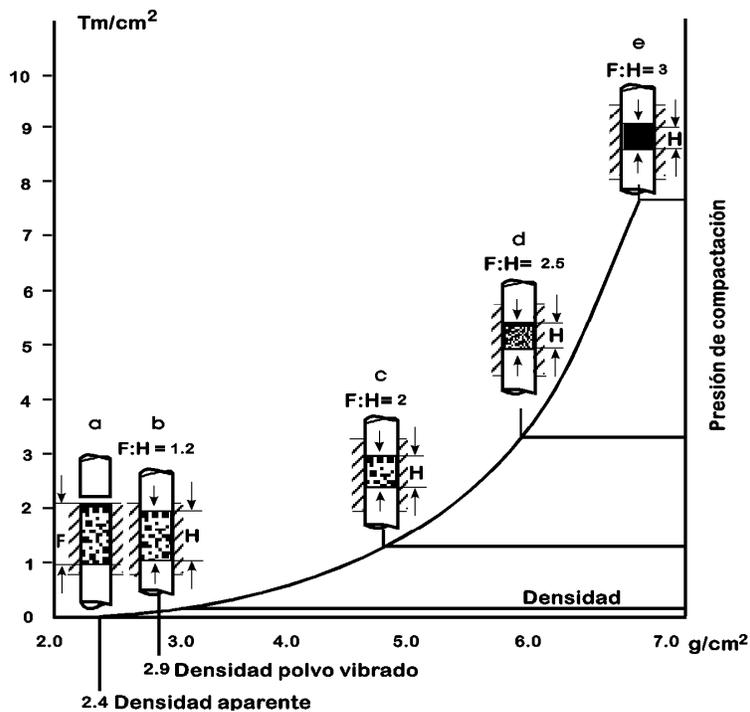


FIGURA 4.6 Curvas de compresibilidad (Densidad vs. Presión)

Compactado por troquel. Es el proceso más ampliamente usado; consiste en la aplicación de presión mediante un punzón, al material en polvo, el cual se encuentra contenido en una matriz o troquel de la forma y dimensiones requeridas. En la compactación se distinguen claramente tres fases: llenado, compresión y expulsión (véase la figura 4.7).

En la fase de llenado el material se deposita en la cavidad de la matriz; la cantidad de polvo se determina por peso o por volumen, y se controla automáticamente.

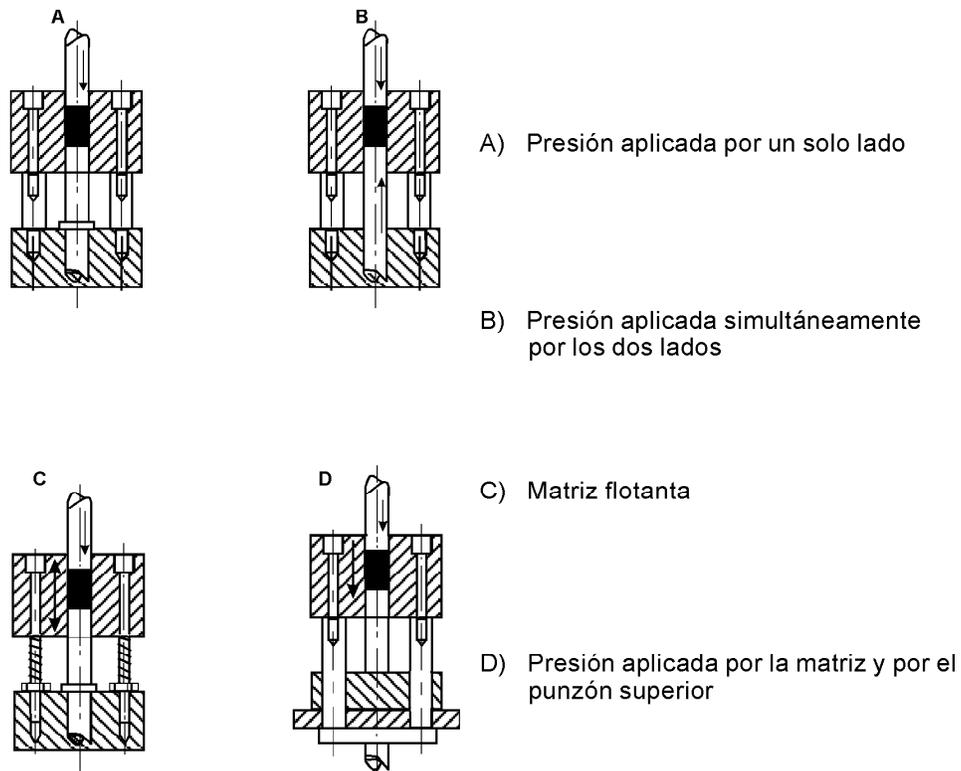


FIGURA 4.7 Distintos métodos de compactado en matriz

Sinterizado

Esta etapa consiste en calentar la pieza previamente formada hasta una temperatura inferior a la de fusión de la mayoría de los componentes de la mezcla o aleación, resultando un notable incremento de la resistencia mecánica y en la tenacidad del producto.

El proceso se puede clasificar en dos grupos, dependiendo de los mecanismos que producen la aglomeración (figura 4.8):

- a) Procesos en los que la temperatura de sinterizado es inferior a la temperatura de fusión de todos los componentes; por tanto, la aglomeración se obtiene por difusión y crecimiento de grano. Como ejemplo se tiene el sinterizado de metales de alto punto de fusión, como el tungsteno y las aleaciones de níquel (figura 4.9).
- b) La temperatura de calentamiento es mayor a la temperatura de fusión de algunos de los componentes, lo cual da como resultado la infiltración del material fundido entre las partículas del otro, aleándose en su superficie y produciendo así una unión metálica continua. En general, esto se lleva a cabo cuando se trabajan materiales de punto de fusión muy diferentes, como es el caso de las aleaciones cobre-estaño y los carburos cementados (figura 4.10).

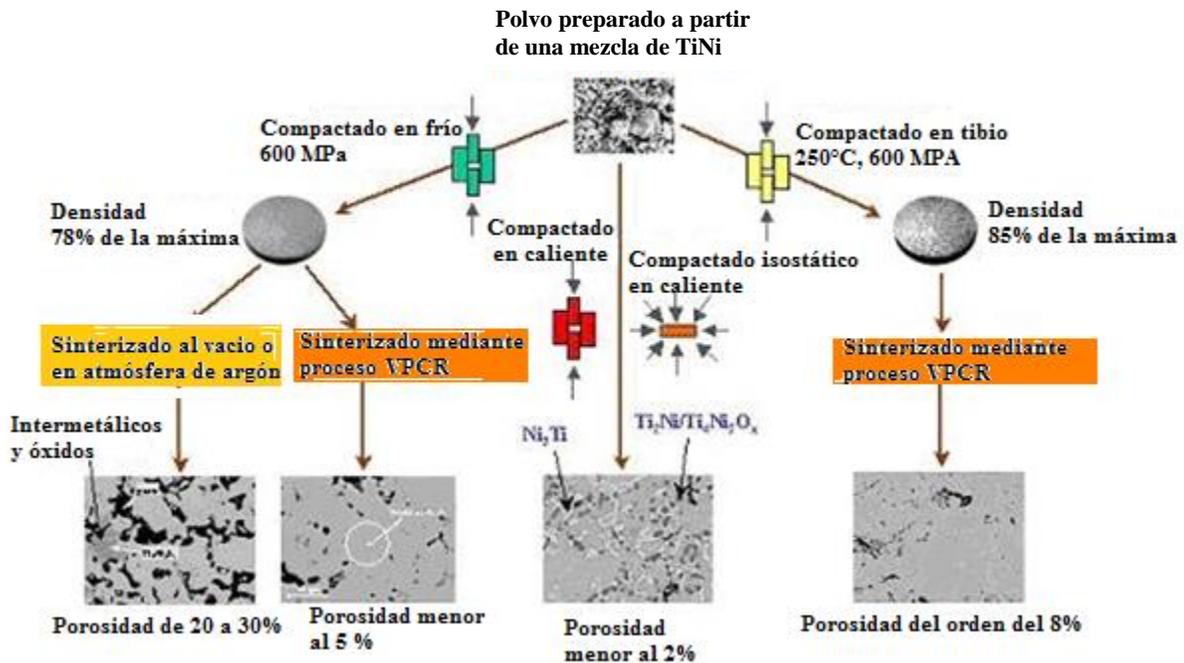


FIGURA 4.8 Diferencias resultantes por efecto del método de procesamiento

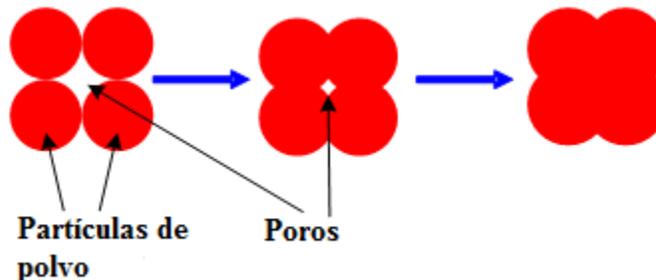


FIGURA 4.9 Descripción esquemática del efecto de sinterizado en los granos de la mezcla [www.substech.com]

Características del proceso. Los principales parámetros del proceso son la temperatura y el tiempo de sinterizado; estos parámetros varían considerablemente, dependiendo del material tal y como se puede observar en la tabla 4.1.

TABLA 4.1 Condiciones de sinterizado de diversos materiales

Material	Temperatura °C	Tiempo (min)
Bronce	825	15
Cobre	850	25
Latón	850	25
Hierro-Grafito	1050	25
Níquel	1100	35
Ferritas	1400	60
Material pesado	1500	60
Metal duro	1450	30
Molibdeno	2050	120
Tungsteno	2350	480
Tantalo	2400	480

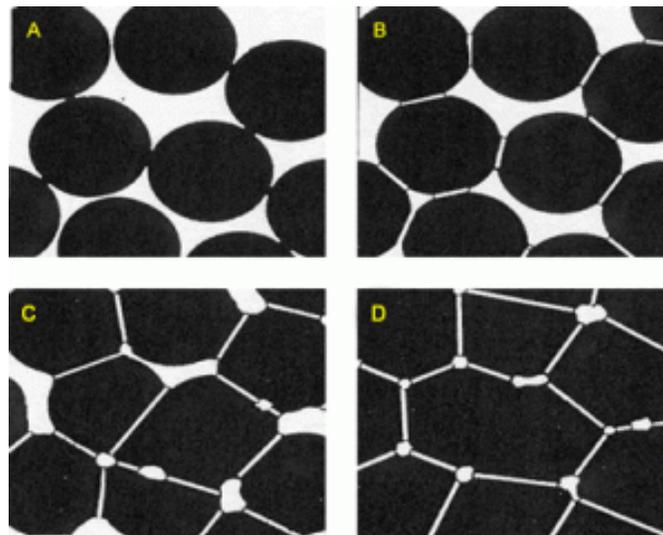


FIGURA 4.10 Efecto del tiempo en el aglomerado de los polvos durante el sinterizado

Regularmente la temperatura de sinterizado es de $2/3$ a $4/5$ de la temperatura de fusión en escala absoluta. En general, la atmósfera de trabajo debe ser altamente reductora para evitar la oxidación de los polvos y eliminar los óxidos que ya se hubieran formado, asegurando así una fuerte unión entre las partículas del metal (figura 4.11).



FIGURA 4.11 Horno de sinterizado

Descripción de los mecanismos que dan lugar al enlace:

En el proceso de sinterizado se distinguen tres etapas:

- Las áreas de contacto de las partículas aumentan ya que estas se sueldan íntimamente y los límites de grano permanecen fijos.
- Se presenta crecimiento de grano, lo cual produce pequeños incrementos en la densidad y, por lo tanto, pequeños decrementos en las dimensiones del producto.
- Aparecen poros aislados debido a la coalescencia de las partículas, las cuales tienden a redondearse; los cambios dimensionales y de densidad son casi imperceptibles.

La unión entre las partículas del polvo normalmente se logra a través de mecanismos de movimiento de masa (difusión), teniendo también efecto la pura unión mecánica.

Operaciones suplementarias y de acabado

Cuando se requiere una gran precisión dimensional en el producto y obtener ciertas propiedades en este, es práctica común efectuar operaciones posteriores al sinterizado o en una etapa intermedia de este. Las operaciones pueden ser de calibrado, mecanizado, infiltrado, tratamiento térmico, limpieza y pulido, entre otras.

Calibrado. Consiste en la aplicación de presión posterior al sinterizado, con el fin de obtener tolerancias muy precisas. La operación se efectúa a temperatura ambiente, lo que permite ajustar las propiedades del material. En general, esta etapa demanda una presión mayor a la de compactado.

Mecanizado. Cuando la configuración de la pieza es compleja, puede ser necesario su maquinado. Una de las ventajas que comúnmente se mencionan con respecto a la pulvimetalurgia es la de evitar el mecanizado, razón por la que dicha etapa podría parecer contradictoria, sin embargo, esta operación amplía las posibilidades del diseño y mejora el acabado superficial, al eliminar la porosidad y permitir así el recubrimiento electrolítico.

Tratamiento térmico. Los productos de pulvimetalurgia pueden ser sometidos a tratamientos térmicos convencionales (temple, recocido, revenido, etc.), con los mismos fines que para una pieza fabricada con un procedimiento tradicional. Existen diferencias en la práctica del tratamiento térmico, debidas principalmente a la inherente porosidad del producto; por esta razón no se pueden emplear baños de sales; se requiere calentar en una atmósfera inerte, el calentamiento deberá ser más lento y el enfriamiento más rápido para lograr efectos similares.

Infiltración. Este proceso tiene por finalidad llenar los poros internos del producto, densificándolo y mejorando sus propiedades mecánicas o de antifricción; lo anterior dependerá de la sustancia infiltrante. En los cojinetes autolubricados, la impregnación de aceite se puede lograr sumergiendo las piezas en un recipiente con aceite caliente o, también, generando un vacío por un lado y aplicando aceite a presión por el otro. En el caso de infiltración metálica, como las aleaciones antifricción (Pb, Babbit), el material poroso se coloca en contacto con el infiltrante y el conjunto se calienta a una temperatura que permite la fusión y la absorción, por capilaridad, a través de la matriz porosa.

Recubrimiento electrolítico. Los procesos convencionales de electrodeposición pueden ser aplicados, casi de igual forma, en productos de pulvimetalurgia, aunque la porosidad de estos provoca inconvenientes que no se presentan en materiales convencionales.

Para evitar que el electrolito quede atrapado, lo cual causaría una oxidación interna posterior, se suele recubrir la superficie con resinas o sustancias plásticas.

Soldadura. Aunque es posible unir mediante soldadura piezas de pulvimetalurgia, sólo se recomienda dicho proceso cuando no existe otra opción mejor y se tiene cuidado de usar como materiales de aporte aquellos de carácter semejante a los de la base.

En general, se evita la unión entre materiales de alta capilaridad ya que esto podría hacer fracasar el ensamble, debido a la infiltración del material soldante; en el caso de que se deban soldar piezas de pulvimetalurgia, será conveniente que estas se encuentran muy compactadas.

Otros procesos. Existen varios procesos de acabado que son de aplicación particular, como el pavonado, el recubrimiento mecánico etc. También es posible la forja de preformas sinterizadas, lo cual abre nuevas y muy amplias perspectivas al proceso. En el caso de la forja, más que un proceso de acabado se puede considerar como parte modular de la fabricación, pues da como resultado ventajas significativas en las propiedades mecánicas del producto.

4.3 CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO, VENTAJAS Y APLICACIONES

Diseño de piezas para metalurgia de polvos

Para especificar la configuración de una pieza que será obtenida por pulvimetalurgia se deberán considerar las condiciones bajo las que el polvo se conforma en la matriz.

Dado que la presión no se distribuye de manera hidrostática y que el material no fluye libremente, se evitarán entonces las esquinas afiladas y las piezas de gran longitud y reducida sección transversal; se debe considerar también que los cambios bruscos de sección dan lugar a una densidad no uniforme. Además de lo anterior, será necesario tomar en cuenta también las limitaciones inherentes al propio equipo, por ejemplo:

Carrera del pistón y su accionamiento (normalmente vertical), la capacidad máxima de compactado y la sección transversal máxima del herramental.

Además de las restricciones mencionadas en un principio, en la práctica se han definido también otras como son:

- a) Las paredes de espesor variable no deberán presentar valores inferiores a 0.8 mm; si son de espesor constante no deberán ser menores a 1.5 mm.
- b) Se evitarán escalonamientos en la pieza, en caso de que la presencia de estos sea necesaria se producirán por un maquinado posterior.
- c) Las esquinas deberán ser redondeadas.
- d) Se evitarán las ranuras angostas y de gran profundidad.
- e) Se considerará una pequeña conicidad para facilitar la extracción de la pieza.

Las ranuras o acanaladuras perpendiculares a la dirección de compactado se evitarán en lo posible.

Ventajas y desventajas del proceso

Las particularidades del proceso de pulvimetalurgia dan lugar a una serie de interesantes ventajas como son:

- a) Elevada eficiencia en el empleo de la materia prima, ya que en la mayoría de los casos sólo se usa la cantidad requerida para alcanzar la densidad y dimensiones finales.
- b) Control exacto de la composición.
- c) Posibilidad de automatizar.
- d) Obtención de buenos acabados superficiales.
- e) Única técnica que permite obtener porosidad controlada.
- f) Presencia de segregación se evita.
- g) Aglomeración de materiales con alto punto de fusión sin tener que alcanzar dicha temperatura.
- h) Posibilidad de producir aleaciones que mediante fundición serían imposibles, como es el caso de que las temperaturas de fusión de los componentes difieran mucho entre sí, o en el caso de metales con comportamiento muy disímulo, o el de mezclas de metales con otros materiales de carácter no metálico.
- i) Tolerancias del orden de 0.05 mm (0.002 pulg), las cuales por ser muy precisas pueden reducir o incluso evitar el maquinado posterior.

- j) Modificación o adecuación de las propiedades del producto a través de una serie de operaciones complementarias como las mencionadas en el punto de operaciones suplementarias y de acabado.

Las desventajas y limitaciones fundamentales del proceso son las siguientes:

- a) En virtud de que la presión no se transmite de manera uniforme, se pueden presentar problemas de heterogeneidad en la compactación y, por tanto, en la densidad y resistencia.
- b) En relación con lo anterior, el proceso se aplica básicamente para piezas pequeñas, aunque se han llegado a producir en serie piezas con un peso de más de 20 kg, esto mediante compactado en troquel.
- c) Es necesario que las piezas en verde se manipulen con gran cuidado, debido a su relativa fragilidad.
- d) El costo del herramental (matrices) es muy alto, razón por la cual el método queda circunscrito a grandes volúmenes de producción.
- e) Las operaciones de producción de los polvos son en general complicadas, lo cual se traduce en un elevado costo. Otra desventaja es la referente al cuidado que se debe tener en el manejo de los polvos en el almacenado y manipulación, ya que se oxidan más fácilmente que en estado sólido y en ocasiones pueden resultar explosivos, como es el caso del aluminio.
- f) La forma de las piezas debe ser normalmente sencilla para facilitar la extracción de la matriz.

Aplicaciones de la pulvimetalurgia

Las técnicas de metalurgia de polvos se utilizan para producir piezas de metales refractarios, metales compuestos, metales porosos y combinaciones de metal con no metal. Las principales líneas de trabajo son:

- a) Obtención de cojinetes autolubricados. Un cojinete de bronce sinterizado, con un 30% de porosidad, contará con suficiente reserva de lubricante para toda su vida útil, también se fabrican cojinetes con tetrafluoretileno.
- b) Preparación de pseudoaleaciones de metales con punto de fusión muy diferente, por ejemplo, Cu-W, Ag-W, y Ag-Mo, las cuales se emplean en contactos eléctricos. La aplicación de pseudoaleaciones en tales contactos permite combinar la conductividad eléctrica del cobre y de la plata con la resistencia al desgaste y a las elevadas temperaturas del tungsteno y el molibdeno.

- c) Fabricación de filtros metálicos tanto para combustibles como para agua y sustancias químicas en general; dependiendo de la aplicación, se fabrican de aceros inoxidables, bronce, monel, etcétera. Este tipo de filtros se usan cuando se requiere una buena resistencia mecánica con una excelente resistencia a la corrosión, como los utilizados para diésel y freón en los sistemas de refrigeración.
- d) Preparación de insertos en corte y dados para estirado a partir de mezclas de carburo de tungsteno-cobalto, níquel u otros de características similares.
- e) Aglomeración de metales refractarios, como el tungsteno, molibdeno, tantalio y niobio, a los cuales, debido a su muy alta temperatura de fusión, no es conveniente darles forma por moldeo.
- f) Fabricación de pequeños núcleos magnéticos de alta calidad.
- g) Herramientas para la remoción de material, formados con diamantes industriales embebidos en una matriz metálica.
- h) Formación con una alta precisión de pequeños engranes sin necesidad de maquinado posterior.
- i) Producción de imanes permanentes alnico.
- j) Consolidación de metales como el berilio en los cuales se obtienen mejores características por este método.

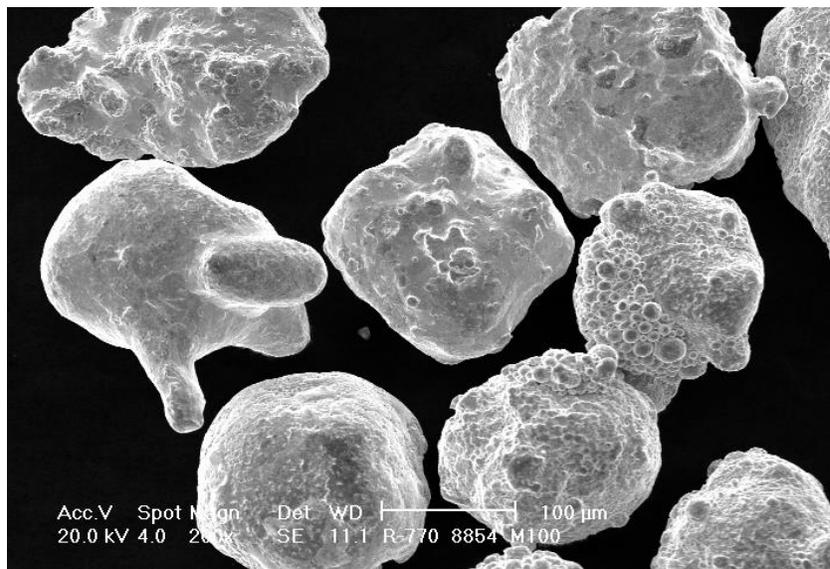


FIGURA 4.10 En la micrografía se observa que muchas de las partículas de polvo están formadas por la unión de otras mucho más pequeñas [Udiatem FI UNAM]

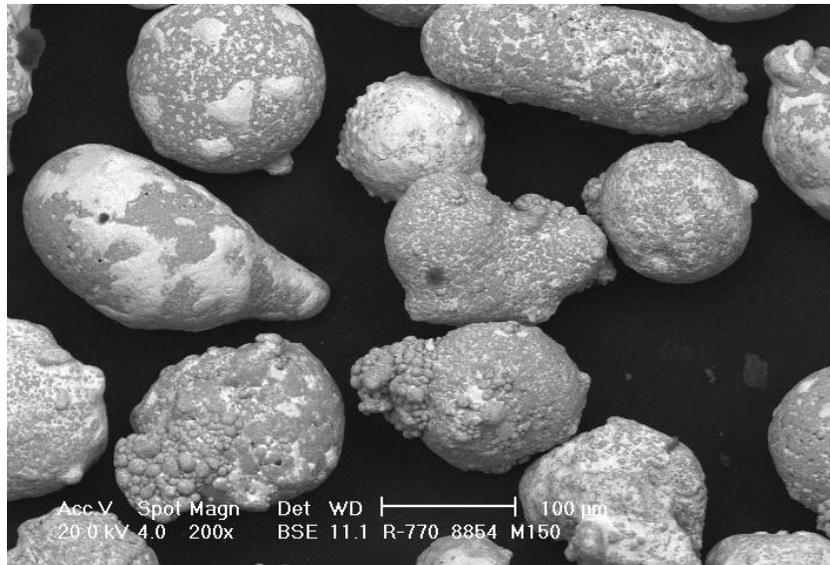


FIGURA 4.11 Dada la baja solubilidad en estado sólido, el cobre y el plomo se separan durante la solidificación dando como resultado una matriz de cobre (tonalidad más oscura) sobre la cual se deposita el plomo [Udiatem FI UNAM]

4.4 PROPIEDADES DE LOS PRODUCTOS DE METALURGIA DE POLVOS

Como ya se ha mencionado, una característica intrínseca de los productos de PM es su porosidad, la cual (de acuerdo con su magnitud y tipo) afectará en mayor o menor medida a sus propiedades mecánicas. Las constantes elásticas del material como el módulo de elasticidad, coeficiente de compresibilidad o coeficiente de Poisson dependen del grado de porosidad y también de la forma en que esta se distribuye. Por ejemplo, en el caso del módulo de elasticidad, Beiss [P. Beiss, C. Sander, "Elastic Properties of Sintered Iron and Steel, Proceedings of the 1998". *Powder Metallurgy World Congress*, European Powder Metallurgy Association] demostró que $E/E_0 = [\rho/\rho_0]^m$, donde E representa el módulo de elasticidad para una densidad ρ (densidad de sólido), E_0 , y ρ_0 representan las condiciones para un producto de pulvimetalurgia con un cierto nivel de porosidad y m representa el efecto de la morfología y distribución del poro, este índice se encuentra entre 2.5 y 4.5 [W. Brian James, *Powder Metallurgy Methods and Applications*, ASM International, Vol. 7]. Curiosamente, en los aceros en un rango de densidad relativa de 6.4 a 7.4, esta relación es aproximadamente lineal (figura 4.12).

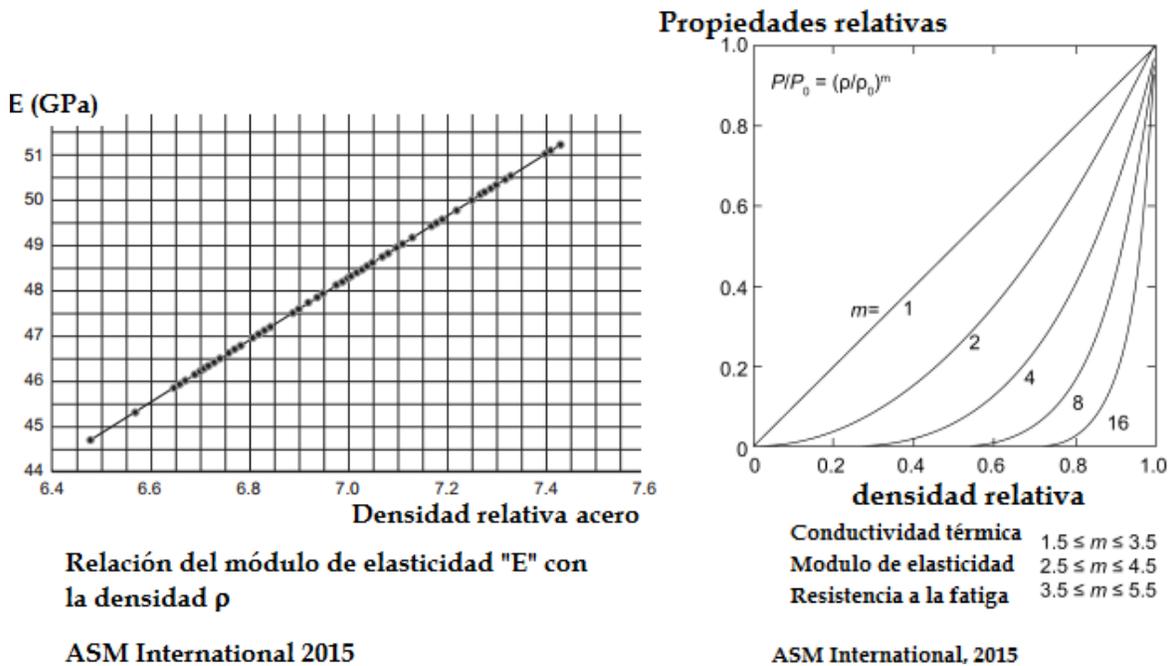


FIGURA 4.12 Comparación de las propiedades del compactado y la densidad

4.5 FUTURO DE LA PULVIMETALURGIA

La sustentabilidad y la responsabilidad con el medio ambiente son dos paradigmas bajo los cuales se desarrollarán empresas y procesos durante el siglo XXI, en este aspecto mucho será lo que la pulvimetalurgia tiene que aportar. Cada vez, las aplicaciones del proceso son más amplias, ya que, si bien al inicio de los noventa el tamaño máximo de las piezas, producidas por este método, eran del orden de los 500 kg, actualmente, este límite se ha incrementado por arriba de las seis toneladas. Esto representa que cada vez se cuenta con prensas de mayor capacidad y, por consecuencia, el tipo de piezas a producir es más amplio; por otra parte, el 85% de los materiales utilizados como materia prima proviene del reciclado y se tiene que en la pulvimetalurgia se tiene una eficiencia mayor al 95% con respecto al material utilizado en el proceso. Al no requerir la fusión de las piezas, el consumo de energía y, por consecuencia, la huella de carbono característica se reduce drásticamente con relación a los procesos que involucran fusión en alguna etapa del proceso. No obstante, la gran eficiencia del proceso se puede relacionar con la posibilidad de producir piezas con tolerancias tales que no demanden maquinado, de esta forma, se reduce el consumo de energía y se evita el empleo de lubricantes y fluidos de corte. Es por

tanto que la pulvimetalurgia se caracteriza por una reducción en el consumo de materias primas y de energía, consecuencia de lo cual su posicionamiento en el mercado, sobre todo en la producción de piezas de geometrías complejas y de materiales con temperaturas de fusión superior a los 1000 °C, será cada vez mayor desplazando a procesos tradicionales como la forja y la fundición.

De acuerdo con el reporte de *“Powder metallurgy market trends, Global industry Analysts Inc”*, en el periodo comprendido entre el 2015 a 2020, la demanda de polvos metálicos y no metálicos, así como la producción de piezas a partir de estos, será creciente alrededor del mundo, sobre todo impulsada por las industrias automotriz y aeroespacial.

Para 2020, se espera que la producción de polvos alcance un valor de 9800 millones de dólares, con un monto del orden de 15700 millones de dólares ya en piezas manufacturadas. Las posibilidades de la pulvimetalurgia se han incrementado sensiblemente a partir de la aplicación de técnicas de manufactura aditiva para la producción de piezas, que se fabrican directamente de los archivos digitales mediante sinterización por láser, entre otros métodos. Es por tanto que se puede concluir que los alcances y la participación en el mercado de los procesos a partir de polvos tenderá a crecer de manera muy importante durante la primera mitad de este siglo.

CAPÍTULO 5

CONFORMADO MECÁNICO DE LOS METALES

5.1 GENERALIDADES DE LOS PROCESOS DE DEFORMACIÓN PLÁSTICA

Existen diversas formas de clasificar los procesos de conformado mecánico de los metales; esta se puede realizar en función del endurecimiento, nivel de deformación, materia prima, etapa del proceso, entre otras. Si se considera la etapa, se puede hablar de procesos primarios y secundarios o de acabado; en el caso de tomar como base el nivel de acritud producto de la deformación, se pueden referir a procesos en caliente, en frío y en tibio, si se toma en cuenta la materia prima se pueden referir a procesos de deformación volumétrica y procesos de trabajo en chapa. Al final de cuentas, todo método se puede relacionar con la etapa y los gradientes de deformación que se tienen; a elevadas temperaturas (procesos primarios o en caliente) se presentan fenómenos de recristalización dinámica que permiten grandes porcentajes de deformación con un bajo consumo de energía, a la vez de tolerancias abiertas y acabados superficiales de limitada calidad.

Por otra parte, los procesos de acabado o secundarios, en general, se producen en frío y se caracterizan por menor deformación por etapa y acumulada, lo cual redundará, en muchas ocasiones, en la necesidad de recocidos intermedios. Estos procesos muchas veces se realizan en lámina y al efectuarse a temperatura ambiente permiten mejores acabados y tolerancias más cerradas.

Se tiene entonces:

- a. *Trabajo en caliente.* La temperatura de proceso θ_p es mucho mayor que la de recristalización $\theta_p \geq 0.75\theta_f$ (θ_f es la temperatura de fusión en K). Es por consecuencia que existirá recristalización dinámica, permitiendo así grandes deformaciones, aunadas a menores cargas (figura 5.1).



FIGURA 5.1 Forja abierta en prensa de bastidor abierto

- b. *Trabajo en frío.* En este caso la deformación se realiza a temperaturas menores de la de recristalización, siendo lo más usual a temperatura ambiente $\theta_p \approx \theta_a$. Se tendrá con esto una mayor precisión dimensional a la vez de permitir el control de las propiedades mecánicas. Resulta por demás evidente que las deformaciones por etapa y acumuladas serán menores, ya que de otra forma se requerirá de recocidos intermedios (figura 5.2).

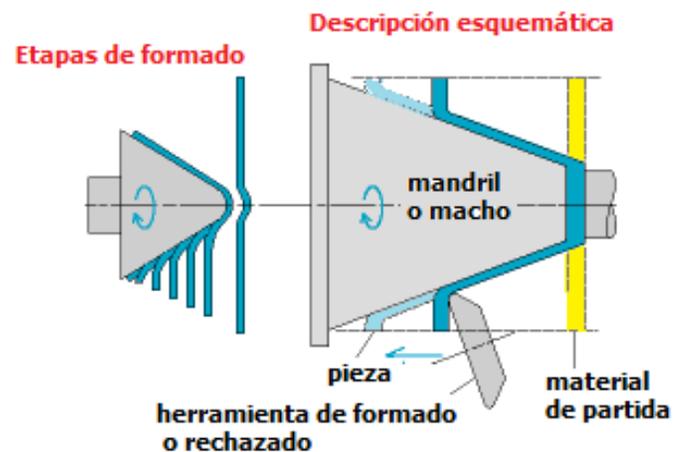


FIGURA 5.2 Proceso de rechazado de chapa metálica

- c. *Trabajo en tibio.* En este caso, la deformación se realiza a temperaturas mayores al ambiente, las cuales pueden ser aún del orden de la de recristalización; sin embargo, las velocidades de deformación (por consecuencia de endurecimiento) son superiores a los fenómenos de recristalización dinámica.

Por otra parte, considerando el nivel de deformación y las características de los procesos se clasifican en:

- a. *Procesos primarios*. Estos se realizan en caliente y se caracterizan por grandes deformaciones. Los productos obtenidos se caracterizan por, usualmente, requerir todavía de procesos adicionales para convertirse en elementos útiles.
- b. *Procesos de acabado*. Se caracterizan por menores deformaciones que permiten obtener elementos útiles.

Asimismo, también se pueden clasificar en:

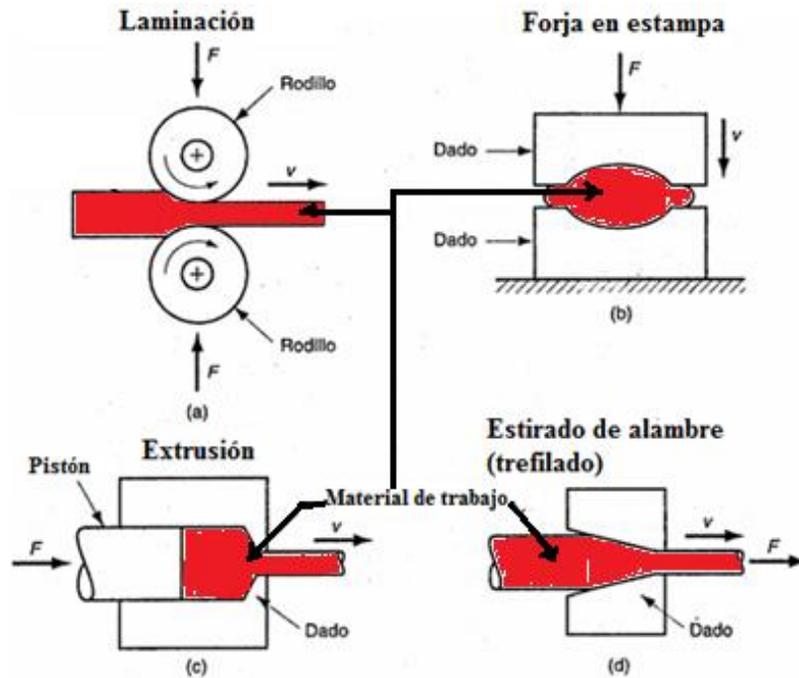
Procesos de deformación volumétrica

Se caracterizan por deformaciones y cambios de forma significativos, todo lo cual corresponde con los procesos primarios de deformación. En general, la relación entre el área superficial y el volumen de trabajo es relativamente pequeña. El término volumétrico describe a las partes de trabajo que tiene esta limitada relación de área volumen. La forma del trabajo inicial para estos procesos incluye tochos cilíndricos y barras rectangulares. Las operaciones básicas en deformación volumétrica (figura 5.3), se pueden clasificar en:

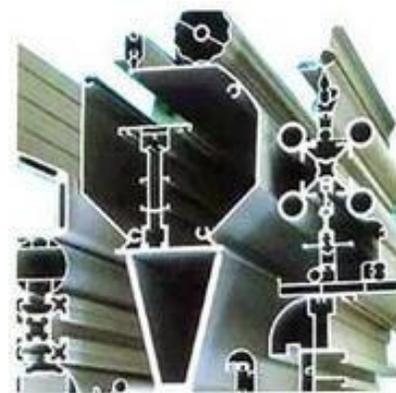
- *Laminación*. Es un proceso de deformación por compresión directa, en el cual el espesor del lingote se reduce al pasar a través de dos rodillos que giran en sentido opuesto, y cuya separación es menor que el espesor inicial del rodillo. Este proceso se puede realizar tanto en frío como en caliente, figura 5.3(a).
- *Forja*. En este caso, el material se deforma entre dos dados, de tal manera que la forma del dado se imprima para obtener la geometría deseada (forja en estampa). En algunos casos los dados tienen geometrías simples refiriéndose al proceso como forja libre. En virtud de las grandes deformaciones, característica del proceso, este se realiza en caliente; sin embargo, cuando se pretende calibrar las dimensiones se realizará en frío, figura 5.3(b).
- *Extrusión*. Proceso de compresión indirecta en el cual el metal se hace fluir a través de la abertura de un dado para que adquiera su geometría. El proceso se realiza en caliente con excepción de su aplicación en metales suaves en donde la longitud del perfil obtenido es del orden de su diámetro. El proceso se caracteriza por permitir la producción de piezas de sección transversal constante con un costo mínimo de

herramental; esto aunado a la factibilidad de generar secciones transversales imposibles de producir por laminación, figura 5.3(c).

- *Estirado*. En este proceso, el diámetro de un alambre o barra se reduce cuando este se hace pasar por efecto de una fuerza de tracción a través de la abertura de un dado. En este caso, la deformación se produce por cargas de compresión indirecta en el dado, inducidas por la carga de tracción aplicada, figura 5.3 (d).



(e)



(f)

FIGURA 5.3 Procesos de deformación volumétrica. (a) laminación, (b) forja en matriz, (c) extrusión, (d) estirado, (e) formador de lazo durante la laminación de barras de refuerzo para construcción, (f) diferentes perfiles obtenidos por extrusión de aluminio

Procesos en chapa (láminas metálicas)

Se trata generalmente de procesos de acabado. Por las características inherentes al propio material se tiene que la relación entre el área superficial y el volumen del material es alta; por lo que esta relación es un medio útil para diferenciar la deformación volumétrica de los procesos con láminas metálicas. En este rubro se encuentran las operaciones donde la deformación que se realiza es por corte, flexión y dobléz. Es común referir a este tipo de procesos como estampado de chapa metálica (figura 5.4). Se pueden referir a operaciones de troquelado, punzonado, embutido, acuñado, rolado, entre otras.



FIGURA 5.4 Los diferentes elementos que forman la carrocería de un automóvil se producen a partir de chapa metálica. Diseño híbrido de la carrocería, el frente (azul) corresponde a los componentes producidos en aluminio. Este diseño es utilizado por BMW en su serie 5 (fuente BMW)

Las operaciones con láminas metálicas se ejecutan siempre en frío y en el caso de operaciones de troquelado se utiliza un juego de herramientas llamadas punzón y matriz. El punzón es la porción positiva y el dado es la porción negativa del juego de herramientas. Las operaciones básicas con láminas de metal se describen en la figura 5.2 y entre otras se puede mencionar a las siguientes:

- *Doblado*. El doblado implica la deformación de una lámina metálica o placa para que adopte un ángulo con respecto a un eje recto, en la mayoría de los casos, figura 5.5 (a).
- *Embutido (estirado)*. En el trabajo de láminas metálicas, el embutido se refiere a la transformación de una lámina de metal en una forma hueca o cóncava. Se usa un

sujetador o pisador para mantener fija la plantilla, mientras el punzón empuja la lámina de metal, como se muestra en la figura 5.5 (b). En términos generales, se considera que el espesor de la lámina no se modifica durante el proceso de deformación. En este proceso, la deformación se genera por efecto de las cargas de tracción producto de la acción de estirado del punzón con relación a la matriz.

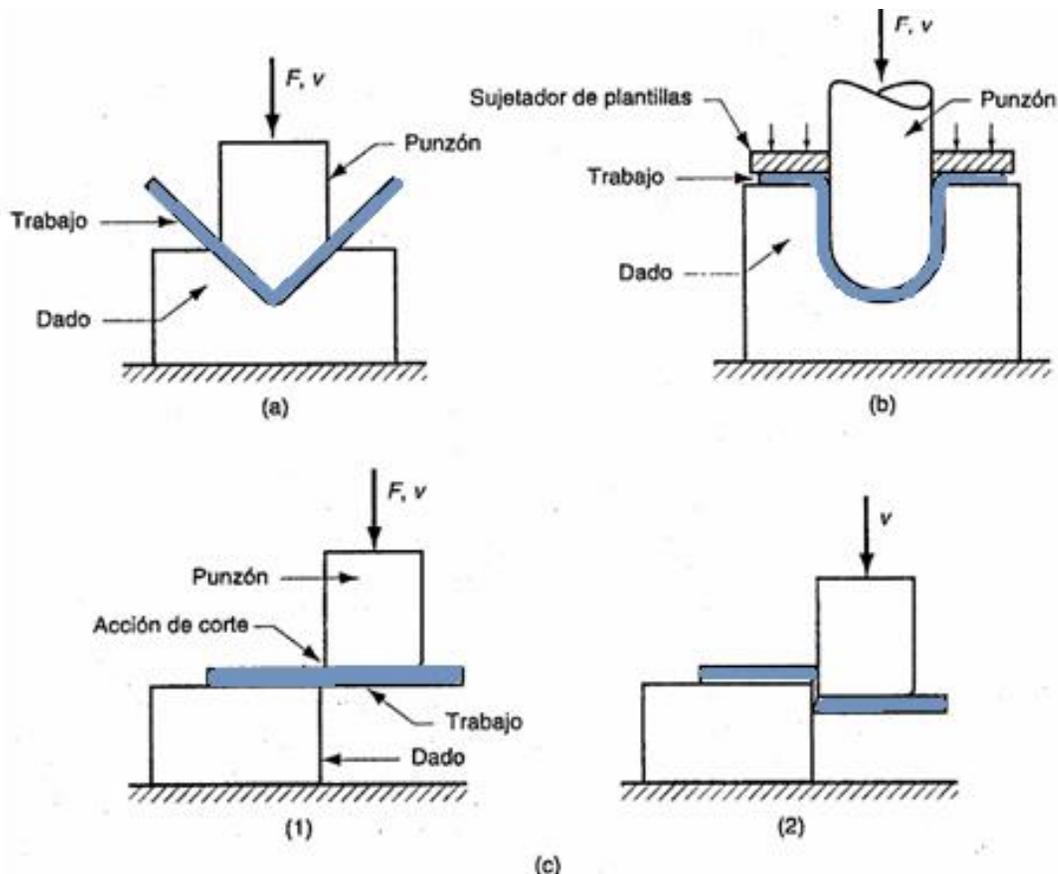


FIGURA 5.5 Operaciones básicas sobre chapa metálica. (a) doblado, (b) embutido, (c) corte

Corte. Este proceso se caracteriza por que las cargas aplicadas generan en el material solicitaciones superiores a su resistencia al corte, lo que produce la separación de la chapa. Si bien el objeto fundamental del proceso es el corte más que el cambio de forma, se considera dentro de los procesos de conformado por la importancia que tiene en el formado del metal. En esta operación se corta la parte usando un punzón y un dado, como se muestra en la figura 5.5 (c).

5.2 OPERACIONES DE FORMADO VOLUMÉTRICO

Laminación

El laminado es un proceso de deformación en el cual el metal se deforma al pasar entre dos rodillos que giran en sentido contrario y cuya separación es menor que el espesor inicial del material (figura 5.6). Por el tipo de producto que se genera se clasifica en laminación de planos (rodillos lisos) y laminación de perfiles (rodillos acanalados).

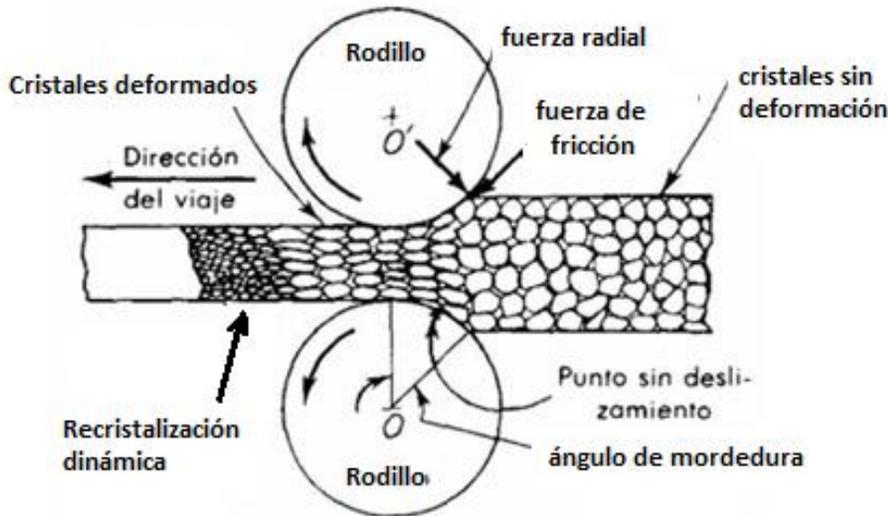


FIGURA 5.6 Proceso de laminado, su efecto sobre la microestructura

Los procesos de laminado se orientan a grandes volúmenes de producción e involucran una gran inversión de capital, ya que se requiere de molinos de laminación, hornos y equipos auxiliares de proceso. Por lo cual, producciones de 20 o más toneladas por hora representan las condiciones industriales mínimas para el método. La elevada inversión requiere que la producción sea en grandes cantidades y, por lo general, artículos estándares como láminas y placas. La mayoría de los productos laminados se realizan en caliente debido a la gran cantidad de deformación requerida. Los metales laminados en caliente están generalmente libres de esfuerzos residuales y sus propiedades son isotrópicas.

En la laminación, el trabajo empieza con la fabricación de un lingote producido por colada continua o en lingotera. El lingote se coloca en un horno de precalentamiento (horno de recalentamiento o de resudar) donde permanece por el tiempo suficiente para que se homogenice la temperatura y la microestructura, de tal manera que tenga las mejores propiedades para el laminado. Para el acero, la temperatura de inicio de laminación es alrededor de 1200 °C.

El lingote recalentado pasa al molino de desbaste (primera etapa del laminado), donde se lamina para convertirlo en una de las tres formas intermedias llamadas lupias, tochos o planchas. Una lupia tiene una sección transversal cuadrada de 150 mm de lado o mayor. Un tocho se lamina a partir de una lupia, es de sección transversal cuadrada de 38 mm por lado o mayor. Una plancha se lamina a partir de un lingote o de una lupia y, tiene una sección rectangular de 250 mm de ancho o más, y un espesor de 38 mm o más. Estas formas intermedias se laminan, posteriormente, para convertirlas en productos finales, como puede verse en la figura 5.7.

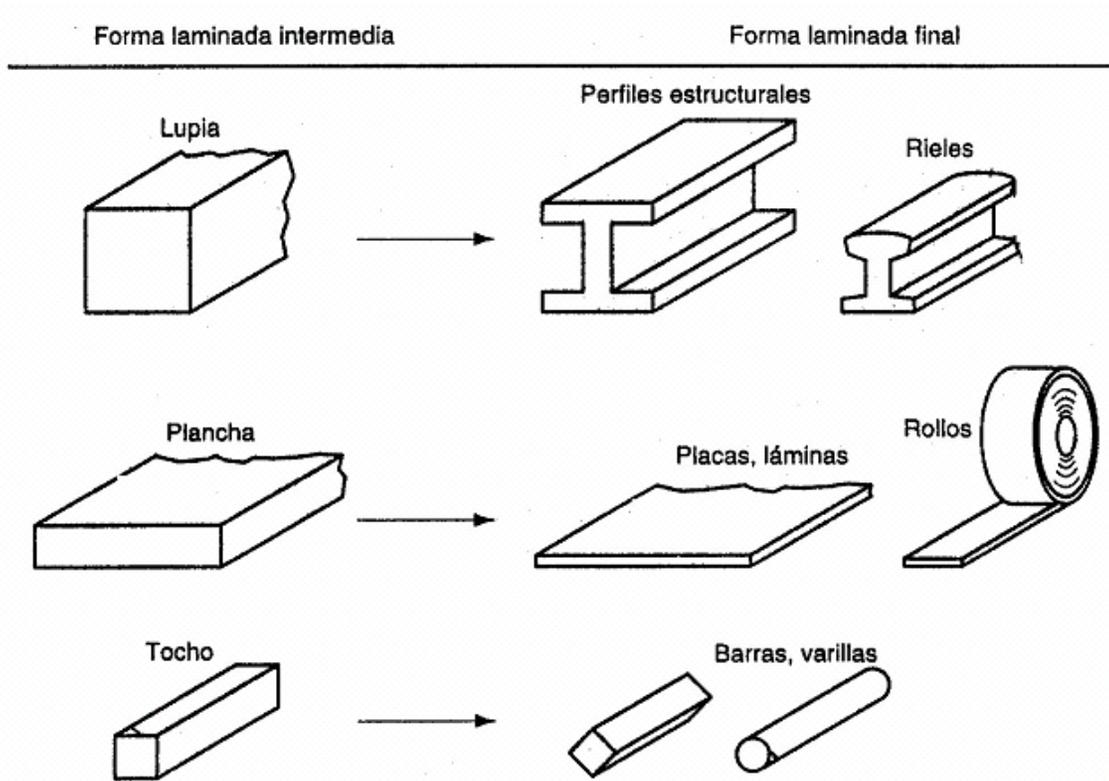


FIGURA 5.7 Algunos ejemplos de productos laminados

Las lupias se laminan para generar perfiles estructurales y rieles para ferrocarril. Los tochos se laminan para producir barras y varillas. Estas formas son la materia prima para el maquinado, estirado de alambre, forjado y otros procesos de trabajo de metales. Las planchas se laminan para convertirlas en placas, láminas y tiras. Las placas laminadas en caliente se usan para la construcción de barcos, puentes, calderas, estructuras soldadas para maquinaria pesada, tubos y tuberías, y muchos otros productos.

Laminado plano y su análisis

El laminado plano se ilustra en las figuras 5.8 y 5.9, involucra el laminado de planchas, tiras, láminas y placas; partes de trabajo de sección transversal rectangular con un ancho mucho mayor que el espesor.



FIGURA 5.8 En la figura de la izquierda se observa un tren de laminación en caliente, del lado derecho se tiene una laminador cuarto para operaciones de calibrado de espesor

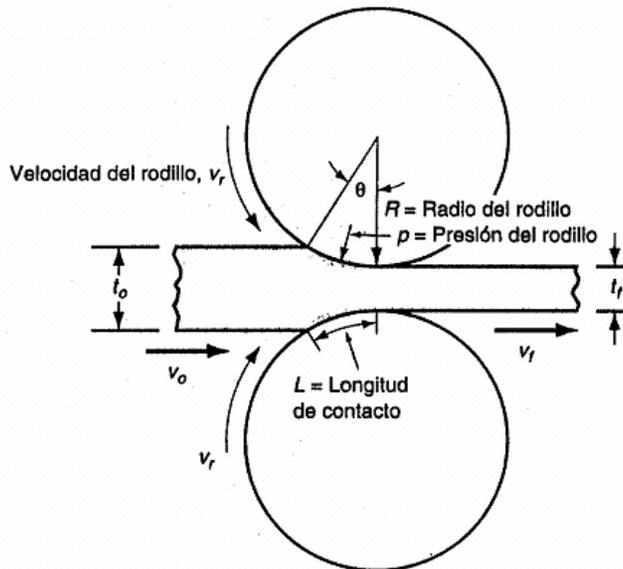


FIGURA 5.9 Descripción del proceso de laminado

En el laminado, la carga requerida para la deformación es proporcional a la reducción en la sección transversal; en el caso de productos planos se considera la reducción de espesor.

$$r = \frac{h_f - h_0}{h_0} = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (5.1)$$

Considerando que el volumen del material se conserva durante la deformación, se tiene que:

$$h_0 l_0 w_0 = h_f l_f w_f \quad (5.2)$$

Donde

w_0, l_0 son el ancho y largo iniciales de trabajo (mm)

w_f, l_f son el ancho y largo finales de trabajo (mm)

De igual forma, el gasto volumétrico antes (\dot{V}_0) y después (\dot{V}_f) debe ser el mismo, así que las velocidades pueden relacionarse antes y después a través de:

$$\begin{aligned} \dot{V}_0 &= \dot{V}_f \\ h_0 w_0 v_0 &= h_f w_f v_f \end{aligned} \quad (5.3)$$

donde

v_0, v_f son las velocidades de entrada y salida del material de trabajo.

Los rodillos entran en contacto con el material de trabajo, a lo largo de un arco de contacto definido por el ángulo θ . Cada rodillo tiene un radio R , una velocidad de rotación ω , y una velocidad superficial v_r . Esta velocidad es mayor que la velocidad inicial de la pieza de trabajo v_0 y menor que la velocidad de salida v_f . Como el flujo de metal es continuo, hay un cambio gradual en la velocidad del material de trabajo entre los rodillos. Sin embargo, existe un punto a lo largo del arco donde la velocidad de trabajo se iguala la velocidad del rodillo; este punto se llama **punto de no deslizamiento**, también conocido como punto neutro. A cualquier lado de este punto ocurren deslizamientos con fricción entre el rodillo y el material de trabajo. La cantidad de deslizamiento entre los rodillos y el material de trabajo puede medirse a través del avance s , este término se define como:

$$s = \frac{v_f - v_r}{v_r} \quad (5.4)$$

donde

s = deslizamiento hacia adelante (avance)

v_f = velocidad final de la pieza a la salida [m/s]

v_r = velocidad del rodillo [m/s]

La deformación real experimentada por el material de trabajo, se basa en el espesor del material antes y después del laminado

$$\varepsilon = \ln \frac{h_0}{h_f} \quad (5.5)$$

Se puede usar la deformación real para determinar el esfuerzo de fluencia promedio $\bar{\sigma}$ aplicado al material de trabajo en el laminado plano. Se tiene que:

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\Delta\varepsilon} \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_f} k\varepsilon^n d\varepsilon \quad (5.6)$$

El esfuerzo de fluencia promedio será útil para estimar la fuerza y potencia en el proceso de laminado.

La fricción se presenta en el laminado con un cierto coeficiente de fricción, la fuerza de compresión de los rodillos, multiplicada por este coeficiente de fricción da por resultado una fuerza de fricción entre los rodillos y el material de trabajo. En el lado de la entrada, la fuerza de fricción tiene una dirección; en el otro lado, tiene la dirección opuesta. Sin embargo, las dos fuerzas no son iguales. La fuerza de fricción es mayor en la entrada, de manera que la fuerza neta que jala el material de trabajo es a través de los rodillos. El laminado no sería posible sin estas diferencias. Hay un límite para el máximo posible que se puede alcanzar en el laminado plano con un coeficiente de fricción, esto es:

$$\Delta h_{\text{máx}} = \mu^2 R \quad (5.7)$$

donde

$\Delta h_{\text{máx}}$ = reducción máxima

μ = coeficiente de fricción

R = radio del rodillo

La ecuación muestra que si la fricción fuera cero, la reducción máxima posible también sería igual a cero y esto haría imposible la operación de laminado.

El coeficiente de fricción en el laminado depende de varios factores como lubricación, material de trabajo y temperatura de laminado, en la tabla 5.1 se dan algunos valores típicos de coeficientes de fricción, según el proceso.

TABLA 5.1 Valores típicos de coeficientes de fricción

Tipo de laminado	Coefficiente de fricción μ
Laminado en frio	0.1
Laminado en tibio	0.2
Laminado en caliente	0.4

El laminado en caliente se caracteriza frecuentemente por una condición llamada adherencia, en la cual la superficie caliente del material de trabajo se pega a los rodillos sobre el arco de contacto. Esta condición ocurre frecuentemente en el laminado de aceros y aleaciones para alta temperatura. Cuando se presenta la adherencia, el coeficiente de fricción puede ser tan alto como 0.7. La consecuencia de la adherencia es que las capas superficiales del material de trabajo no se pueden mover a la misma velocidad que la velocidad del rodillo, y debajo de la superficie la deformación es más severa a fin de permitir el paso de la pieza a través de la separación entre los rodillos.

Dado un coeficiente de fricción suficiente para realizar el laminado, la fuerza F requerida para mantener la separación entre los dos rodillos se puede calcular integrando la presión unitaria de laminado (mostrada como p en la figura 5.10) sobre el área de contacto rodillo-material de trabajo.

Esto se puede expresar como sigue:

$$P = \int_0^{L_p} p w dx \quad (5.8)$$

donde

P = carga de laminado

w = ancho del material de trabajo que se está laminando

p = presión de laminado

L_p = longitud del arco de contacto entre el rodillo y el material de trabajo

La integración requiere dos términos separados, uno a cada lado del punto neutro. Las variaciones, en la presión del rodillo a lo largo de la longitud de contacto son significativas. La figura 5.10 da una idea de esta variación. La presión alcanza un máximo en el punto neutro y se reduce a cada lado de los puntos de entrada y salida. Al aumentar la fricción, la presión se incrementa al máximo relativo entre los valores de entrada y salida. Al disminuir la fricción, el punto neutro se corre hacia la salida a fin de mantener una fuerza neta que jale el material en la dirección del laminado. De otra forma, con una baja fricción, el material de trabajo podría deslizarse en lugar de pasar entre los rodillos.

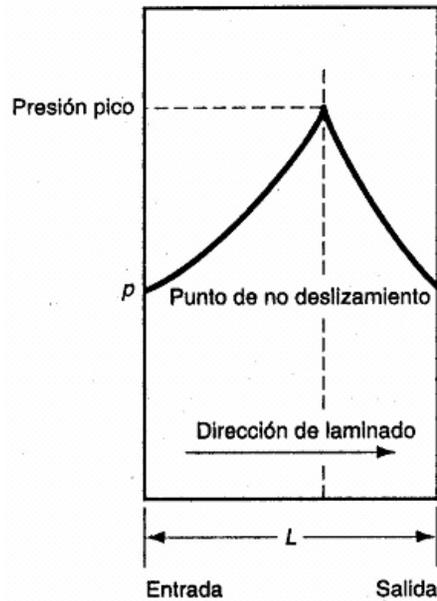


FIGURA 5.10 Perfil de la variación de presión ejercida por los rodillos a lo largo de la longitud proyectada

Se puede determinar de manera aproximada la carga de laminación (ecuación 5.9) a partir de considerar un valor promedio en el esfuerzo de fluencia y cuantificar el efecto de la carga de fricción de tal forma que:

$$P = 1.2\bar{\sigma}wL_p \quad (5.9)$$

donde

$\bar{\sigma}$ = esfuerzo de fluencia promedio

wL_p = área de contacto rodillo-material de trabajo

La longitud del arco de contacto se expresa como:

$$L_p = \sqrt{R\Delta h} \quad (5.10)$$

El par requerido para accionar un rodillo se puede estimar suponiendo que la presión de laminación se distribuye en forma simétrica sobre la longitud proyectada del arco de contacto:

$$T_R = \frac{PL_p}{2} \quad (5.11)$$

Por lo que el par de laminación es

$$T_L = PL_p \quad (5.12)$$

La potencia requerida para mover cada rodillo es el producto del par por la velocidad angular. La velocidad angular es $\pi N / 30$, donde N es la velocidad de rotación del rodillo en (rev/min). Por consecuencia, el par de laminación (requerido para mover ambos rodillos) es

$$\dot{W} = T_L \omega \quad (5.13)$$

donde

\dot{W} = potencia

ω = velocidad angular de rotación

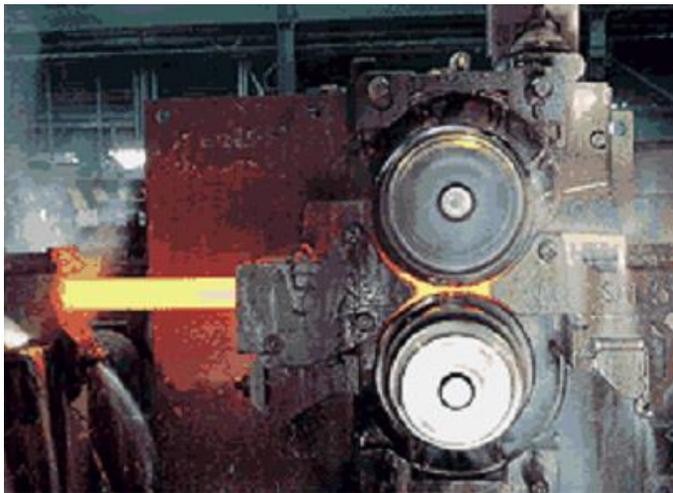
Laminado de perfiles

En el laminado de perfiles, el material de trabajo se deforma y se genera un contorno en la sección transversal. Los productos hechos por este procedimiento incluyen perfiles de construcción como perfiles en I, canales, ángulos, rieles para vías de ferrocarril y barras redondas y cuadradas, así como varillas. El proceso se realiza pasando el material de trabajo a través de rodillos que tienen impreso el gravado de la forma deseada.

La mayoría de los principios que se aplican al laminado plano son aplicables al laminado de perfiles. Los rodillos formadores son más complicados y el material inicial, de forma generalmente cuadrada, requiere una transformación gradual a través de varios rodillos para alcanzar la sección final. El diseño de la secuencia de las formas intermedias y los correspondientes rodillos se llama diseño de pases de laminación. Su meta es lograr una deformación uniforme a través de las secciones transversales de cada reducción. De otra forma, ciertas porciones de trabajo se reducen más que otras, causando una mayor deformación en estas secciones. Las consecuencias de una reducción no uniforme pueden ser distorsión y agrietamiento del producto laminado. Se utilizan rodillos horizontales y verticales para lograr una reducción consistente del material de trabajo.

Arreglos de laminadores

Se dispone de varias configuraciones de laminadores para una gran variedad de aplicaciones. El arreglo de laminación básico consiste en dos rodillos del mismo diámetro, los cuales giran en sentidos siempre en el mismo sentido y se denomina caja dúo (figura 5.11). Los rodillos en estos arreglos tienen diámetros que van de 0.3 a 1.2 m. La configuración de dos rodillos puede ser reversible o no reversible. En el arreglo no reversible los rodillos giran siempre en la misma dirección y el trabajo siempre pasa a través del mismo lado. Los laminadores reversibles permiten la rotación de los rodillos en ambas direcciones, de manera que el trabajo puede pasar a través de cualquier dirección. Esto permite una serie de reducciones que se hacen a través del mismo juego de rodillos, pasando simplemente el trabajo varias veces desde direcciones opuestas. La desventaja de la configuración reversible es debido a la inercia inherente a las dimensiones y velocidad de los rodillos.



(a)



(b)

FIGURA 5.11 (a) Laminador dúo (laminado en caliente de palanquilla),
(b) Caja dúo con sistema hidráulico de ajuste de rodillos

En la figura 5.12(a) se ilustra la configuración de tres rodillos (trío), en ella hay tres rodillos con sus respectivos ejes contenidos en un mismo plano vertical, en los que la dirección de rotación de cada rodillo permanece sin cambio. Para lograr una serie de reducciones se puede

pasar el material de trabajo en cualquier dirección, ya sea elevando o bajando el lingote después de cada paso. El equipo en un arreglo de tres rodillos se vuelve más complicado debido al mecanismo elevador que se necesita para elevar o bajar el material de trabajo.

Al reducir el diámetro de los rodillos, la longitud del arco proyectado de contacto se reduce y esto redundaría en menores fuerzas de laminación, par y potencia; sin embargo, las máximas reducciones se ven afectadas negativamente. En los arreglos de cuatro rodillos (laminador cuarto) se usan dos rodillos de diámetro menor para hacer contacto con el trabajo y dos rodillos como respaldo (figura 5.12b). Debido al menor diámetro de los rodillos de trabajo se reduce la carga; sin embargo, a la vez se compromete la rigidez (se presenta flexión elástica) promoviendo variaciones en la sección de la chapa laminada; esto se compensa a través del empleo de rodillos más grandes de respaldo que los soportan. Otra configuración que permite el uso de rodillos menores contra el trabajo es el arreglo en racimo (figura 5.13)

Para grandes producciones se emplean varias cajas de laminación que operan de manera secuencial, lo cual permite incrementar muy sensiblemente la producción (figura 5.14), la clasificación y aplicación de estas dependerá de su ordenamiento (continuo, semicontinuo, alineados, etc.). Aun cuando en la figura 5.14 el arreglo que se muestra consiste en siete cajas, estos pueden disponer de más de 10 en función del producto y de la capacidad de la planta. A cada paso de laminación se incrementa la velocidad haciendo significativo el problema de sincronizar las velocidades de los rodillos en cada etapa.



(a)



(b)

FIGURA 5.12 (a) Laminador trío, (b) Laminador cuarto



(a)



(b)

FIGURA 5.13 (a) Laminador en racimo, (b) Desmontaje de los rodillos de apoyo



FIGURA 5.14 Tren de laminación continuo (7 cajas)



FIGURA 5.15 Se observa parte de un tren alineado o desplegado en el formador de lazo

5.3 ALGUNAS OPERACIONES DE TRABAJO EN CHAPA

Embutido

Se trata de una operación de formado de láminas metálicas que se emplea para producir piezas huecas a partir de chapa metálica. El proceso se efectúa colocando una lámina de metal sobre la cavidad de un dado o matriz y empujando el metal hacia la cavidad con un punzón (figuras 5.16 y 5.17). Para evitar la formación de pliegues o arrugas, la chapa deberá sujetarse mediante un pisador. Por embutido se producen latas para bebidas, casquillos de municiones, lavabos, utensilios de cocina y partes para carrocería de automóviles (figura 5.18).

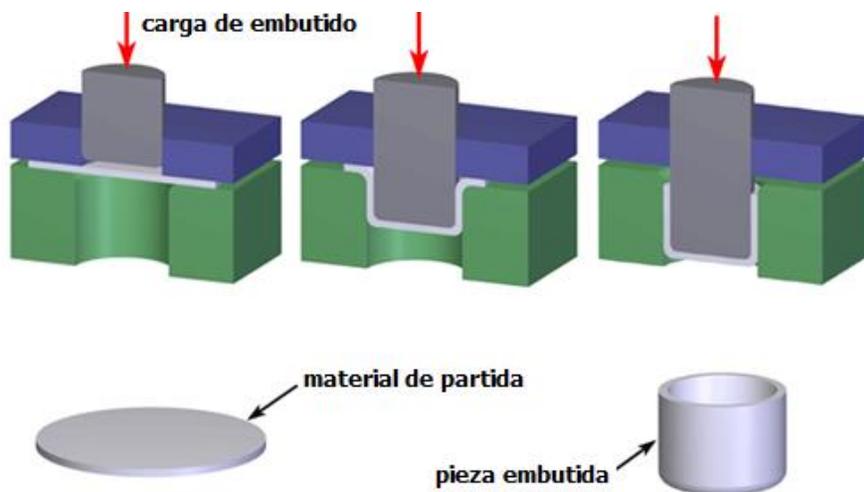


FIGURA 5.16 Proceso de embutido. Tomado de CustoPartNet

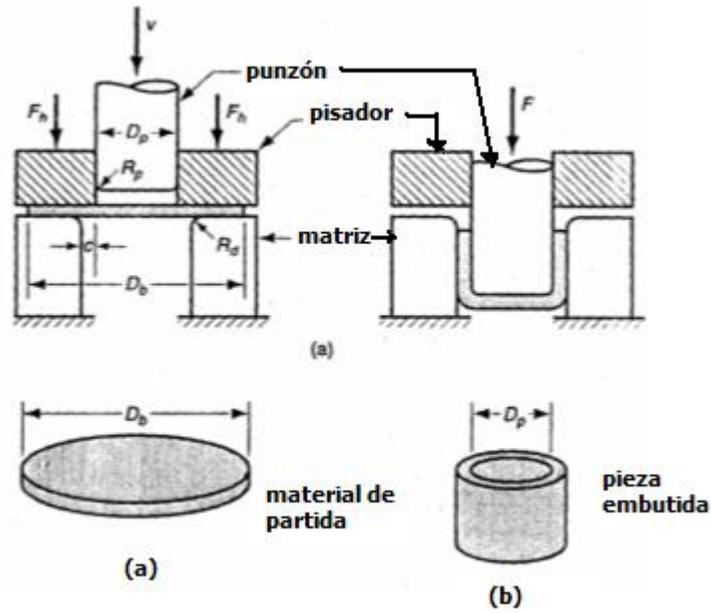


FIGURA 5.17 Parámetros del proceso de embutido



FIGURA 5.18 Ejemplos de piezas producidas por embutido

Mecánica de embutido

La fabricación de piezas en forma de lata (figura 5.16) es la operación básica del embutido. Con las dimensiones y los parámetros que se muestran en la figura 5.17 se analizará la operación y la mecánica del embutido. Se embute un disco de diámetro D_b dentro de un dado por medio de un punzón de diámetro D_p . El punzón y el dado deben tener un radio en las esquinas determinado por R_p y R_d . Si el punzón y el dado tienen esquinas agudas ($R_p = R_d = 0$), se realizará una operación de perforado (punzonado) de un agujero en lugar de una operación de embutido. Los lados del punzón y del dado están separados por un claro c .

Este claro es aproximadamente 10% mayor que el espesor del material en embutido $c = 1.1h$, donde h es el espesor de la chapa.

El punzón aplica una fuerza F para realizar la deformación del metal y el sujetador de piezas o de formas aplica una fuerza de sujeción F_h (figura 5.19).

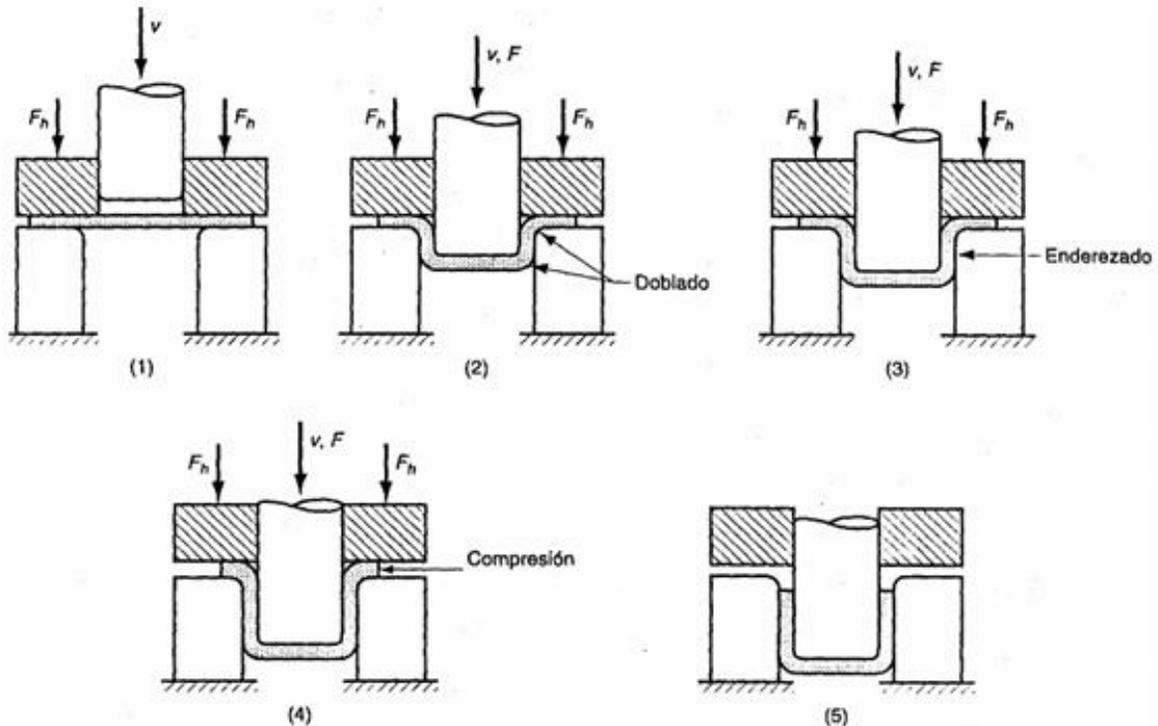


FIGURA 5.19 Etapas en el proceso de embutido

Conforme el punzón se desliza hacia abajo, hasta su posición final, la pieza de trabajo experimenta una serie compleja de esfuerzos y deformaciones al tomar gradualmente la forma definida por el punzón y la cavidad del dado. Las etapas en el proceso de deformación se ilustran en la figura 5.19. Cuando el punzón empieza a empujar al material de trabajo, somete al metal a una operación de doblado. La lámina es doblada simplemente sobre la esquina del punzón y la esquina del dado, como se muestra en la figura 5.19 (2). El perímetro exterior del disco se mueve hacia el centro en esta primera etapa, pero solo ligeramente. A medida que el punzón avanza, ocurre una acción de enderezado del metal que fue previamente doblado sobre el radio del dado, etapa (3) de la figura. El metal en el fondo de la copa, así como a lo largo del radio del punzón, se ha movido hacia abajo junto con el punzón, pero el metal que se había doblado sobre el radio del dado se endereza para que pueda jalarsse dentro del claro y formar la pared del cilindro. En este punto se necesita más metal para reemplazar al que ahora forma la pared del cilindro. Este nuevo metal viene del borde exterior de la forma original. El metal en la porción exterior de la forma se jala o embute hacia la apertura del dado para sustituir al metal previamente doblado y enderezado que ahora forma la pared del cilindro. De este tipo de flujo de metal a través de un espacio restringido es de donde toma su nombre el proceso de embutido. Durante esta etapa del proceso, la fricción y la compresión en el sujetador juegan papeles importantes. Para que el material, cuyo movimiento es restringido por el pisador, se deslice hacia la cavidad deberá superar la fricción entre la lámina de metal y la superficie del pisador. Inicialmente se involucra la fricción estática hasta que el metal empieza a moverse; debido al flujo de metal, es entonces que la fricción cinemática gobierna el proceso.

La magnitud de la fuerza de sujeción aplicada por el sujetador, así como las condiciones de fricción de las dos intercaras son factores que determinan el éxito de la operación de embutido. Generalmente, se usan lubricantes o compuestos para reducir las fuerzas de fricción durante el embutido. Al final del proceso, y de acuerdo con el diseño del pisador, se pueden presentar algunas arrugas en el extremo del material embutido, especialmente cuando la lámina es delgada o cuando la fuerza del sujetador es demasiado baja. Esta condición no puede corregirse una vez que ha ocurrido.

La fuerza de sujeción aplicada sobre la forma se ve ahora como un factor crítico en el embutido profundo. Si esta es muy pequeña ocurre la formación de arrugas en el borde superior; si es muy grande, evita que el metal fluya adecuadamente hacia la cavidad del dado, ocasionando

estirado y posible desgarramiento (fractura) de la lámina. La determinación de la fuerza adecuada de sujeción implica un delicado balance entre estos factores opuestos.

El movimiento progresivo del punzón hacia el dado ocasiona la continuidad del flujo de metal, causado por el estirado y la compresión que se han descrito previamente. Ocurre además, que puede presentarse adelgazamiento de las paredes del cilindro (no deseable), de tal forma que en una operación exitosa de embutido puede permitirse hasta un 25% de adelgazamiento, la mayor parte cerca de la base de la copa.

Medidas del embutido: Una medida de la severidad de una operación de embutido profundo es la relación de embutido R . Esta se define más fácilmente para una forma cilíndrica como la relación entre el diámetro del disco inicial D_b y el diámetro del punzón D_p . En forma de ecuación,

$$R = \frac{D_b}{D_p} \quad (5.14)$$

La relación de embutido proporciona un índice de la severidad de una operación de embutido. A mayor relación, mayor severidad de la operación. El límite superior aproximado de la relación de embutido es del orden de 2.0. El valor limitante real para una operación depende del radio de las esquinas en el punzón y el dado (R_p y R_d), de las condiciones de fricción, de la profundidad de embutido y de las características de la lámina de metal (ductilidad y grado de anisotropía).

Otra forma de caracterizar una operación dada de embutido es por la reducción r , donde

$$r = \frac{D_b - D_p}{D_b} \quad (5.15)$$

El valor de r está vinculado muy estrechamente con la relación de embutido. Consistente con el límite previo de R , el valor de la reducción r puede ser menor que 0.5.

Una tercera medida en el embutido profundo es la relación de espesor al diámetro h/D_b , (espesor de la forma inicial h dividido por el diámetro de la forma D_b) cuyo valor en porcentaje es recomendable que sea mayor que 1%. Conforme decrece h/D_b , aumenta la tendencia al arrugado.

En los casos en que el diseño de la parte embutida exceda los límites de la relación de embutido, la reducción r y la relación t/D_b , la forma debe ser embutida en dos o más pasos, algunas veces con recocido entre los pasos.

La *fuerza de embutido* requerida para realizar una operación dada se puede estimar aproximadamente mediante la siguiente expresión (suponiendo una sección circular de la pieza):

$$F = \sigma_{\text{máx}} \pi h D_p \left(\frac{D_b}{D_p} - 0.7 \right) \quad (5.16)$$

donde

- F = fuerza de embutido
- h = espesor inicial
- $\sigma_{\text{máx}}$ = resistencia a tracción

D_b y D_p son los diámetros del disco inicial y del punzón, respectivamente. La constante 0.7 es un factor de corrección para la fricción. La ecuación 5.16 estima la fuerza máxima en la operación. La fuerza de embutido varía a través del movimiento del punzón (figura 5.17), alcanzando usualmente su valor máximo a una tercera parte de la longitud de la carrera.

La *fuerza de sujeción* (aplicada por el pisador) es un factor importante en la operación de embutido. Como una primera aproximación, la presión de sujeción se puede establecer en un orden del 0.015 de la resistencia a la fluencia de la lámina de metal. Este valor se multiplica por la porción del área de la forma inicial que será sostenida por el sujetador (figura 5.20):

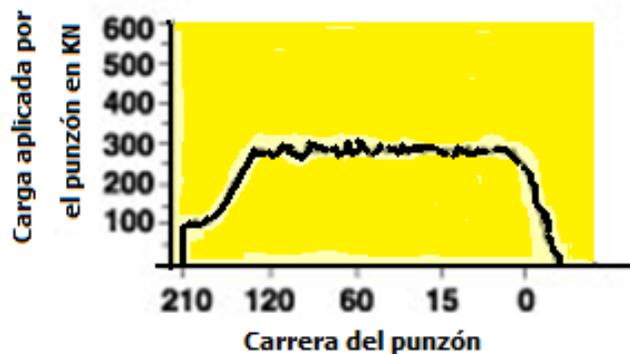


FIGURA 5.20 Fuerza aplicada por el punzón contra su desplazamiento

$$F_p = 15 \times 10^{-4} \sigma_0 \pi \left[D_b^2 - (D_p + 2.2h + 2R_d)^2 \right] \quad (5.17)$$

donde

F_p = fuerza de sujeción en embutido

σ_0 = esfuerzo de fluencia de la lámina metálica

h = espesor inicial del material

R_d = radio de la esquina del dado

La fuerza de sujeción es una aproximadamente tercera parte de la fuerza de embutido.

Determinación del tamaño de la forma. Para lograr una dimensión satisfactoria de una parte embutida cilíndrica, se necesita el diámetro correcto de la forma inicial. Esta debe ser lo suficientemente grande para suministrar el metal necesario que complete la parte. Si hay demasiado material, habrá desperdicio innecesario (figura 5.21). Para formas no cilíndricas, existe el mismo problema de estimar el tamaño de la forma inicial, solo que esta no será circular.



FIGURA 5.21 La geometría irregular y la propia anisotropía del material se traducen en un mayor porcentaje de desperdicio

Un método utilizado para estimar el diámetro del disco inicial en una operación de embutido profundo en la que se produce una pieza de sección circular (simetría axial) requiere tan solo

partir de la premisa de que el espesor de la lámina permanece constante durante la deformación y, por consecuencia, la suma de las áreas del producto se igualan con la del material del partida.

Embutido sin pisador. La función principal del pisador (sujetador) consiste en prevenir la formación de pliegues o arrugas mientras se embute la parte. La tendencia al arrugamiento se reduce al aumentar la relación entre el espesor y el diámetro de la forma inicial. Si la relación h/D_b , es lo suficientemente grande, se puede alcanzar el embutido sin necesidad de un sujetador. Puede estimarse la condición limitante para el embutido sin pisador mediante:

$$D_b - D_p \leq 5h \quad (5.18)$$

En este caso, el dado de embutido debe tener forma de embudo o cono para permitir que el material a embutir se ajuste a la cavidad del dado. La ventaja del embutido sin pisador, cuando este es posible, es el menor costo de las herramientas y el uso de una prensa más simple, porque se evita la necesidad de un control separado de los movimientos del sujetador y del punzón.

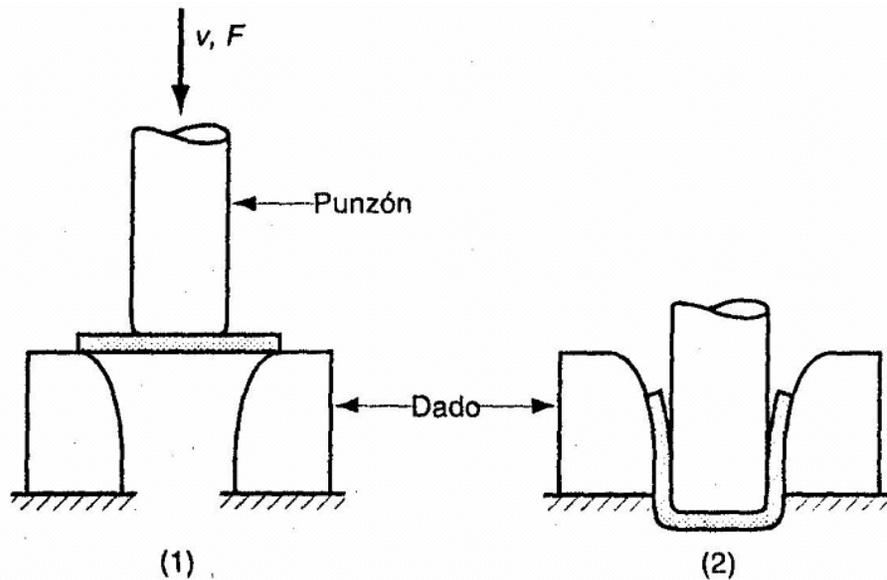


FIGURA 5.22 Embutido sin pisador

Defectos en el embutido

El embutido es una operación más compleja que el corte o el doblado de lámina, por tanto, hay más factores que pueden dar lugar a la falla del proceso. Los más usuales se muestran en la figura 5.23 y se explican enseguida:

- a) *Formación de pliegues en la brida o pestaña.*
- b) *Formación de arrugas en la pared.* Si la brida arrugada se embute en el cilindro, estos pliegues aparecen en la pared vertical del cilindro.
- c) *Fracturas de desgarre.* Este defecto consiste en una grieta que se abre en la pared vertical, usualmente cerca de la base de la copa embutida, debido a altos esfuerzos a la tracción que causan adelgazamiento del metal en esta región. Este tipo de falla puede también ocurrir cuando el metal se estira sobre una esquina afilada del punzón.
- d) *Formación de orejas.* Ésta es la formación de irregularidades (llamadas orejas) en el borde superior de la pieza embutida, causada por anisotropía en la lámina de metal. Si el material es perfectamente isotrópico no se forman las orejas.
- e) *Rayado superficial.* Se pueden presentar marcas longitudinales en la dirección de avance del punzón por efecto de un mal acabado de las herramientas, por falta de lubricación o de concentricidad del punzón con el dado.

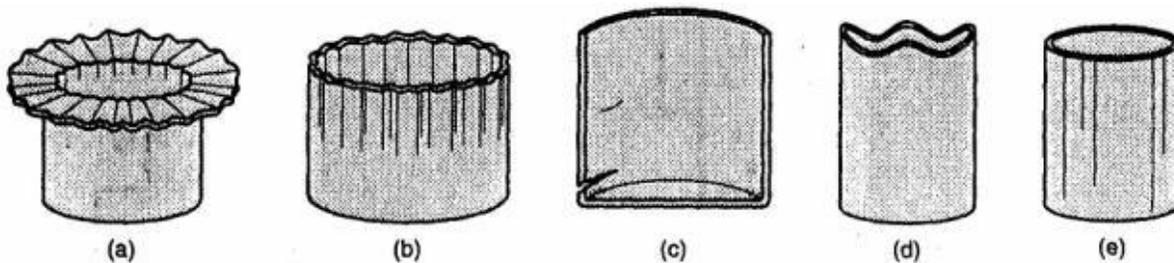


FIGURA 5.23 Defectos en piezas embutidas

5.4 PRINCIPIOS FUNDAMENTALES DE LOS PROCESOS DE ARRANQUE DE VIRUTA

Los procesos de fabricación mediante mecanizado (maquinado) consisten en arrancar el exceso de material en forma de virutas o partículas, utilizando las máquinas y herramientas

cortantes adecuadas para conseguir la geometría de la pieza deseada, las tolerancias y los acabados requeridos. Este tipo de procesos se basa en una deformación plástica localizada en la zona adyacente al borde de corte (filo de la herramienta), de tal manera que una vez que se alcanza la resistencia máxima del material se desprenda una rebaba o viruta, dando lugar a una nueva superficie. Por efecto de la deformación se presenta endurecimiento tanto en el material desprendido como en la zona superficial y subsuperficial que se ha generado por efecto de la operación. El elevado nivel de deformación plástica localizada inherente al proceso, así como la fricción existente entre material y herramienta da como resultado una elevada generación de calor, lo que a su vez demanda el uso de fluidos de corte, los cuales a la vez de reducir el coeficiente de fricción ayudan en la disipación del calor generado.



FIGURA 5.24 (a) Torno paralelo, (b) Torno vertical

La obtención de las dimensiones y geometría definitiva de una pieza mediante el arranque de viruta se realiza partiendo de productos fabricados por fundición, forja, laminación o por pulvimetalurgia, a los que, en algunos casos, se les han efectuado operaciones previas de doblado, soldadura u otras.

En la operación de cilindrado, el desprendimiento de la viruta se produce al mantenerse la interferencia entre la herramienta y la pieza de trabajo; esto a través de la rotación de la pieza que se traduce en la velocidad de corte y el desplazamiento de la herramienta o avance, el cual se da paralelo al eje de la pieza (figura 5.25).

Los procesos con arranque de viruta se caracterizan en general por su mayor costo, sin embargo, presentan inigualables ventajas como son:

- Permite producir piezas con una exactitud del orden de centésimas de milímetro o aún menores (esto dependerá el proceso, máquina y herramienta).
- Se obtienen acabados superficiales muy finos, como es en el caso de operaciones de rectificado y pulido.
- Se pueden generar una amplia variedad de geometrías.

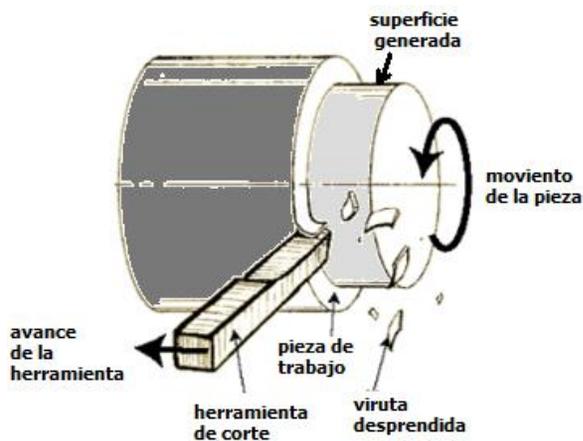


FIGURA 5.25 Operación de cilindrado exterior e interior

Las máquinas empleadas en las operaciones con arranque de viruta se denominan como máquinas herramientas, tales como taladros, fresadoras, tornos, rectificadoras, etcétera, véase la figura 5.26.

Las operaciones con arranque de viruta se caracterizan en:

- El material remanente es la parte deseada.
- La acción de corte involucra la deformación por esfuerzos de corte en el material de trabajo y posibilita la formación de la viruta.
- El maquinado se lleva a cabo después de los otros procesos de manufactura. Estos permiten formar la parte para que por maquinado se genere la forma final de la pieza, con las dimensiones y acabado requeridos.
- Se trata de métodos muy complejos de modelar dadas la variedad de parámetros que intervienen (mecánicas, termodinámicas, metalúrgicas, etc.).

- Generalmente, el maquinado se aplica para formar partes metálicas, aunque pueden maquinarse también plásticos y componentes cerámicos. Estos últimos presentan más dificultades por su dureza y fragilidad.
- Con el maquinado se consiguen tolerancias aún menores a 0.01 mm y acabados superficiales de hasta 0.4 micras.

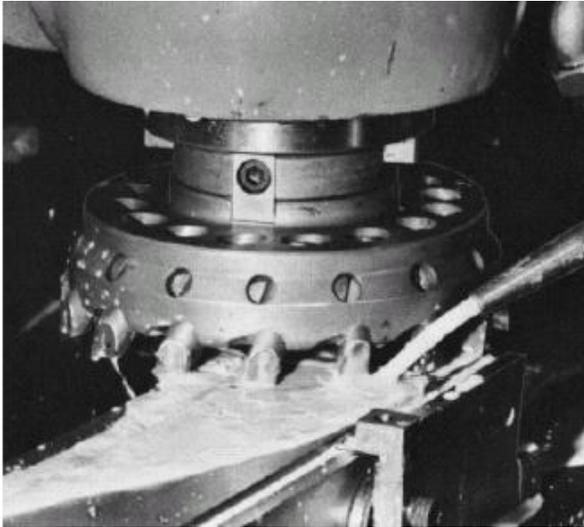


FIGURA 5.26 Generación de una superficie plana con una fresadora vertical

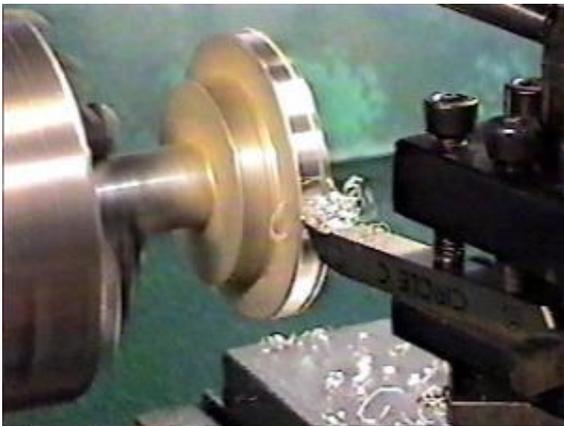


FIGURA 5.27 El torno es una de las máquinas herramienta más versátiles, ya que permite cilindrado, taladrado, refrentado, roscado, moleteado y operaciones de conizado entre las más usuales

Movimientos de corte

El arranque de viruta se realiza mediante la penetración de una herramienta, cuyo material es de mayor dureza que el de la pieza a cortar. Esto se produce mientras se efectúa el movimiento relativo entre la pieza a trabajar y la herramienta de corte.

Movimientos fundamentales

Movimiento de corte

Es el que permite que la herramienta penetre en el material, produciendo viruta, y se identifica a través del parámetro *velocidad de corte*.

Movimiento avance

Es el desplazamiento del punto de aplicación de corte, identificado a través del parámetro *velocidad de avance*. Sitúa frente a la herramienta una nueva capa sin mecanizar.

Movimiento de alimentación

Es con el que se consigue cortar un espesor de material, identificado a través del parámetro *profundidad de corte*.

- Los movimientos relacionados pueden aplicarse tanto a la pieza como a la herramienta.
- La herramienta y la pieza se fijan a la máquina, esta última es la encargada de transmitirle a las primeras, el movimiento de corte y el de avance, ya sean de rotación o traslación, indistintamente, dependiendo del tipo de trabajo a realizar y de la máquina que lo ejecuta.

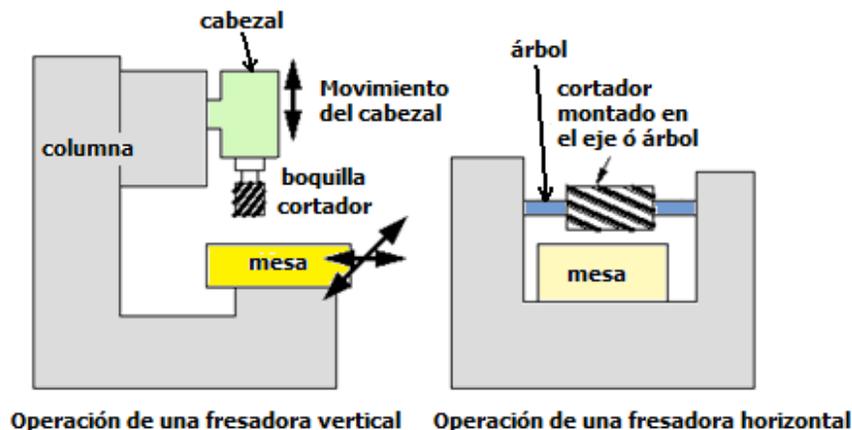
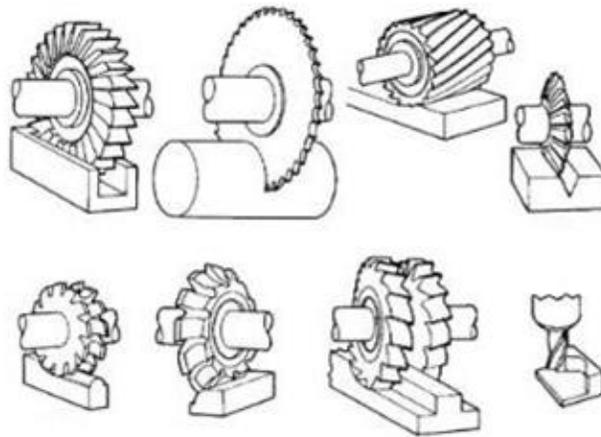


FIGURA 5.28 (a) Las fresadoras, dependiendo de su tipo permiten la generación de superficies planas, ranuras, guías, generación de engrane, cuñeros, entre otros muchas operaciones



(b)



(c)

FIGURA 5.28 (b), (c) Las fresadoras, dependiendo de su tipo permiten la generación de superficies planas, ranuras, guías, generación de engrane, cuñeros, entre otros muchas operaciones (Continuación)

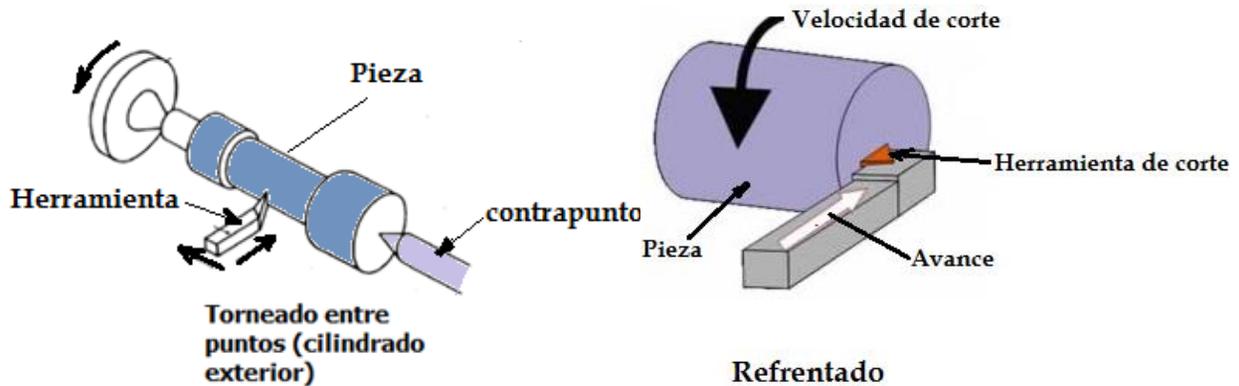


FIGURA 5.29 (a) Operaciones de torneado

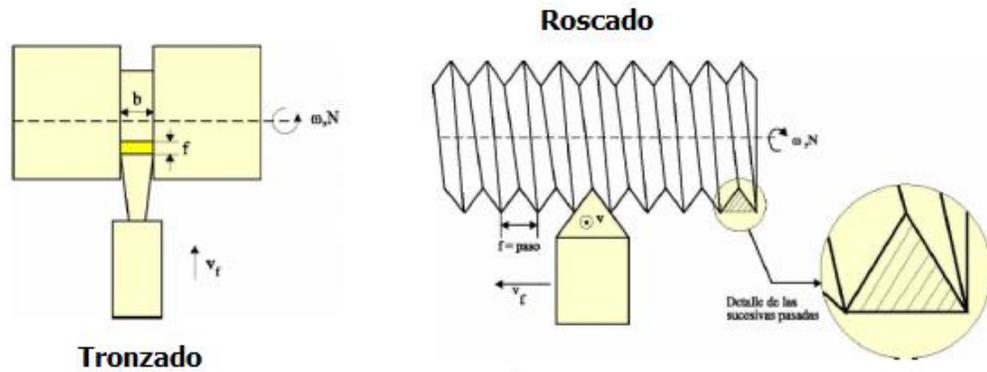


FIGURA 5.29 (b) Operaciones de torneado

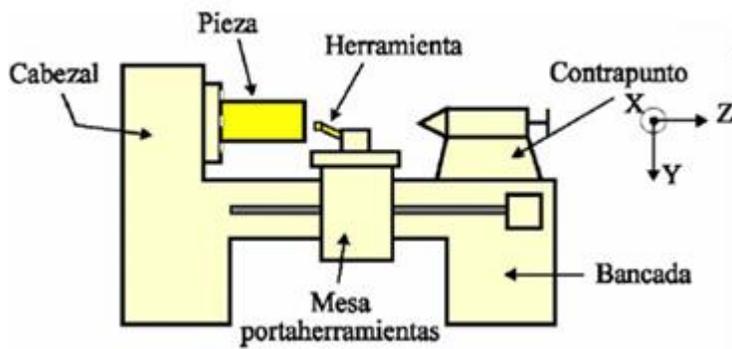


FIGURA 5.30 Partes de un torno paralelo

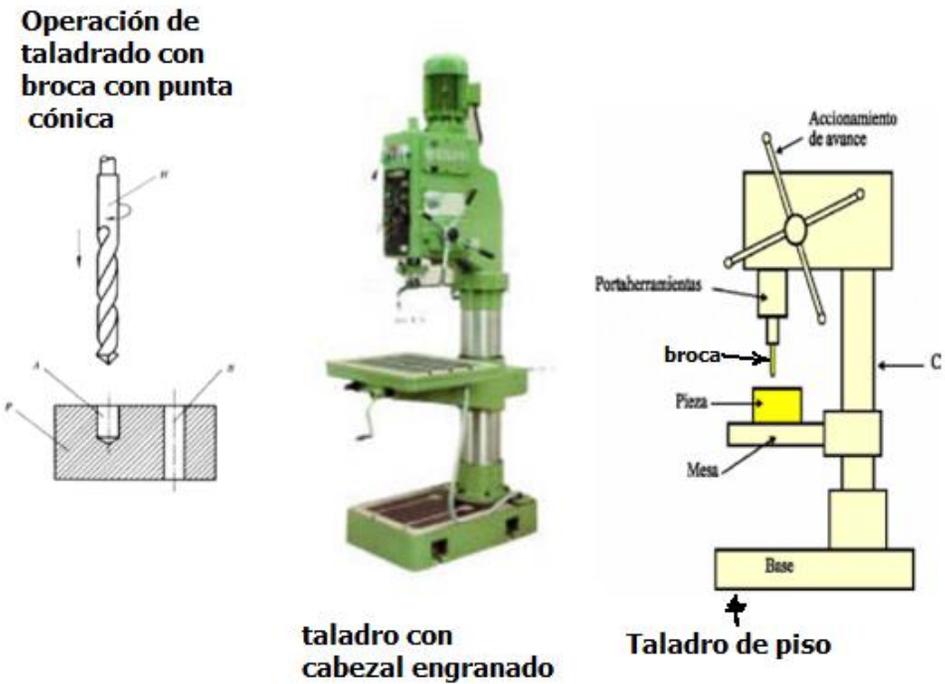
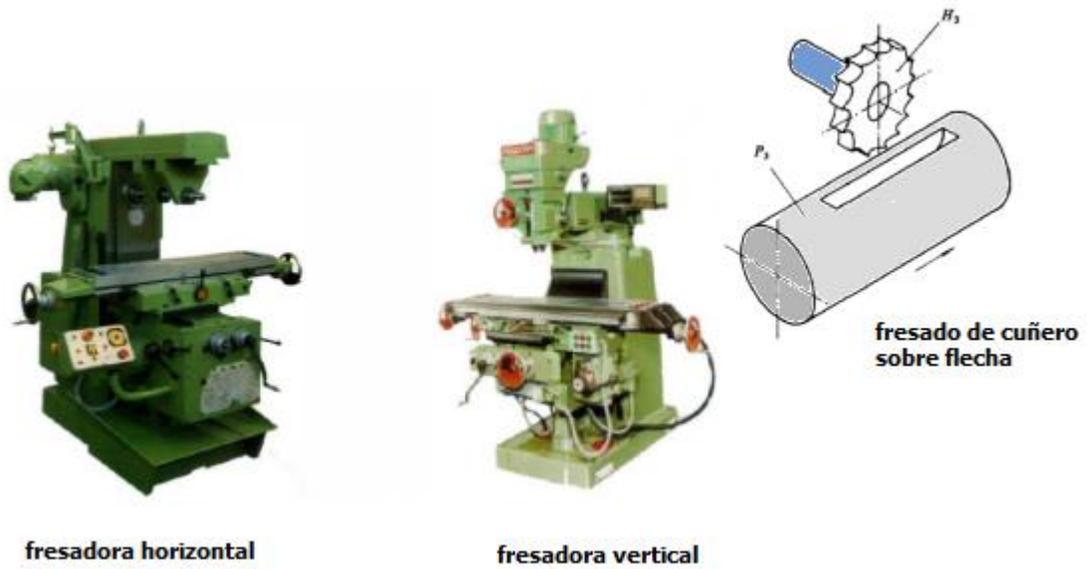
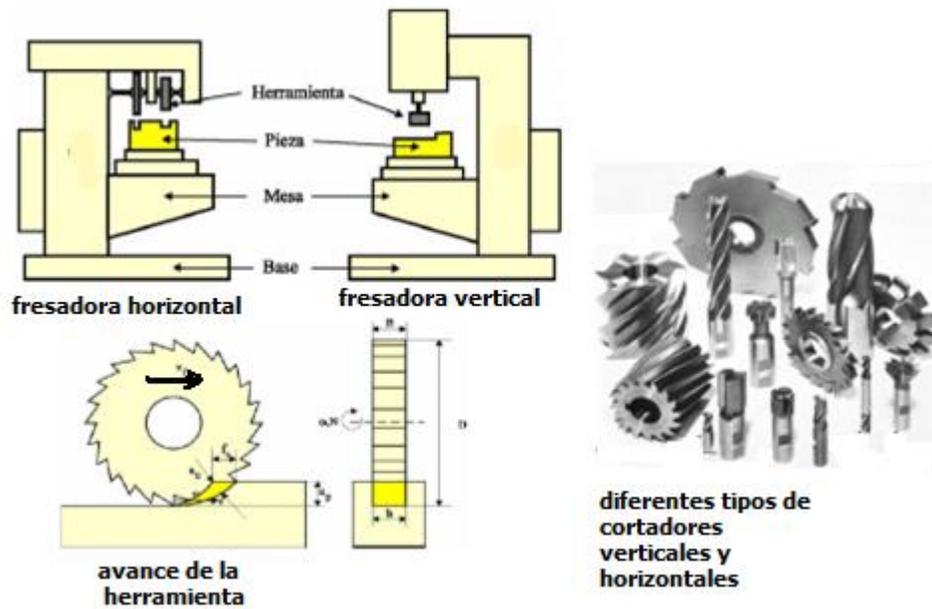


FIGURA 5.31 Operaciones de taladrado



(a)



(b)

FIGURA 5.32 (a), (b) Operaciones de fresado

Herramienta

Es el elemento que entra en contacto directo con la pieza y produce la eliminación del material sobrante de la preforma. Una herramienta consta, en general, de una o varias aristas o filos, materializadas por la intersección de superficies, con frecuencia planas.

Entre estas superficies, resulta de mayor interés la denominada cara de incidencia, aquella que queda enfrentada a la superficie mecanizada de la pieza y la cara de desprendimiento, aquella por la que se desprende el material eliminado o viruta. Las aristas se denominan filos de corte.

La tipología existente de herramientas es muy amplia ya que depende, entre otras, de la operación a realizar y condiciones de la misma, de la máquina-herramienta en el que se desarrolla dicha operación y de las propiedades que se pretenden conseguir en la pieza una vez finalizado el proceso.

En función del número de aristas de corte es frecuente considerar una primera clasificación de herramientas (figura 5.33) en herramientas *monofilo*, como las empleadas en operaciones de torno, y en herramientas *multifilo*, como las empleadas en operaciones de fresado. La herramienta se completa con una parte no activa que permite su fijación a los elementos de sujeción de la máquina-herramienta.



FIGURA 5.33 Diversos tipos de herramienta: derecha, herramientas multifilo (fresas o cortadores verticales); izquierda, herramientas monofilo, pastillas y porta pastillas

Según su construcción, las herramientas pueden considerarse *monobloque* o *enterizas* cuando toda la herramienta es del mismo material, y herramientas con *insertos* o *plaquitas* cuando la parte activa y el resto de la herramienta son de materiales diferentes.



FIGURA 5.34 Diversos tipos de fresas: verticales con insertos de carburo

Se denominan de esta forma porque la parte activa suele tener forma de pequeñas placas (figura 5.33 y 5.35) que se unen al mango o al cuerpo de la herramienta mediante soldadura o medios de fijación mecánica (tornillos, bridas, etc.)

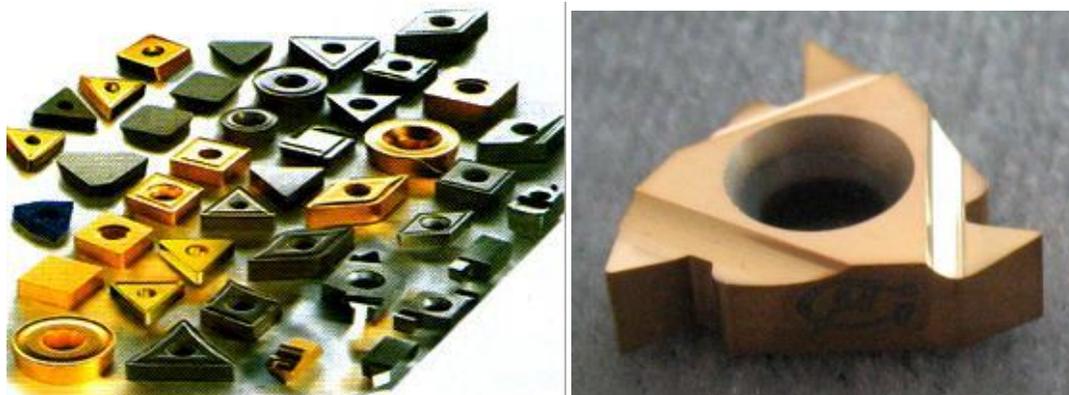


FIGURA 5.35 Placas revestidas o insertos de carburo



FIGURA 5.36 Diferentes tipos de herramientas enterizas (de un solo material), (a) machuelos de acero rápido; (b) cortadores verticales de carburo de tungsteno

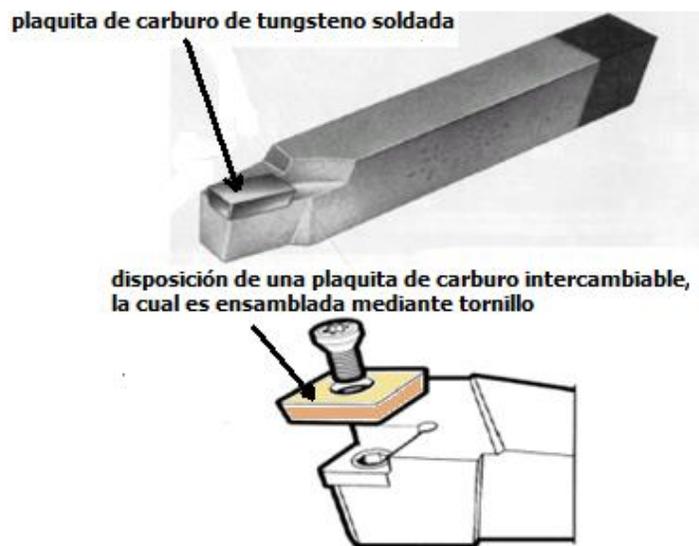


FIGURA 5.37 Herramientas para torno con inserto

Materiales de herramientas

Existe una amplia variedad de materiales empleados en la parte activa de la herramienta. La elección de uno u otro tipo depende fundamentalmente de las propiedades mecánicas del material a mecanizar y de los requerimientos del proceso por realizar. Por lo general, se requiere una elevada dureza y una elevada resistencia al desgaste que permita la eliminación continua de material.

En términos generales, las herramientas de corte han ido evolucionando a la par de las máquinas herramienta, originalmente se emplearon aceros de alto carbono templados hasta que a inicios del siglo XX se desarrollaron los conocidos como aceros rápidos (Cr4W18V1C0.8Fe el resto, W6Mo5Cr4V2C1Fe el resto), denominados así ya que su uso revolucionó las operaciones de corte permitiendo velocidades mucho más elevadas que con los aceros al carbono. Ya para la tercera década del siglo pasado se desarrollaron las herramientas de carburo de tungsteno-cobalto, las cuales permitieron mayores velocidades de corte con el inconveniente de no soportar vibración, conviviendo hasta la fecha con el uso de los aceros rápidos. Los últimos desarrollos se han orientado básicamente a la producción de herramientas de carburo recubiertas con nitruros o carbonitruros, este tipo de herramientas son adecuadas para muy elevados gastos volumétricos de corte de metal, lo cual las hace la opción más adecuada para los actuales centros de maquinado y tornos de control numérico (figuras 5.38 y 5.39).



FIGURA 5.38 Centro de maquinado de CNC



(a)



(a)

(b)

FIGURA 5.39 (a) Torno de CNC, (b) Detalle del revólver portaherramientas de un torno CNC, 5.36, (c) Centro de maquinado vertical CNC, se observa en la parte superior izquierda el magazine de herramientas

Resulta esencial que las propiedades mecánicas (dureza, resistencia, tenacidad) se mantengan constantes a las altas temperaturas que se alcanzan en la zona de corte (dureza al rojo) como consecuencia del rozamiento entre la pieza y la herramienta. Este hecho descarta el empleo de materiales tales como los aceros al carbono ya que no mantienen estas propiedades.

5.5 CRITERIOS DE FALLA

Desde que se modeló el comportamiento de los diferentes materiales fue de interés definir las condiciones bajo las cuales estos fallan. En un principio, dicha condición se relacionó simplemente con el máximo esfuerzo normal con el cual se presentaba la falla, naciendo así los criterios del máximo esfuerzo normal $\sigma_1 \leq \sigma_{\text{máx}}$ o de la máxima deformación normal. Más adelante se encontró que dicha descripción no siempre se verificaba, por lo que fue necesario desarrollar otros métodos o principios que permitieran describir la condición límite con la cual podía ser utilizado el material con seguridad. Una de las primeras cuestiones que hubo que discernir era cuando se presentaba la falla, para esto fue necesario describir el inicio de falla para materiales frágiles como la piedra o el concreto, y también para materiales dúctiles como los metales y aleaciones.

En los materiales frágiles, y debido a su comportamiento implícito, se puede considerar que la falla se presenta de tal forma que la máxima resistencia es igual al límite de cedencia. Para describir dicha condición, se emplea la teoría de Mohr-Coulomb que describe el comportamiento de un material como el concreto o el mármol bajo esfuerzos de corte y esfuerzos normales. Esta teoría aplica a materiales cuya resistencia a la compresión excede con mucho su límite bajo tracción. La teoría de fricción de Coulomb se emplea como hipótesis para determinar la combinación de esfuerzo de corte-esfuerzos normales que producen la fractura del material. El círculo de Mohr es utilizado para determinar la combinación de esfuerzos que producen la falla y el ángulo en que esta se presenta, siendo el esfuerzo normal máximo perpendicular a esta superficie (materiales frágiles). Se puede considerar que el material que falla, de acuerdo con la hipótesis de Coulomb, presentará un desplazamiento a un ángulo de la línea de fractura igual al ángulo de fricción interna. Esto permite determinar la resistencia del material al comparar el trabajo mecánico externo generado por la carga aplicada con el trabajo desarrollado por el esfuerzo y deformación que presenta el material. Por conservación de energía, la suma de estos debe ser cero y por ende se puede determinar el esfuerzo de fractura.

Coulomb presentó su teoría en 1776 en "*Essai sur une application des règles des maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture*", mientras que Mohr trabajó un siglo después. El criterio de Mohr-Coulomb representa la envolvente que es generada a partir de dibujar el esfuerzo normal y el cortante máximo (figura 5.40) de tal forma que:

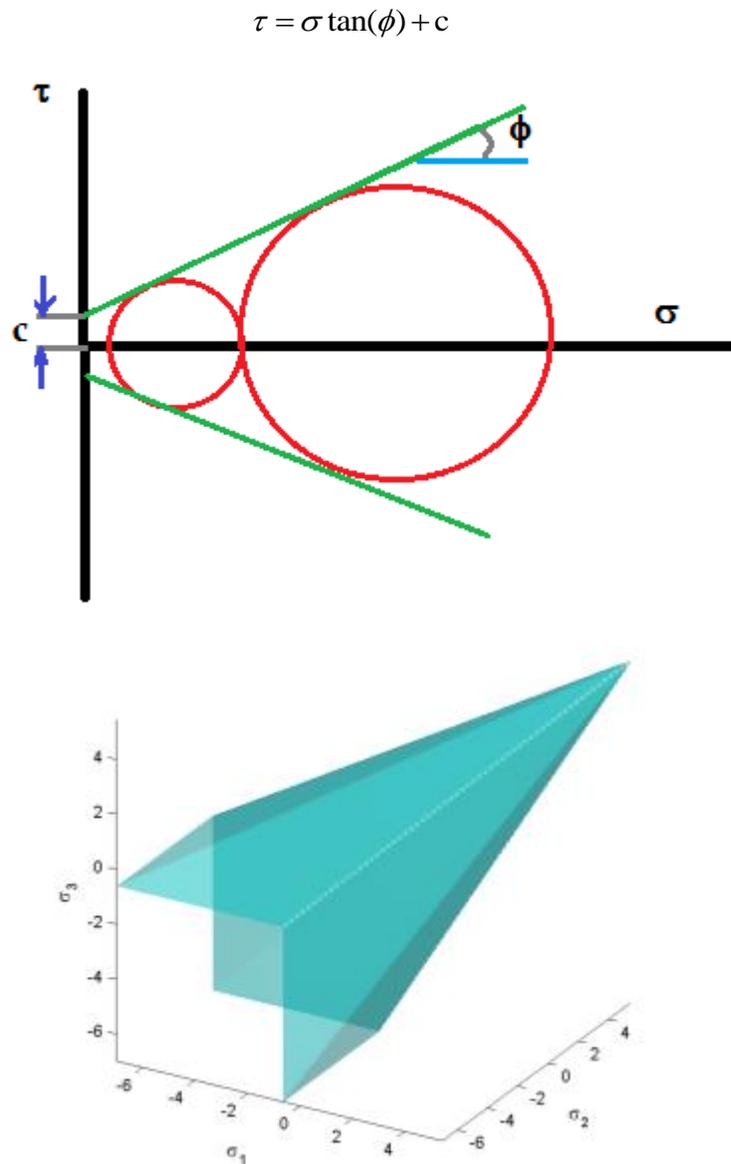


FIGURA 5.40 Superficie de fluencia Mohr-Coulomb

Criterio de Tresca o del máximo cortante

Para mediados del siglo XIX, se hizo evidente que los criterios de falla desarrollados hasta ese momento no correspondían con la realidad experimental en metales y aleaciones, ya que en estos la falla se presenta al inicio de la deformación permanente (el diseño se realiza en el dominio elástico). Por otra parte, se aceptó que el flujo plástico en los metales se relacionaba con los esfuerzos de corte, los cuales a su vez se pueden describir en función de los esfuerzos principales, es entonces que en principio $\sigma_0 = f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$; sin embargo, con esta

perspectiva, Henry Tresca (ingeniero mecánico francés y al cual se le considera el padre de la teoría de la plasticidad ya que estudió las deformaciones no recuperables) inició sus trabajos en 1864 para describir una relación entre el estado general de esfuerzos y el esfuerzo de flujo determinado experimentalmente a través de un ensayo de tracción. De estos trabajos, se desprende que la cedencia se produce cuando el cortante máximo alcanza un valor crítico (de donde toma su nombre el criterio de falla) $\tau_2 = k$, por otra parte $\tau_2 = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$; considerando

que el criterio debe ser válido bajo cualquier estado de esfuerzos se tiene que $k = \frac{\sigma_0}{2}$, esto es,

el cortante crítico es igual a un medio del esfuerzo de cedencia σ_0 ; entonces, el criterio se puede expresar, en principio, como: $\sigma_0 = \sigma_1 - \sigma_3$, descripción que relaciona el valor experimental con los esfuerzos principales.

Por otro lado, el cortante asociado con el esfuerzo hidrostático es igual a cero $\tau(\sigma_H) = 0$, razón por la cual al definir gráficamente el criterio de Tresca en el espacio vectorial de los esfuerzos, y particularmente considerando como base los ejes principales, se encuentra que este criterio describe en el plano, cuya normal es la componente hidrostática, un hexágono regular (figura 5.41a), mientras que en el espacio describe un prisma de base hexagonal cuya generatriz está dada por la dirección del hidrostático (este eje está igualmente inclinado con relación a los ejes principales) (figura 5.41b).

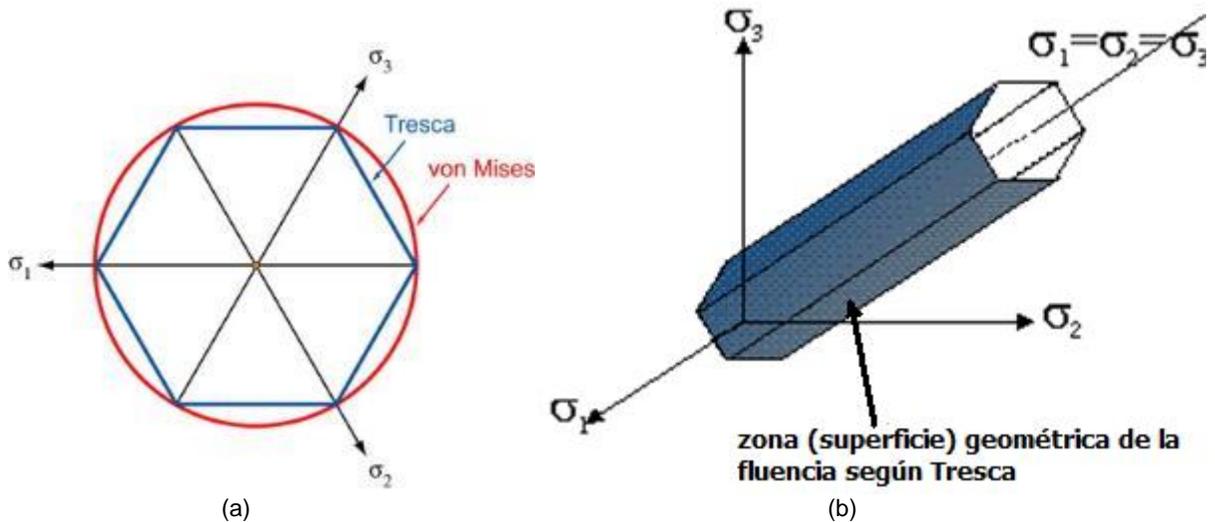


FIGURA 5.41 (a) Descripción del criterio de Tresca sobre el plano del hidrostático (plano octaédrico) (b) Criterio de Tresca en el espacio vectorial de los esfuerzos

Criterio de Von Mises-Hencky o de la energía de distorsión

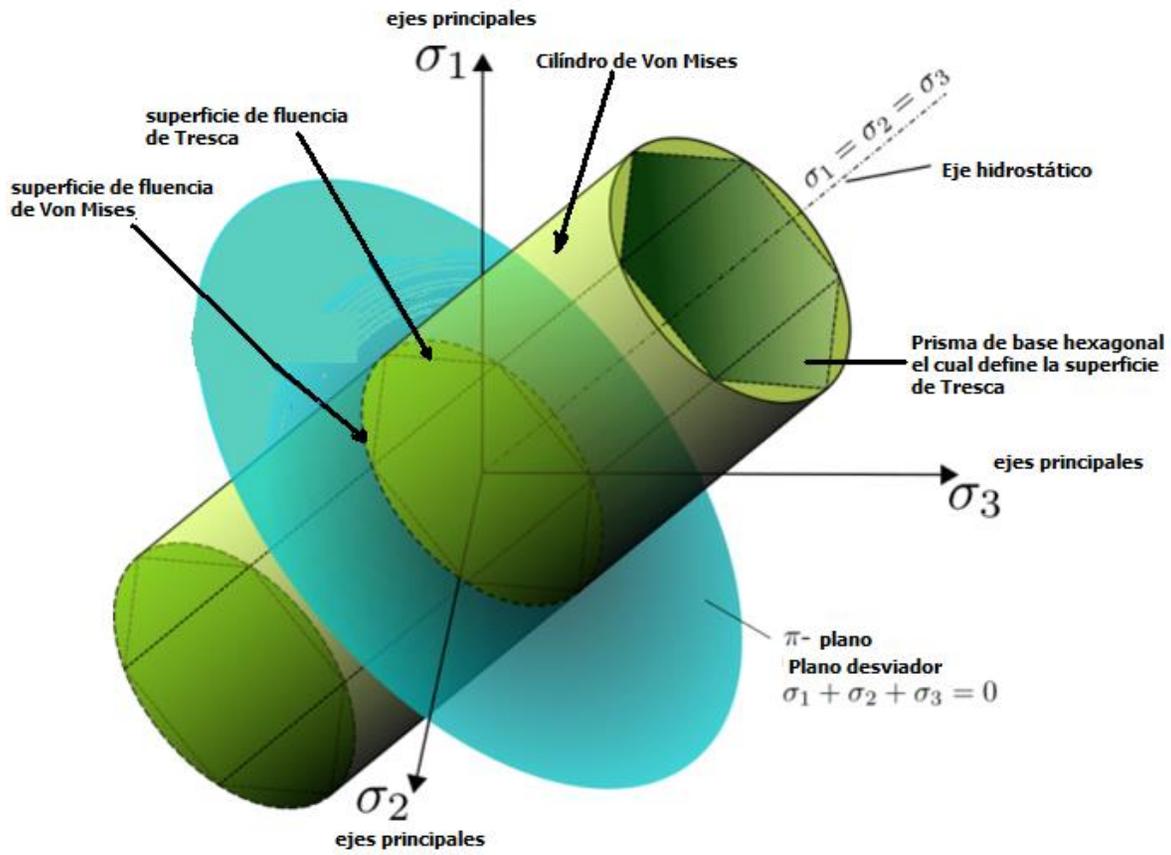
A fines del siglo XIX, se encontró que en muchos casos existían significativas diferencias entre los esfuerzos de flujo determinados de manera experimental con los descritos a través del criterio de Tresca, por otra parte, dicho criterio solo consideraba uno de los esfuerzos de corte principales $[\tau_2]$, por lo que se podría concluir que la falta de precisión se debía a la falla inherente al no considerar la totalidad de estos $[\tau_1, \tau_2, \tau_3]$. Con base en lo anterior, se requiere de una nueva descripción del estado de esfuerzos que no tome en consideración la componente hidrostática del esfuerzo (σ_H), ya que esta no aporta a los cortantes, por tanto, se define entonces el desviador de esfuerzos S_{ij} mediante $\sigma_{ij} = S_{ij} + \sigma_H \delta_{ij}$, dado que la descripción debe de ser independiente a la base, entonces $\sigma_0 = f(J_1, J_2, J_3)$, donde J_1, J_2, J_3 representan los invariantes del desviador de esfuerzos. Como el primer invariante es proporcional al esfuerzo hidrostático asociado y como el hidrostático del desviador es igual a cero, entonces $J_1 = 0$, por lo que en sentido estricto cualquier criterio de fluencia se debe presentar en la forma $\sigma_0 = f(J_2, J_3)$.

En particular, el criterio de Von Mises indica que la cedencia se presenta cuando el segundo invariante del desviador de esfuerzos alcanza un valor crítico $\sigma_0 = f(J_2)$, esto es: $J_2 = k^2$, desarrollando el segundo invariante se tiene $(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 6k^2 = 2\sigma_y^2$, resulta evidente que cada uno de los términos representa a un cortante máximo ya que $\sigma_1 - \sigma_2 = 2\tau_3$, $\sigma_2 - \sigma_3 = 2\tau_1$, $\sigma_3 - \sigma_1 = 2\tau_2$ la relación se puede expresar también como $(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) - (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1) = 3k^2 = \sigma_y^2$

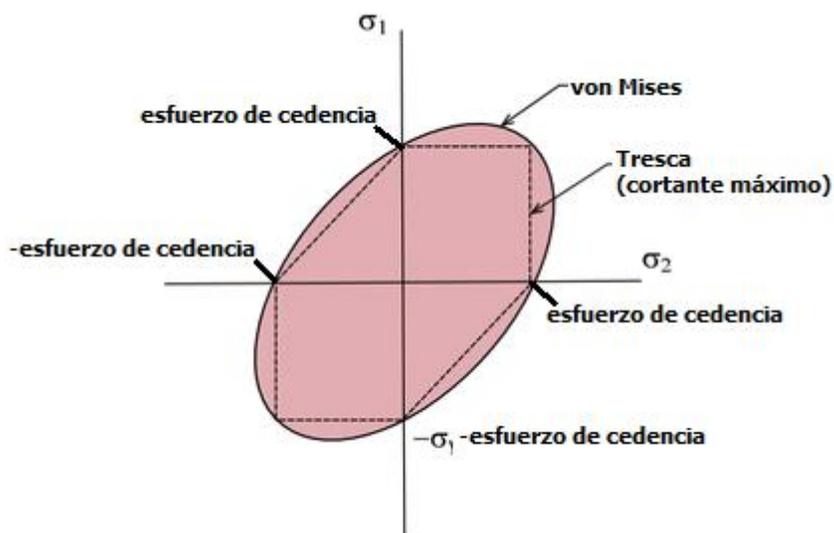
Considerando la representación general, la relación se expresa:

$$(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\tau_{12}^2 + \tau_{23}^2 + \tau_{31}^2) = 6k^2 = 2\sigma_0^2$$

Esta ecuación en el espacio vectorial de los esfuerzos define un cilindro (figura 5.42a y b), donde el plano del desviador representa un círculo.



(a)



(b)

FIGURA 5.42 (a), (b) Lugar geométrico de la fluencia de acuerdo a Von Mises y Tresca

El esfuerzo k en el criterio de Von Mises representa el esfuerzo de flujo del material a corte puro y está relacionado con el esfuerzo de cedencia bajo condición de carga uniaxial σ_0 , como

$k = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}}$. En sentido estricto, a través de J_2 se determina un esfuerzo eficaz o de Von Mises

σ_{VM} , la fluencia se presentará siempre que este esfuerzo alcance al valor de flujo

$$\sigma_0 - \sigma_{VM} = 0.$$

Por otra parte, todo lo antes expuesto se puede presentar como $\sigma_{VM}^2 = 3J_2$

$$\sigma_{VM} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\sigma_{VM} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{1}{3} \sigma_{VM}^2 = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij}$$

donde el término S_{ij} se refiere al desviador de esfuerzos.

Para 1924, Heinrich Hencky (1885-1951) propuso una explicación física a la teoría de von Mises indicando que la cedencia se presentaba cuando la energía de distorsión del cuerpo alcanzaba un valor crítico, esto es, que el segundo invariante del desviador de esfuerzos J_2 representaba la energía de cambio de forma del cuerpo. Por su parte, Nadai, en 1937, completó la descripción al proponer que la cedencia se presenta cuando el cortante octaédrico τ_{oct} alcanza un valor crítico; esto es, el estado de esfuerzos se descompone en dos términos: la componente hidrostática σ_H la cual no tiene efecto en la cedencia (y es normal al plano octaédrico) y el cortante octaédrico, de tal forma que:

$$\tau_{oct} = \sqrt{\frac{2}{3}} J_2$$

$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sigma_0$$

El criterio de Von Mises-Hencky presenta una muy aproximada correlación entre el valor definido teóricamente con el valor medido en forma experimental; además, permite en forma muy simple considerar el endurecimiento, ya que solo habrá que considerar círculos concéntricos a partir del valor medido en el caso de que el comportamiento sea isotrópico (figura 5.41) o se distorsionará el cilindro en función del grado de anisotropía característica del material (figura 5.42), de tal forma que el criterio se expresa (a esto se le conoce como criterio de fluencia de Hill):

$$\alpha(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \beta(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + \eta(\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 1$$

donde α, β, η son constantes medidas experimentalmente, las cuales están relacionadas con el esfuerzo de cedencia. Para un estado general, la expresión queda:

$$\alpha(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + \beta(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + \eta(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 2(\phi\sigma_{12}^2 + \phi\sigma_{23}^2 + \kappa\sigma_{31}^2) = 1$$

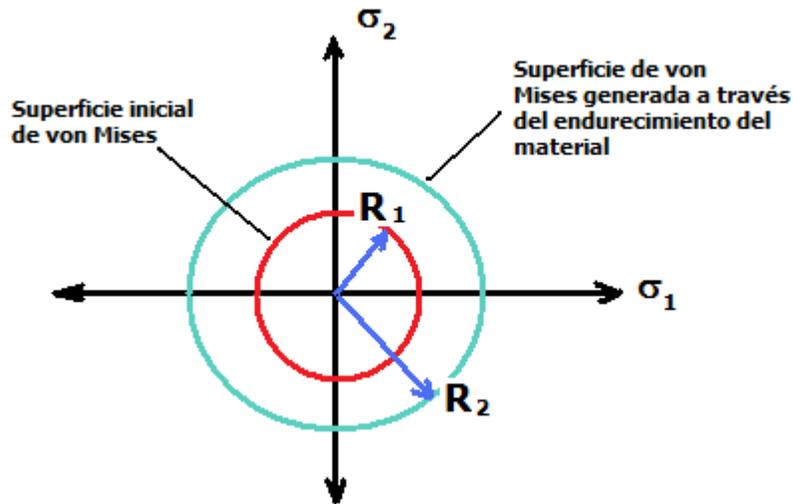


FIGURA 5.43 Considerando el criterio de Von Mises, el endurecimiento se manifiesta como un incremento en el radio de la superficie de fluencia. En el caso de que el material presente un comportamiento anisotrópico durante el endurecimiento, entonces se manifestará como una distorsión en la geometría, no generándose un círculo sino modificándose el radio en función del eje

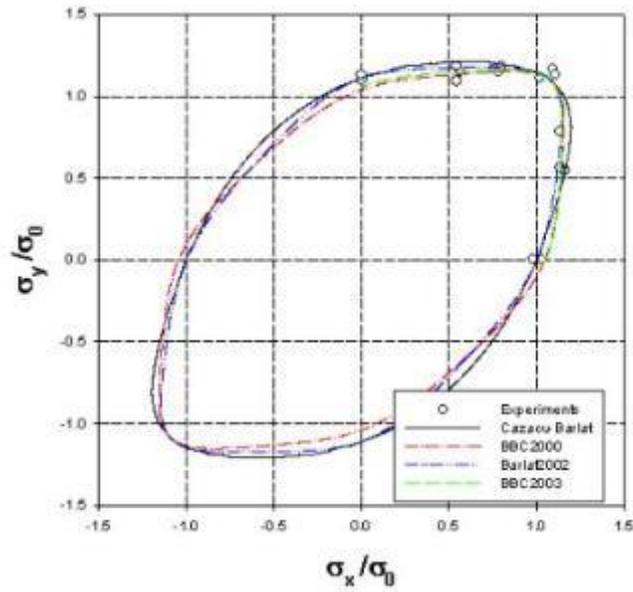


FIGURA 5.44 Comportamiento anisotrópico

Como corolario es conveniente comentar que cualquier criterio de fluencia deberá de ser independiente de la base y del estado de esfuerzos, y debe de relacionarse con los invariantes del desviador de esfuerzos.

CAPÍTULO 6

FORJA

6.1 GENERALIDADES

La forja es la forma más antigua de trabajar los metales, sus antecedentes se encuentran en la labor de los herreros y en las fraguas de los tiempos bíblicos y mitológicos. En sus orígenes representó la deformación del material (hierro) por efecto de martilleo al colocarlo sobre el yunque (figura 6.1).



FIGURA 6.1 Vulcano forjando las armas de Aquiles [Giulio Romano 1499-1546, Colección Value Art]

La Revolución Industrial significó la sustitución de la fuerza muscular del herrero por la de las máquinas (figura 6.2). En la actualidad existe una gran variedad de equipos para forja, los cuales permiten la obtención de piezas de tamaños que van desde unas cuantas decenas de gramos, por ejemplo un remache, hasta mucho más de 100 ton, como puede ser un rotor de turbina.

El proceso de forja se define como una operación de conformado mecánico por la cual se obtienen piezas de sección transversal irregular al comprimir un bloque metálico, denominado tocho, entre dos útiles de trabajo, llamados estampas, donde se aprovecha la plasticidad del material. En virtud de los elevados niveles de deformación inherentes al proceso, este se realiza normalmente en caliente.



(a)



(b)

FIGURA 6.2 (a) El dibujo muestra la forja de una armadura durante la Edad Media. (b) La revolución industrial permitió sustituir la fuerza del herrero por la de las máquinas

Este proceso permite fabricar piezas de materiales ferrosos y no ferrosos en dimensiones, geometrías y pesos muy variados (figura 6.3) que sería imposible obtener mediante otras operaciones.



FIGURA 6.3 Diversas piezas forjadas

Una de sus principales ventajas es que la pieza de trabajo sale de este proceso con dimensiones y geometría cercanas a las finales, implicando mayor facilidad y rapidez para su maquinado.

Si bien se trata del proceso de conformado metálico más antiguo, este ha sufrido en los últimos 20 años una revolución que le permite responder a la globalización y a la manufactura sustentable. A la fecha se han abierto sensiblemente sus posibilidades de aplicación, no restringiéndose solo a los aceros sino que se ha extendido su uso para aleaciones ligeras, a la vez de la aplicación de paqueterías de modelado, que junto con las de CAD han permitido reducir notablemente los tiempos de diseño y, por consecuencia, los necesarios para iniciar la producción. Esto ha permitido optimar los procesos al reducir la carga y energía de deformación, y producir las piezas con tolerancias más cerradas, a la vez disminuir el material utilizado y los tiempos de maquinado.

Esta como todas las industrias demanda mayor calidad a menor costo, mayores tasas de retorno del capital, mejora en la productividad del capital, a la vez de reentrenar al personal para que se adecue a los nuevos requerimientos del mercado.

Las sucesivas crisis económicas que se presentaron de 1979 a 1990 dieron como resultado que, solo en EUA, el 25% de la industria de la forja cerrara sus puertas, lo cual ha tenido como consecuencia, para inicios de la segunda década del siglo XXI (2017), una industria que demanda personal calificado que le permita mejorar el diseño de sus estampas, reduciendo los tiempos de producción de estas, a la vez de incrementar su vida útil (se espera que la duración de las

estampas para 2020 se de 10 veces la que se tenía en 1990). Esto ha traído modificaciones como el cambio rápido de herramientas, mejor diseño de etapas intermedias, eliminación de grafito como lubricante y sustitución por aceites sintéticos. Lo anterior se traduce en disminución en el consumo de energía del 20%, reducción de rebabas 15% e incremento de productividad en 50%.

6.2 CLASIFICACIÓN DE LA FORJA

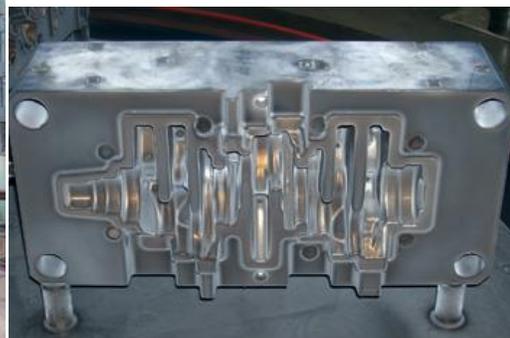
El proceso de forja se clasifica de muy diversas formas, dependiendo del estado del material que se va a forjar y de la forma del proceso, esto es:

TABLA 6.1 Clasificación de la forja

FORJA	Por las condiciones del proceso	Frío Caliente
	Por las características de las herramientas	Matriz abierta Matriz cerrada Forja con rodillos



(a)



(b)

FIGURA 6.4 (a) Forja libre o abierta. (b) Dado para forja en estampa

FORJA EN FRÍO. Fundamentalmente, se efectúan operaciones de acabado o aquellas que se caracterizan por pequeños porcentajes de deformación.

FORJA EN CALIENTE. El 90% de piezas forjadas son hechas con este método. Con el calentamiento correcto de la pieza se mejora la capacidad de esta para cambiar de forma y dimensiones, sin que se presenten fallas o agrietamiento.

Este método se clasifica según la complejidad del diseño de la matriz, la cual está constituida por un par de bloques con dimensiones e impresiones determinadas que sirven para dar forma al metal mediante un mecanismo, como el mostrado en la figura 6.5, que acciona las herramientas formadoras, haciendo contacto con las piezas de trabajo, comprimiéndolas ya sea por presión (prensa), o por impacto (martillo).



(a)



(b)

FIGURA 6.5 (a) Forja en caliente en un martillo de bastidor abierto. (b) Forja en prensa. En ambos casos se trata de forja abierta [Anyang Forging Press (Group) Industry Co., Ltd]

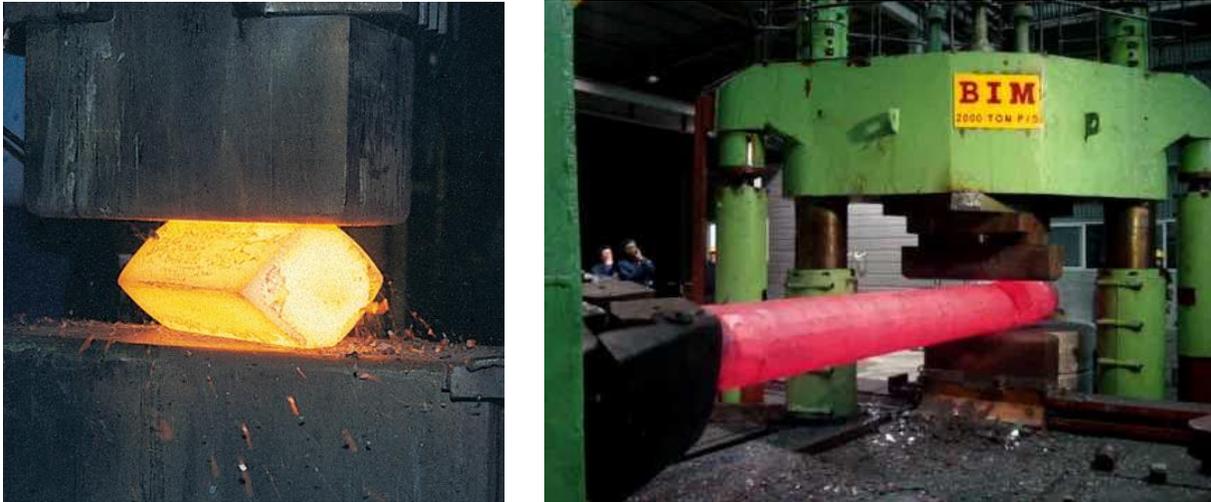


FIGURA 6.6 Ejemplos del herramental utilizado para forja libre [Aqua Energy, Maharashtra, India]

FORJA DE MATRIZ ABIERTA O LIBRE. Este tipo de proceso (figuras 6.5, 6.6 y 6.7a) se emplea para producir formas simples en poco tiempo y con bajo costo, esto es debido a que carecen de detalles y dimensiones exactas. Las formas producidas con matriz abierta usualmente requieren de maquinaria adicional para poder terminar la geometría de la pieza.

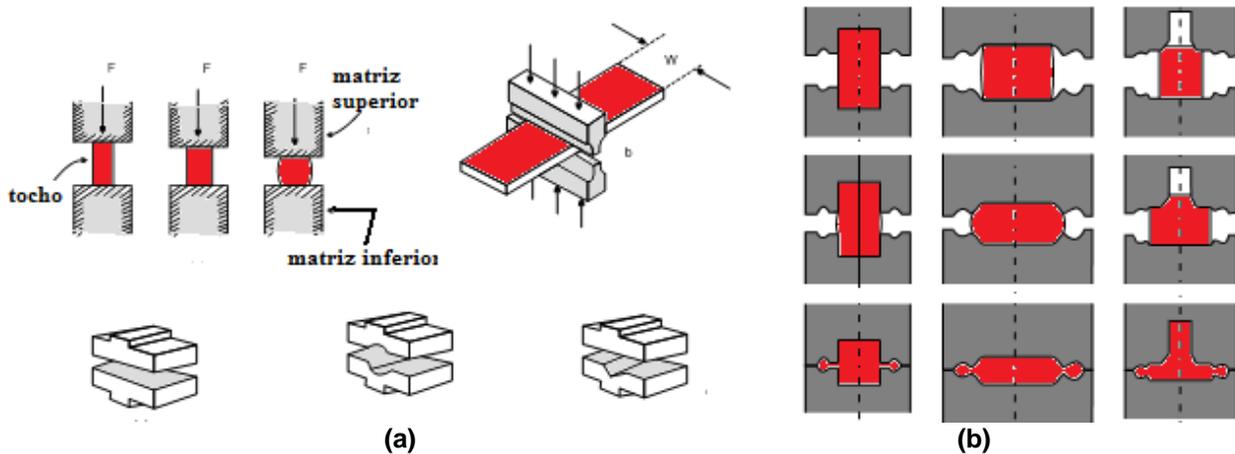


FIGURA 6.7 (a) Ejemplo de la geometría de herramientas para forja libre
(b) Etapas y geometrías para forja en estampa

FORJA DE ESTAMPA. En este proceso (figura 6.7b) se utiliza una matriz, dado o estampa con una o varias cavidades de la geometría de la pieza. El impacto de la maza o la presión del émbolo sobre la pieza de trabajo, la obliga a llenar todo el hueco de las matrices coincidentes. La estampa puede constar de varias etapas (figura 6.8) que favorezcan la deformación del material y garanticen precisión y duración del herramental. El número de etapas estará definido por la complejidad de la pieza a producir.

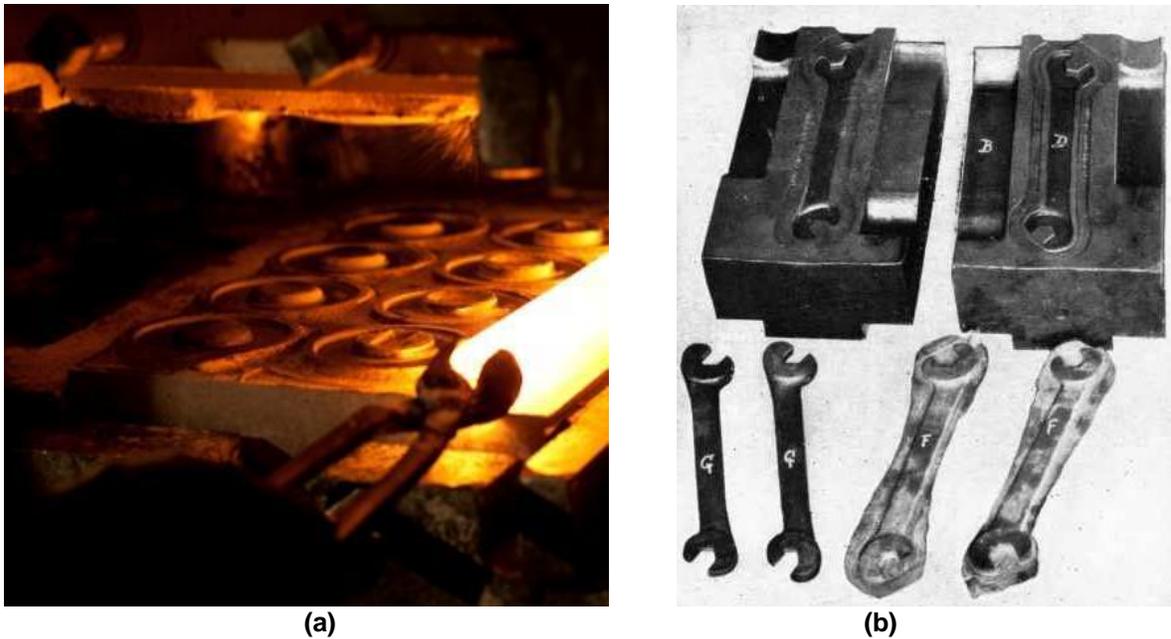


FIGURA 6.8 Ejemplo de forja en estampa **(a)** Colocación del lingote en el dado, previo al proceso de forja en estampa. **(b)** Dado con etapa iniciadora, intermedia y de acabado para la forja de una llave de boca

FORJA CON RODILLOS. Este proceso se emplea para reducir la sección transversal de barras, razón por la cual se aplica en operaciones de preforma para la posterior forja en estampa, véase la figura 6.9. Por la forma en que se realiza y debido a su limitada aplicación, en muchas ocasiones no se le menciona al definir los procesos de forja; normalmente involucra grandes deformaciones, por lo que se efectúa en caliente. Se trata de un método de aplicación particular y prácticamente en desuso.



FIGURA 6.9 Equipo para forja con rodillos

6.3 OPERACIONES DE FORJA

En la fabricación de una pieza forjada, lo normal suele ser la utilización de varias fases hasta llegar a la forma final. La denominación de cada una de estas fases se realiza en función de la operación que tienen encomendada, en este sentido se tienen dobladoras, iniciadoras, preparadoras, acabadoras y cortadoras.

Operaciones efectuadas durante el proceso

Recalcado. Representa el incremento en el diámetro del material cuando este se comprime, lo cual involucra entonces una reducción en su altura o espesor. La existencia de fricción entre las herramientas y el metal no puede evitarse, esto da lugar a que el flujo de material sea menor en dichas intercaras que en el centro, por lo que la forma final es un cilindro abarrilado, con mayor diámetro hacia la mitad de su altura (figura 6.10).

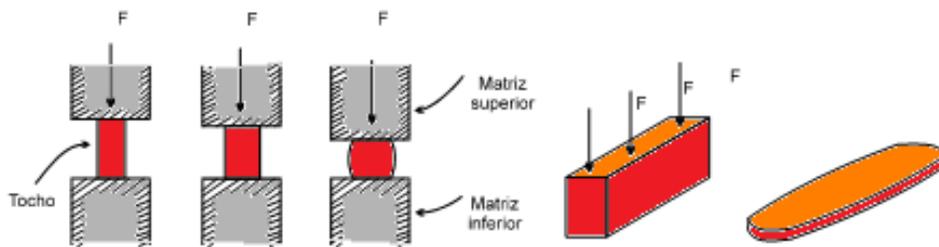


FIGURA 6.10 Recalcado de un tocho durante una operación de forja libre

Rebordeado. Este proceso se hace con estampas para dar forma a los extremos de las barras y acumular metal (figura 6.11).

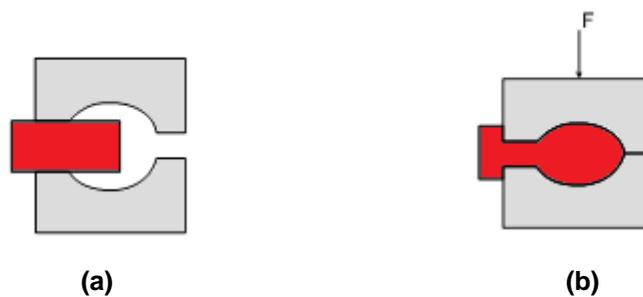


FIGURA 6.11 Rebordeado

Estrangulación o degüello. En la estrangulación se reduce el espesor de una región del metal donde este fluye desde el centro de la matriz (figura 6.12).

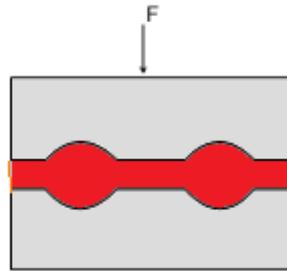


FIGURA 6.12 Estrangulación o degüello

Troquelado. Es la operación que consiste en perforar una pieza (figura 6.13) o en eliminar la rebaba (material excedente).

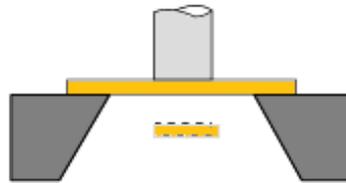


FIGURA 6.13 Troquelado

Consideraciones para el diseño de la estampa

Diseñar correctamente el proceso de fabricación y definir las fases y las máquinas que deben emplearse (figuras 6.14, 6.15 y 6.16), es fundamental para producir piezas mediante procedimientos racionales y económicos que permitan, además, la máxima utilización del material empleado.

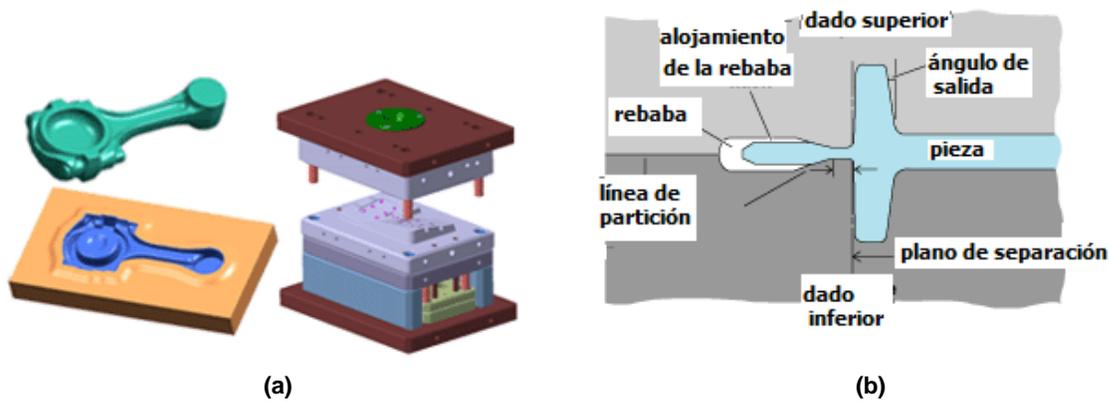


FIGURA 6.14 (a) Geometría de la estampa acabadora. (b) Diseño del cordón y alojamiento de la rebaba



(a)



(b)

FIGURA 6.15 Martillos para forja: (a) Forja libre. (b) Forja en estampa



(a)



(b)

FIGURA 6.16 Prensas para forja: (a) Mecánica. (b) Hidráulica

El costo de la mano de obra, el tamaño del lote, además de, por supuesto, las facilidades de que se disponga, determinarán la forma en cómo se efectúa el proceso; esto es, si se utilizan varias máquinas que trabajen secuencialmente o una sola que cuente de una matriz múltiple.

El primer caso se empleará cuando se trate de series muy grandes, mientras que el segundo se utilizará cuando la producción no justifique la inversión en varias prensas. Cuando las series son muy limitadas (menores a 1000 piezas), no es conveniente fabricar matrices múltiples, con lo que se sacrifica entonces precisión al emplear una sola etapa para la fabricación.

Si tuvieran que fabricarse unas pocas piezas de un determinado tipo, sería suficiente una matriz de un acero de poca calidad e incluso no se requeriría mucha precisión en el maquinado del dado, ya que el mecanizado posterior de las piezas forjadas compensará las deficiencias de estas y se habrá ahorrado mucho dinero en la fabricación de la matriz. Incluso el proceso de fabricación depende del número de piezas, por ejemplo, para grandes series es importante diseñar el número suficiente de fases que permita una buena utilización del material y gran duración de las matrices.

6.4 MATERIALES USUALMENTE FORJADOS

En general, podrán ser forjados todos aquellos materiales y aleaciones que presenten una buena plasticidad a la temperatura de trabajo, por lo que los cúbicos de cara centrada y algunos cúbicos de cuerpo centrado y hexagonales compactos podrán forjarse; los más comunes son los aceros al carbono y de baja aleación. Materiales con alguna aplicación industrial son, por ejemplo:

- Aceros al carbono y grado maquinaria
- Aceros inoxidable
- Aceros refractarios
- Aluminio y aleaciones de aluminio
- Cobre y sus aleaciones
- Magnesio y sus aleaciones
- Titanio y sus aleaciones
- Níquel y sus aleaciones
- Berilio
- Algunas aleaciones de materiales refractarios, tales como el tungsteno, niobio y molibdeno

La forjabilidad en los aceros estará determinada por su contenido de carbono y de otros aleantes. Los aceros se pueden clasificar como:

Aceros de forja normal

$$C < 0.65\% \text{ y } Mn + Ni + Cr + Mo + V + W < 5\%$$

Aceros de forja difícil

$$C > 0.65\% \text{ o } Mn + Ni + Cr + Mo + V + W > 5\%$$

De los aceros inoxidable los de más difícil forja son los austeníticos, por su gran tenacidad. Se debe tener precauciones durante el enfriamiento de los inoxidables martensíticos para evitar un temple involuntario, que se puede traducir en limitada maquinabilidad, así como en agrietamiento del material. En general, los inoxidables ferríticos son más forjables.

Los aceros refractarios y de alta aleación presentan inconvenientes durante el proceso, ya que, generalmente, su plasticidad es reducida por la presencia de algunos microconstituyentes frágiles, como carburos y nitruros.

En general, existe una gran cantidad de aleaciones de aluminio forjables, aunque se debe tener cuidado ya que las condiciones de proceso de estas varían notablemente en función de sus aleantes.

Tanto el cobre como varias de sus aleaciones pueden ser conformados por forja. La aleación de cobre de más fácil forja es el latón 60/40, la mayor dificultad corresponde al cuproaluminio 90/10. Estas piezas tienen aplicaciones muy variadas dependiendo de la aleación de que se trate, ya que pueden ser utilizados en contactos y conexiones eléctricas, ornamentación, herramientas, pernos, engranes, soportes, etc.

Por sus características mecánicas se recomienda que el magnesio y sus aleaciones se forjen en prensas hidráulicas o en prensas mecánicas lentas. En general, estas piezas son demandadas por la industria aeronáutica y automotriz en condiciones de servicio, hasta de 200 °C.

El titanio y sus aleaciones se pueden forjar con geometrías similares a las obtenidas para los aceros al carbono, aunque se requieren mayores presiones. Se deberán tener cuidados especiales durante las operaciones de precalentamiento, así como será necesario el empleo de atmósferas inertes o al vacío. Las piezas de titanio y sus aleaciones son demandadas por la industria química y aeroespacial, por ejemplo, refuerzos y elementos estructurales en aviones, álabes y otros componentes de turbinas.

Existe una gran diversidad de aleaciones de níquel que pueden ser forjadas, como el monel, inconel, hastelloy, etc.; en general, se requieren temperaturas similares que para los aceros al carbono, y se demandan mayores presiones. Por sus características, estos materiales son solicitados principalmente por la industria química.



FIGURA 6.17 Diversas piezas producidas por forja en metales no ferrosos

6.5 CLASIFICACIÓN DE LAS MÁQUINAS PARA FORJA

Estas máquinas se clasifican por la forma de hacer contacto con el material de trabajo; esto es, por impacto y a presión.

Máquinas para forja por impacto

Los martillos (figuras 6.15 y 6.18) cuentan con una maza que se desliza en una corredera, la cual, cuando el movimiento es vertical, tiene una carrera descendente, y ejerce una fuerza de golpeo contra un componente estacionario o yunque que se encuentra cerca de la base del martillo. La mitad superior de la matriz se coloca en la mesa móvil o corredera que tiene el peso que se va a proyectar, la mitad inferior se encuentra colocada sobre el yunque de la máquina. Este tipo de ingenios no generan una deformación uniforme sobre el material, ya que las mayores

aceleraciones se presentan sobre las partículas que se encuentran en contacto con la parte móvil del dado de forja, asimismo gran parte de la energía de impacto no se aprovecha en la deformación (50%), por lo que dicha componente debe de ser absorbida por la cimentación del martillo. Por consecuencia, el yunque tiene una masa muy superior al elemento móvil $[m_y \approx 10 a 20m_m]$, de esta relación dependerá la energía absorbida en la deformación, por otra parte, como ya se mencionó la cimentación debe de estar aislada del resto de las estructuras ya que de otra forma causará deterioro en las estructuras circundantes. La masa móvil es muy variada ya que puede ir de unos 50 Kg a unos 2,500 Kg. Dada la falta de precisión intrínseca a su aplicación, este tipo de equipos se encuentra en franco desuso.

TABLA 6.2 Máquinas para forja por impacto

Considerando accionamiento	Simple efecto	Martillo de caída libre	De tablón De cadena De cuerda De tambor
		Martillos de caída libre elevados por aire	
	Doble efecto	Martillos de potencia Martillos de contragolpe Martillos de pequeña capacidad accionados por ballesta o por mecanismos de tipo excéntrico	
Considerando su aplicación	Martillo para forja libre		
	Martillo para forja con matriz		
Considerando el tipo de estructura o bastidor	Bastidor abierto o simple bastidor Bastidor cerrado o doble bastidor		

Máquinas para forja por aplicación de presión

Por su accionamiento se clasifican en la siguiente tabla:

TABLA 6.3 Clasificación de las máquinas para forja por aplicación de presión

Prensas	Mecánicas	Husillo-tuerca De cuña De rodillera De biela-cigüeñal
	Hidráulicas	Aplicación más lenta de la presión, mayor eficiencia, mayor costo inicial

En general, las prensas (figuras 6.16 y 6.19) se caracterizan porque la deformación del material es homogénea, así como por una mayor precisión y calidad de las piezas producidas. Aun cuando la velocidad de aplicación de la carga es menor, su productividad es mayor, ya que solo se requiere una carrera de la corredera para obtener la impresión que se desea. La principal desventaja al compararlas con los martillos es su mayor costo inicial.

Las prensas para forja incorporan una corredera que se mueve en dirección vertical para ejercer la presión sobre la pieza de trabajo, en contraste con los característicos golpes de los martillos. En general, todas las prensas pueden producir todos los tipos de forja producidos por los martillos.

Prensa hidráulica. La corredera de una prensa hidráulica es manejada por pistones. Seguido a una aproximación rápida, la corredera se mueve con una velocidad baja realizando la compresión de la pieza de trabajo, que se retiene en la matriz inferior. La velocidad de compresión puede ser exactamente controlada así, permitiendo también el control de la velocidad del flujo del metal. Esta característica es particularmente conveniente ya que produce forjas con tolerancias cerradas.

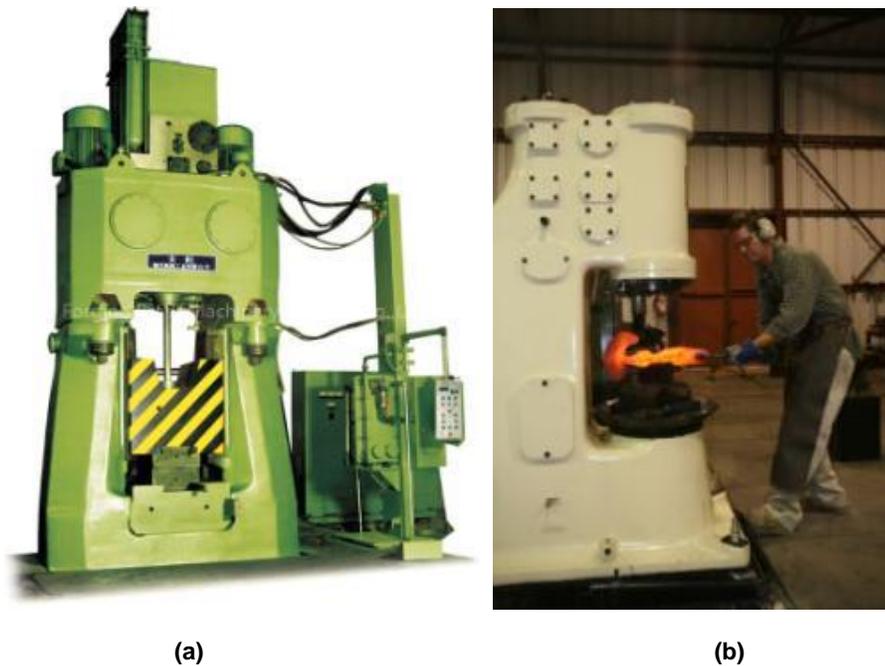


FIGURA 6.18 (a) Martillo de bastidor cerrado para forja en estampa. (b) Martillo de accionamiento neumático, 75 kg de la masa deslizante, 1 kJ de energía y hasta 210 golpes/minuto

Las capacidades de las prensas hidráulicas están entre 300 y 60,000 toneladas.

Principales ventajas de la prensa hidráulica:

- La presión puede ser modificada en cualquier punto de la carrera, de acuerdo con las necesidades del proceso.
- El porcentaje de deformación puede ser controlado al igual que la variación uniforme durante la carrera, si se requiere.



(a)



(b)

FIGURA 6.19 (a) Prensa para forja abierta con capacidad de 4000 ton, (b) Prensa hidráulica para forja en estampa con capacidad de 2000 ton

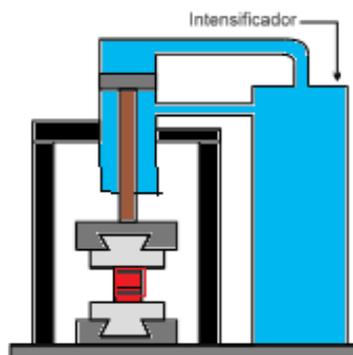


FIGURA 6.20 Descripción esquemática de la operación de una prensa hidráulica

Desventajas de las prensas hidráulicas:

- El costo inicial de la prensa hidráulica es más alto que el de la prensa mecánica de equivalente capacidad.
- La acción de la prensa hidráulica comparada con la mecánica es más lenta.
- La menor velocidad de accionamiento de la prensa hidráulica trae como consecuencia la disminución de la vida de la matriz debido al calentamiento de esta.

SELECCIÓN DE MARTILLOS Y PRENSAS PARA FORJA. La selección de los equipos para forja depende idealmente de la geometría, tamaño de la pieza y número de estas, así como de la carga demandada para su producción.

Es difícil relacionar la energía de los martillos de caída libre para los pesos y dimensiones de las piezas que puedan producirse, debido a las limitaciones impuestas por el material y la forma específica de la forja. En general, un martillo de 454 kg (1,000 lb) puede producir piezas de acero al carbono y aleaciones que pesen arriba de 1.36 kg (3 lb); uno de tabla de 1,361 kg (3000 lb) con una potencia de golpeo alrededor de 1,935 kg-m (14,000 ft-lb) se puede emplear en la fabricación de piezas que pesen arriba de 11.4 kg (25 lb). Por su parte, un martillo de 2,537 kg (5,000 lb) puede fabricar forjas convencionales que pesen arriba de 454 kg (1000 lb).

Como se comentó, las prensas se emplearán en el caso de piezas de configuración más compleja, cuando se requiere mayor precisión y para lotes mayores a las 10,000 unidades.

Para la selección de las prensas será necesario calcular primero la presión y la carga de forja demandada por la pieza, además, es necesario diseñar las etapas intermedias para revisar la posibilidad de que la estampa se adapte a las dimensiones de la prensa. Una vez cubiertos ambos requisitos se tendrá la seguridad de que la pieza se puede producir con el equipo propuesto.

6.6 ANÁLISIS DE LAS PRESIONES Y DEFORMACIONES QUE SE PRESENTAN DURANTE EL PROCESO DE LA FORJA

ANÁLISIS DE LA DEFORMACIÓN EN UN PROCESO DE FORJA ABIERTA. Los procesos de forja abierta se pueden considerar como los equivalentes modernos del proceso de forja de herrero, en donde la fuerza humana ha sido reemplazada por martillos o prensas.

Este tipo de procesos son empleados en la producción de grandes piezas con geometrías simples.

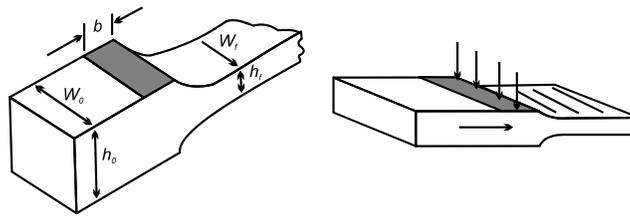


FIGURA 6.21 Operación de ensanchado (el área sombreada representa el lugar donde golpea el dado)

El análisis más sencillo para este proceso es aquel que considera la deformación de una placa entre estampas planas (figura 6.21). Aun cuando este tipo de operaciones son muy sencillas se deberá tener cuidado para evitar problemas tales como el pandeo del material. De los estudios de Wistreich y Shutt (1959), se desprende que el cociente del espesor inicial al espesor final será menor a 1.3.

La reducción del espesor implica un alargamiento del material o un aumento en el ancho. Estos alargamientos y ensanchamientos no pueden ser determinados analíticamente, sino que deben ser obtenidos experimentalmente para cada material.

La relación o cociente de mordedura es el parámetro que usan los operadores de las máquinas para conocer las dimensiones de dichos alargamientos y extensiones:

$$\text{Relación de mordedura} = \frac{b}{W_0}$$

Donde

W_0 = Ancho inicial de la pieza

b = Longitud que va a ser deformada

Para evitar problemas por falta de homogeneidad, el cociente de mordedura se recomienda sea mayor a 0.3.

El coeficiente de ensanchamiento (S) puede ser definido de la siguiente manera:

$$\text{Coeficiente de ensanchamiento } (S) = \frac{\text{aumento del ancho}}{\text{disminución del espesor}}$$

Del trabajo experimental de Olliver y Ortiz (1990), se demuestra que:

$$S = 0.183 + 0.325 m - 0.041 m^2$$

Para $0.5 < m < 2$

$$S = \frac{m}{1 + 1.065 m}$$

Para $m > 2$ y $m < 0.5$

Donde

L_0 = Longitud inicial

L_1 = Longitud final

W_0 = Ancho inicial

W_1 = Ancho final

De lo anterior, se observa que si $S = 1$ solo existirá ensanchamiento, y si $S = 0$ solo habrá alargamiento.

Análisis teórico de las presiones y de la carga para la forja libre considerando deformación plana

La carga de forja se puede obtener según la ecuación:

$$F_f = \bar{p}lb$$

donde

F_f = Carga

\bar{p} = Presión promedio

l = Longitud de la pieza

b = Ancho de la pieza

En este análisis, el problema lo representa la determinación de la presión promedio, para ello será necesario hacer un análisis de los esfuerzos presentes durante el proceso de deformación.

Para la determinación de la presión de forja de la figura 6.22 se tiene que:

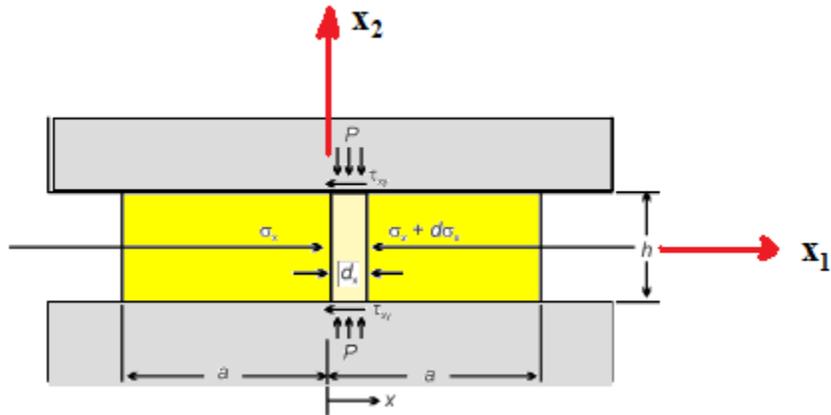


FIGURA 6.22 Esfuerzos que se presentan durante la forja de una placa o cilindro considerando deformación plana

Considerando conservación de cantidad de movimiento para condiciones de equilibrio y despreciando efecto de fuerzas de cuerpo

$$\frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial x_2} = 0$$

$$\frac{\partial \sigma_{21}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{22}}{\partial x_2} = 0$$

De otra forma se puede presentar como:

$$\sum f_{x1} = 0$$

$$\sigma_{x1}hb - (\sigma_{x1} + d\sigma_{x1})hb - 2\tau_{12}bdx_1 = 0$$

donde $\tau_{12} = \sigma_{12}$ = Esfuerzo por fricción

Por definición:

$$\tau_{12} = \mu p = \mu \sigma_{22}; \sigma_{22} = p$$

de lo antes expuesto:

$$hd \sigma_{11} + 2\sigma_{22}\mu dx_1 = 0$$

$$\frac{d\sigma_{11}}{dx_1} + \frac{2\mu\sigma_{22}}{h} = 0$$

Con base en el criterio de fluencia de Tresca, se determina la relación de σ_{11} con σ_{22} :

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 = \sigma'_0$$

$$\sigma'_0 = \sigma_1 - \sigma_3$$

si

$$\sigma_{22} = \sigma_1 [\text{esf. princ. mayor}]$$

$$\sigma_3 = \sigma_{11} [\text{esf. princ. menor}]$$

Entonces, derivando con respecto a x_1 y sustituyendo en el criterio de Tresca:

$$\frac{d\sigma_1}{dx_1} - \frac{d\sigma_3}{dx_1} = \frac{d\sigma'_0}{dx_1} = 0$$

El material se considera isotrópico homogéneo y entonces el esfuerzo de cedencia es constante con la posición, por lo que

$$\frac{d\sigma_1}{dx_1} = \frac{d\sigma_3}{dx_1}$$

Se tiene que:

$$\frac{d\sigma_{22}}{dx} - \frac{2\mu\sigma_{22}}{h} = 0$$

La solución de la ecuación diferencial es

$$\sigma_{22} = c \exp\left(\frac{-2\mu x_1}{h}\right)$$

Considerando la condición límite, esto es para

$$x_1 = a \Rightarrow \sigma_{22} = \sigma'_0 \therefore c = \sigma'_0 \exp\left(\frac{2\mu a}{h}\right)$$

Sustituyendo queda

$$p(x) = \sigma_{22}(x_1) = \sigma'_0 \exp\left(2\frac{\mu}{h}(a - x)\right)$$

Por consecuencia la carga se expresa como una función de presión promedio \bar{p} :

$$f_2 = \bar{p}(2ab) = \bar{\sigma}_{22}(2ab)$$

$$\bar{p} = \frac{1}{a} \int_0^a p(x) dx = \frac{1}{a} \int_0^a \sigma_{22}(x_1) dx_1$$

$$\bar{p} = \bar{\sigma}_{22} = \frac{\sigma'_0}{(2a\mu/h)} \left[e^{\frac{(2\mu a)}{h}} - 1 \right]$$

Haciendo un cambio de variable y definiendo $Q = 2\mu \frac{a}{h}$ la ecuación anterior queda:

$$\bar{p} = \sigma_{22} = \frac{\sigma'_0}{Q} (e^Q - 1)$$

Otros métodos de cálculo

La carga para forja ya sea en matriz abierta como en cerrada, se puede calcular de la siguiente manera:

$$F = \bar{\sigma}_0 AC$$

Donde

σ_0 = Esfuerzo de cedencia promedio durante la deformación

A = Área proyectada por la pieza perpendicular al desplazamiento de la estampa

C = Es un valor que dependerá de las características del proceso. Para la forja abierta de formas sencillas se han propuesto diversos métodos para calcularlo entre otros se puede mencionar la ecuación definida por Hill; con base en un análisis de campo de líneas de deslizamiento para varias condiciones del proceso y considerando deformación no homogénea.

$$C = 0.8 + 0.2 b/h$$

h = Espesor

b = Ancho de la herramienta

Otros autores proponen con base en la experiencia los siguientes valores para C (tabla 6.4).

TABLA 6.4 Factor de complejidad de la forja

Tipo de forja	C
Forja libre o abierta (estampas planas)	1.2 a 2.5
Forja en estampa de formas simples	3.0 a 8.0
Forja en estampa de geometrías complejas	8.0 a 1

En la forja con matriz cerrada se pueden producir piezas que van desde muy simples hasta geometrías muy complicadas. La figura 6.24 muestra cómo va aumentando el grado de complejidad de las piezas de acuerdo con su geometría.

Diseño y cálculo de una estampa para forja

DISEÑO. Las características de las estampas de forja son muy variables y se puede considerar que no existe una solución única para cada caso. Para definir la precisión de la forja, el material de la estampa y la forma cómo se llevará a cabo el proceso, es necesario considerar:

1. Número de piezas que van a producirse, geometría y peso de dichas piezas
2. Material de las piezas
3. Equipo disponible
4. Número y configuración de los pasos de preformado (Para esto será necesario definir el número de piezas, las características del material de partida, el equipo y las tolerancias de la forja).
5. Dimensiones de la rebaba en preformas y pasos acabadores
6. Carga y energía para cada operación de forja
7. Tolerancias requeridas

En la figura 6.23 se muestran algunos diseños de dados para forja.



FIGURA 6.23 Diferentes dados para forja de acero

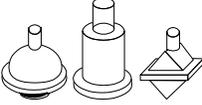
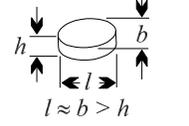
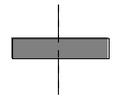
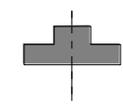
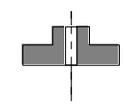
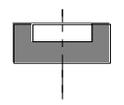
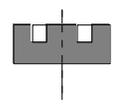
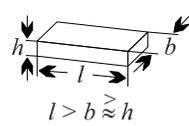
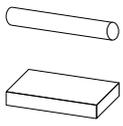
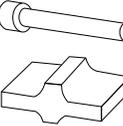
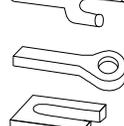
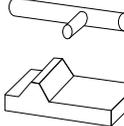
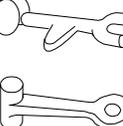
<p>Geometría tipo 1: Esferas, cubos y cilindros</p>  <p>h b $l \approx b \approx h$</p>	<p>Subgrupo</p>	<p>Sin proyecciones</p> 	<p>Con proyecciones unilaterales</p> 	<p>Con proyección periférica</p> 	<p>Con proyección unilateral y periférica</p> 	
<p>Geometría tipo 2: Discos, pueden presentar pequeñas proyecciones y regiones recalçadas</p>  <p>h b $l \approx b > h$</p>	<p>Subgrupo Forma</p>	<p>Sin proyección</p> 	<p>Con proyección (tetón)</p> 	<p>Con proyección y cavidad</p> 	<p>Con proyección perimetral</p> 	<p>Con proyección central y perimetral</p> 
<p>Geometría tipo 3: Formas alargadas, partes cuyo eje longitudinal es dominante</p>  <p>h b $l > b \approx h$</p> <p>1. Partes cortas $l < 3b$</p> <p>2. Partes de media longitud $l = 3...8b$</p> <p>3. Partes alargadas $l = 8...16b$</p> <p>4. Partes muy alargadas $l > 16b$</p>	<p>Subgrupo Forma</p>	<p>Sin proyección</p> 	<p>Con proyecciones paralelas al eje principal</p> 	<p>Con elementos en forma de horquilla</p> 	<p>Con proyecciones asimétricas al eje principal</p> 	<p>Con dos o más proyecciones</p> 

FIGURA 6.24 Clasificación de piezas forjadas con base en su geometría (Dieter G.,1983)

CÁLCULO TEÓRICO DE LA CARGA. Los parámetros que se deben considerar para el proceso de diseño y cálculo de la carga son los siguientes:

a) Dimensionar la pieza.

- Ángulo de salida. De 1 a 7°, esto dependerá de la precisión de la forja, si la superficie es interior o exterior, y de su longitud.
- Sobre-espesor para maquinado. Este se determina en función de la calidad de la operación de forja así como de los acabados requeridos por la pieza, (tabla 6.5).

TABLA 6.5 Sobre-espesores para maquinado

Espesor, anchura o diámetro de la pieza (mm)	Sobre-espesor en cada cara (mm)
30	1
31 a 60	1.5
61 a 120	2
121 a 250	2.5
251 a 500	3 a 6
500	5 a 8

- Tolerancias o sobre-espesores por contracción. Es función del material que se va a forjar y de la temperatura de fin de forja.

Se calcula como:

$$\Delta l_c = \alpha l_0 (T_{ff} - T_\alpha)$$

donde

α = Coeficiente de dilatación, tabla 4.5

Δl_c = Sobre espesor requerido en la pieza

T_{ff} = Temperatura de fin de forja

T_α = Temperatura ambiente o de servicio

l_0 = Longitud inicial

TABLA 6.6 Coeficientes de dilatación térmica

Material	Coeficiente de dilatación lineal (α) (°C ⁻¹)
Acero	11.0x10 ⁻⁶
Aluminio	23.8x10 ⁻⁶
Bronce	17.5x10 ⁻⁶
Cobre	16.5x10 ⁻⁶
Latón	18.5x10 ⁻⁶

- b) Elegir la línea de partición, el tipo y posición del cordón de rebaba.
- c) Definir las líneas de flujo del material con la finalidad de reconocer o determinar las regiones de llenado difícil.
- d) Corregir los elementos característicos por enfriamiento o anisotermia (radios críticos), tabla 6.7.

TABLA 6.7 Corrección de radios críticos (Rio J. del, 1980)]

Radio real (mm)	Radio a emplear para el cálculo de: (mm)		
	Martillo	Prensa mecánica	Prensa hidráulica
5	5	5	
4.5	4.5	4.45	4.45
4	4	3.95	3.95
3.5	3.5	3.45	3.4
3	3	2.95	2.5
2.5	2.5	2.4	2.35
2	2	1.9	1.85
1.75	1.7	1.65	1.60
1.50	1.45	1.35	1.30
1.25	1.15	1.10	1.05
1	0.9	0.75	0.80

- e) Calcular la presión p necesaria para el adecuado llenado de las regiones características, las cuales presentan un radio r y un ancho L o diámetro D .

En lo anterior, se utilizan gráficas como las mostradas en la figura 6.25, para esto se empleará el valor de K , tomando aquella curva que corresponde a la temperatura de forja en cuestión [Rio J. del, 1980].

$$K = \frac{2r_1^*}{D} \text{ o } K = \frac{2r_1^*}{L}$$

donde

D = Diámetro de la pieza

L = Ancho de la pieza

r_1^* = Radio del elemento característico corregido por enfriamiento

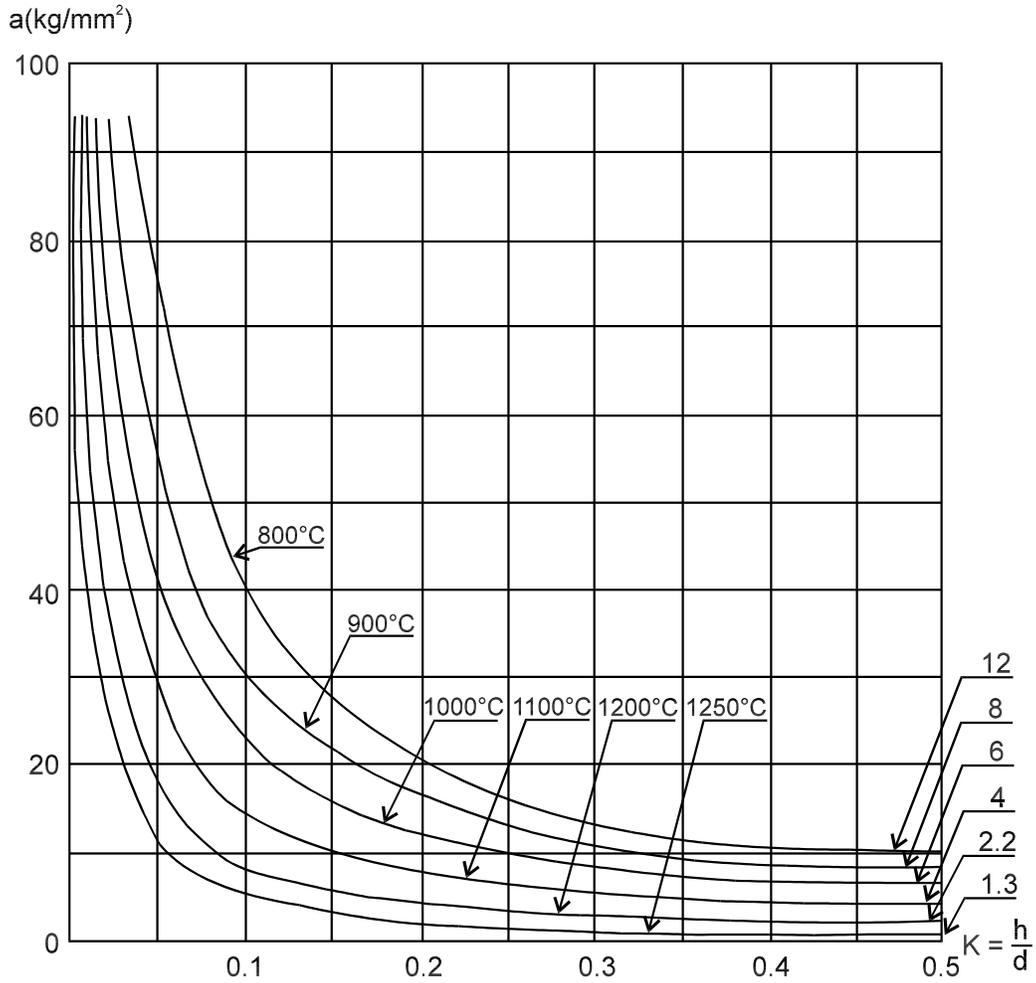


FIGURA 6.25 Umbral de plasticidad al aplastamiento de acero (Rio J. del, 1980)

La presión también se puede calcular a través de la ecuación que fue desarrollada en el análisis de deformación plana, como:

$$p_1 = \frac{\sigma_0}{Q} [e^Q - 1]$$

$$Q = \frac{\mu D}{2r_1} \quad \text{o} \quad Q = \frac{\mu L}{2r_1}$$

f) Calcular la presión necesaria para el correcto llenado de las cavidades o nervios de la pieza (p_2). Esta cavidad presenta un radio en el fondo (r_2), la sección en el fondo es (A_f), la sección de la entrada es (A_e), el coeficiente de fricción del material con las paredes laterales de la estampa es (μ). La presión p_2 se calcula gráficamente empleando curvas como las de la figura 6.26 y la ecuación

$$p_2 = p_2' + p_{am} + p_{rm} + \Delta p + p_\alpha$$

donde

l = Ancho en el fondo de la cavidad

l_m = Ancho promedio de la cavidad

p_{am} = Umbral de plasticidad al aplastamiento

p_{rm} = Umbral de plasticidad a la retención

h = Altura del nervio o tetón

Δp = Exceso de presión requerida cuando la cavidad es asimétrica

Se debe considerar también lo siguiente:

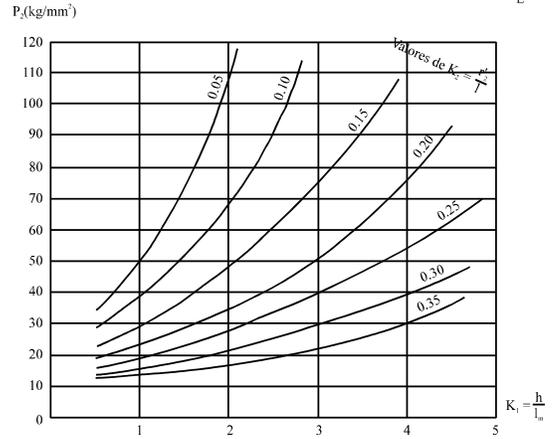
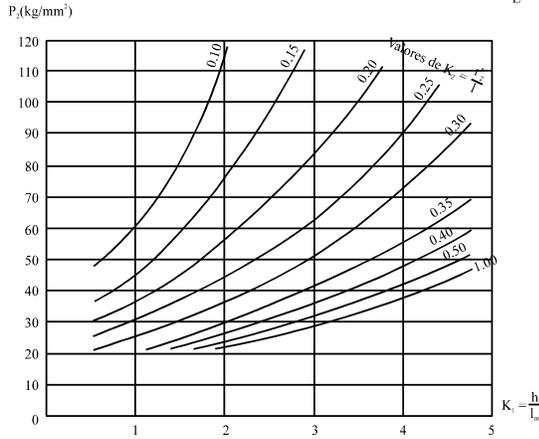
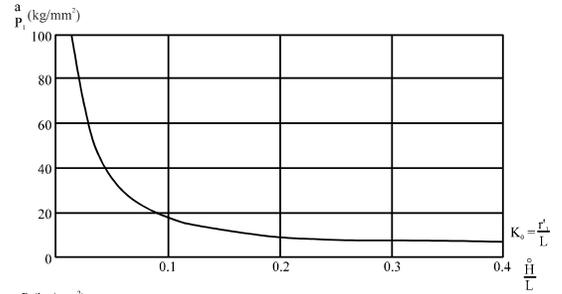
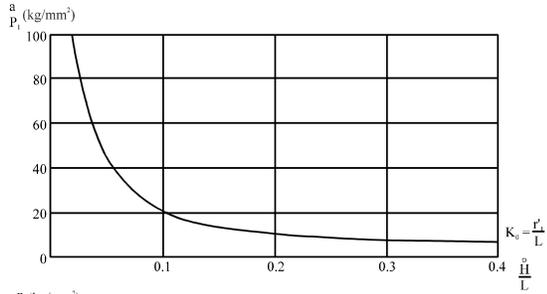
$$p_{am} + p_{rm} + p_\alpha = 21 \text{ kg/mm}^2 \quad \text{para los aceros a } 1000 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$p_{am} + p_{rm} + p_\alpha = 16.5 \text{ kg/mm}^2 \quad \text{para cobre a } 875 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$p_{am} + p_{rm} + p_\alpha = 9.7 \text{ kg/mm}^2 \quad \text{para aluminio a } 525 \text{ }^\circ\text{C}$$

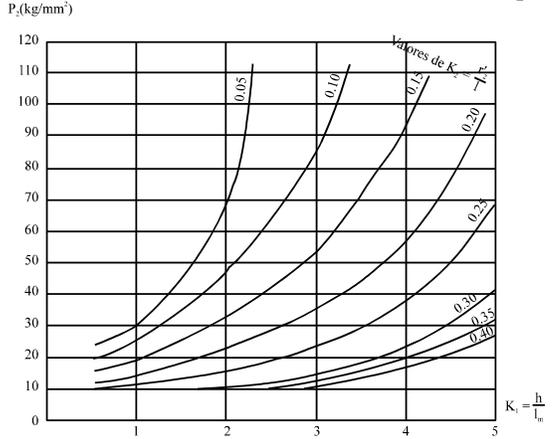
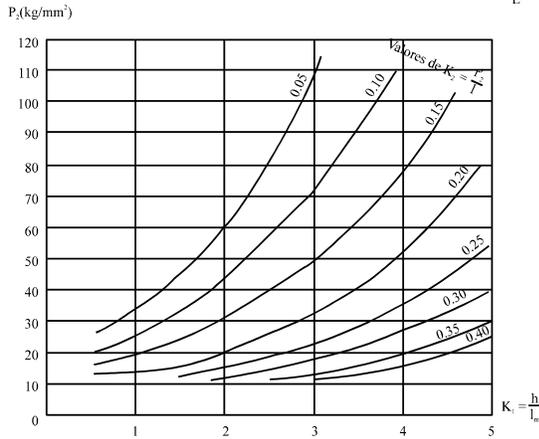
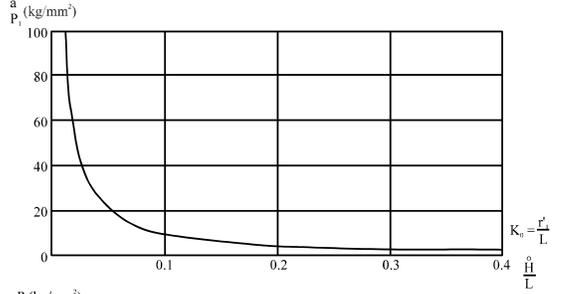
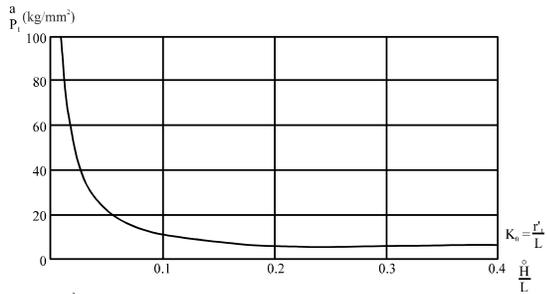
$$p_{am} + p_{rm} + p_\alpha = 10 \text{ kg/mm}^2 \quad \text{para latón a } 675 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$p_2 = p_m - p_\alpha \left[1 + \ln \frac{A_e}{A_f} \right] \exp(a\mu K_1) + p_{am} + p_{rm} + p_\alpha + \Delta p$$



a) Aceros a 1000 °C

b) Cobre a 875 °C



c) Aluminio a 525 °C

d) Latón a 675 °C

FIGURA 6.26 Cálculo gráfico de las presiones p_1, p_2 (Rio, J. del, 1980)

La primera parte de la ecuación está en el término p_2' y representa la carga necesaria para extruir el material en el nervio o cavidad. Las presiones se obtienen de la figura 6.13, considerando los siguientes factores:

$$p_m \text{ con } K_m = \frac{2r_2^*}{l} \quad \text{o} \quad \frac{2r_2^*}{d}$$

$$p_\alpha \text{ con } K_\alpha = \frac{h}{l} \quad \text{o} \quad \frac{h}{d}$$

$$K = \frac{h}{l} \quad \text{o} \quad K = \frac{h}{d}$$

Donde

\bar{l} = Ancho promedio de la cavidad

\bar{d} = Diámetro promedio de la cavidad

$$p_{am} \text{ con } K_{am} = \frac{\bar{l}}{h} \quad \text{o} \quad \frac{\bar{d}}{h}$$

$$p_{arm} \text{ con } K_{rm} = \frac{h}{\bar{l}} \quad \text{o} \quad \frac{h}{\bar{d}}$$

Δp toma en cuenta la posición de la cavidad con respecto al eje de aplicación de carga, en la tabla 6.8 se muestra este valor para diversos materiales.

TABLA 6.8 Exceso de presión debido a la posición de la cavidad [Rio J. del, 1980]

	Valores de Δp en kg/mm ²					
	Acero a 1000°C	Cobre a 875°C	Aluminio a 525°C	Latón a 675°C	Cuproaluminio a 800°C	Aleación ligera A U 4 G a 450°C
Cavidad bien centrada	0	0	0	0	0	0
Cavidad a mitad de distancia al extremo	4	3.2	1.8	1.9	2.4	6
Cavidad en el extremo	8	6.4	3.6	3.8	4.8	12

Todas las presiones indicadas anteriormente, con excepción de Δp , también pueden ser obtenidas mediante el empleo de la ecuación deducida para deformación plana, utilizando las constantes que correspondan a cada condición, de manera similar a lo expuesto para la determinación de la presión para la cavidad principal.

g) Esta etapa consiste en determinar las dimensiones de la zona de rebaba (cordón y alojamiento), de tal forma que pueda cumplir con sus objetivos, esto es, actuar como dique y alojamiento de material excedente, consiguiendo la obtención de piezas sanas sin necesidad de sobrecargar el equipo y con el mínimo desgaste de la estampa. El ancho del cordón se determina a partir de las dimensiones de la pieza (tabla 6.9).

TABLA 6.9 Dimensiones recomendadas para el alojamiento de rebaba en función del ancho del cordón (Rio J. del, 1980)

Valores de alojamiento	Ancho del cordón de la matriz λ (mm)
40	4
50	4.5
60	5
70	5.5
80	6
90	6.5
100	7
120	7.5
140	8
160	8.5
180	9
200	9.5
220	10
240	11
260	12
280	13
300	14
350	15
400	17
450	18

El aspecto de un cordón de tipo plano se muestra en la figura 6.27.

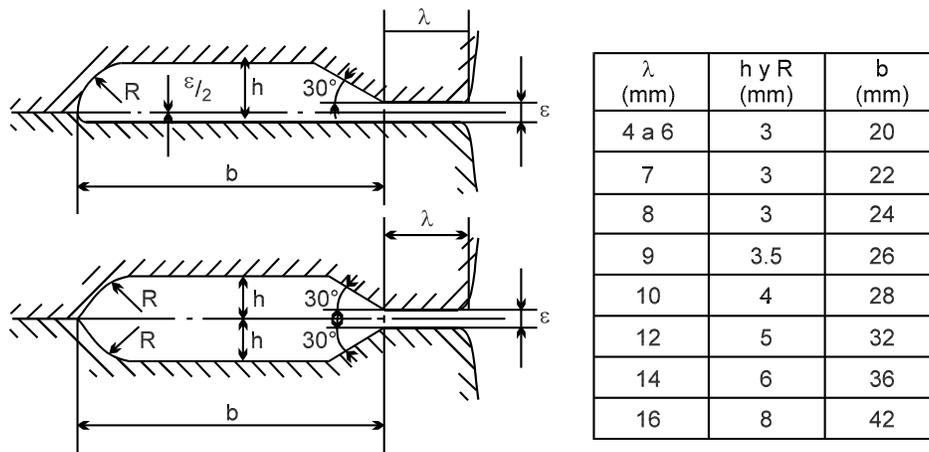
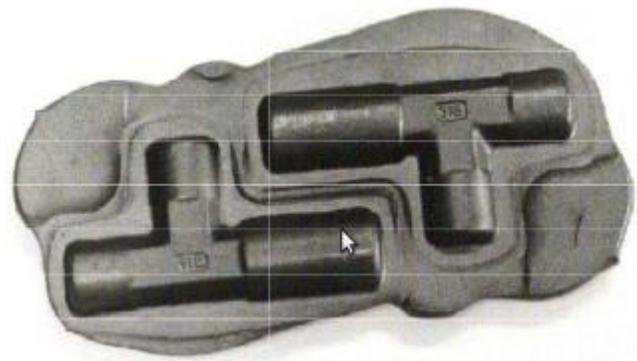
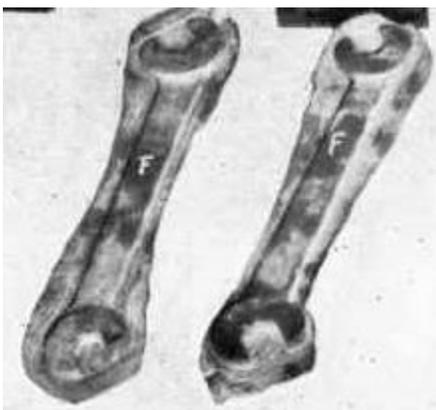


FIGURA 6.27 Aspecto y dimensiones típicas de un cordón de rebaba plano (Rio J. del, 1980)

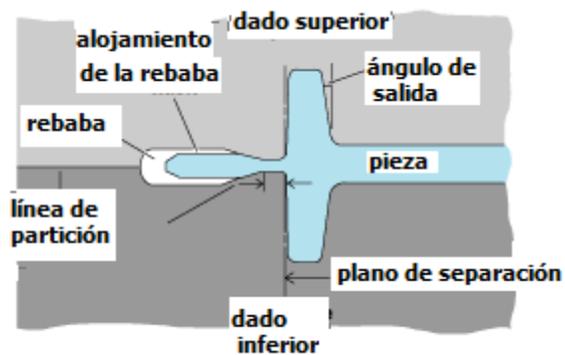
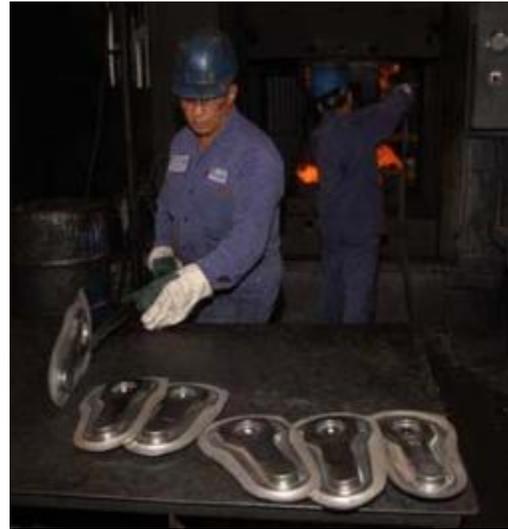
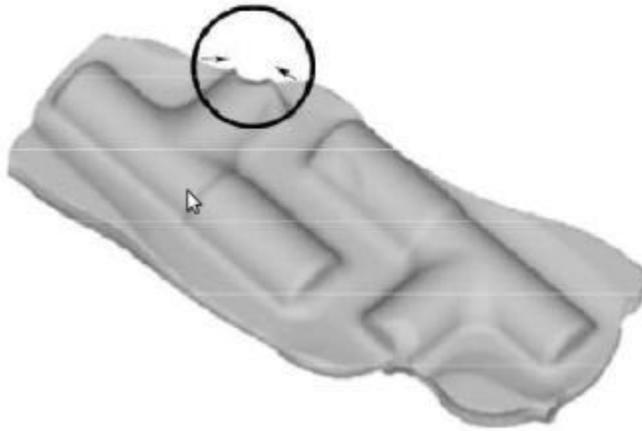
Donde

- λ = Ancho del cordón de rebaba
- ε = Espesor del cordón de rebaba
- e = Espesor del alojamiento
- b = Ancho del alojamiento
- R = Radio de fondo del alojamiento



(a)

FIGURA 6.28 (a) Cordones de rebaba en diversas piezas, en la imagen de abajo se muestra el cordón y el alojamiento de rebaba durante su llenado



(b)

FIGURA 6.28 (b) Cordones de rebaba en diversas piezas, en la imagen de abajo se muestra el cordón y el alojamiento de rebaba durante su llenado

Cuando el material que se va a forjar es acero y las matrices son del mismo material, es recomendable utilizar como lubricante grafito disuelto en agua de acuerdo con las siguientes condiciones de proceso:

$$T < 900 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow \mu = 0.15$$

$$T = 1000 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow \mu = 0.16$$

$$T = 1100 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow \mu = 0.17$$

Sin lubricación los valores se presentan en la tabla 6.10.

TABLA 6.10 Condiciones sin lubricación para algunos materiales (Rio J. del, 1980)

Acero T °C	μ	Cobre T °C	μ	Aluminio T °C	μ	Latón T °C	μ
900	0.23	850	0.16	450	0.15	650	0.18
1000	0.20	900	0.15	500	0.14	700	0.17
1100	0.19	950	0.14	550	0.13	750	0.16

Los valores de la anchura del cordón de la matriz en función del diámetro o espesor de la pieza se presentan en la tabla 6.11.

TABLA 6.11 Dimensiones del cordón en función del ancho (Rio J. del, 1980)

λ	R	b
4 a 6	3	20
7	3	22
8	3	24
9	3.5	25
10	4	28
12	5	32
14	6	36
16	8	44

Una vez propuesto el ancho del cordón es necesario proceder al cálculo del espesor, esto se efectúa mediante la ecuación:

$$\frac{\lambda}{\varepsilon} = \sqrt{\frac{(P_f - P_a - P_b)}{4\mu'Q'}}$$

donde

$$\varepsilon = 1 \text{ a } 6 \text{ mm}$$

$$8 < \frac{2\lambda}{\varepsilon}$$

El valor obtenido deberá cumplir con las condiciones que se indican, en caso de no ser así, será necesario proponer un nuevo valor a λ y repetir el cálculo; si después de dos iteraciones no se obtienen resultados convenientes, se recomienda proponer otro tipo de cordón de rebaba, como por ejemplo con freno (figura 6.29)

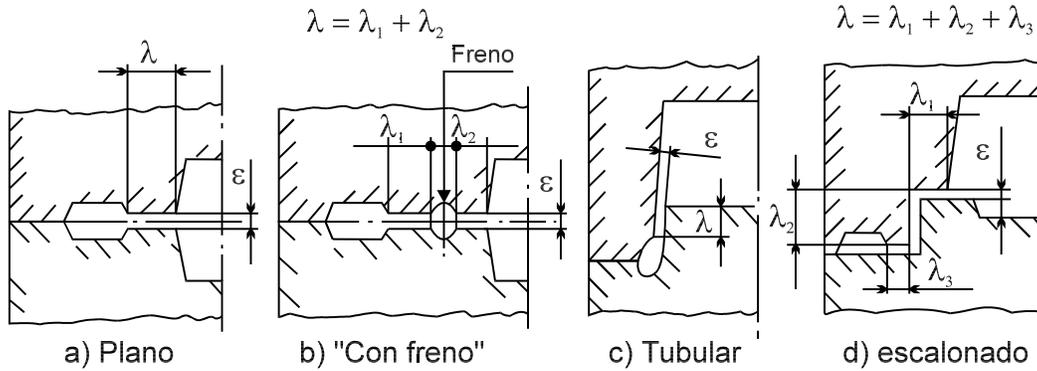


FIGURA 6.29 Distintas formas del cordón de rebaba (Rio J. del, 1980)

El valor de “ Q ” está en función del material y la temperatura (tabla 6.12).

$$Q = f(T, \text{material})$$

TABLA 6.12 $Q = f(\theta, \text{material})$ (Rio J. del, 1980)

T °C	Q
870	3.24
950	2.57
1000	2.27
1050	1.86
1100	1.52
1150	1.25

p_f = Presión de forja p_1 o p_2

p_a = Pérdida de carga al transmitir la presión de forja a la rebaba, y se obtiene con:

$$K = \frac{2H'}{L} \quad \text{o} \quad K_a = \frac{2H'}{D}$$

H' = Distancia del plano de rebaba al plano superior

$$p_b = \sigma_0 \frac{2\lambda}{D}$$

σ_0 = Esfuerzo de cedencia del material alojado en el cordón de rebaba.

h) Determinación de la carga requerida para la forja. El último paso en el proceso de diseño lo representa la determinación de la carga para el proceso, esto se hace con la finalidad de seleccionar un equipo con la capacidad requerida, la carga aplicada es entonces:

$$P = p_f A_p + p_r A_r$$

donde

P = Carga de forja (ton)

A_p = Sección transversal de la pieza

p_f = Presión necesaria para el correcto llenado de la cavidad

A_r = Sección transversal de la rebaba, se calcula como:

A_r = Perímetro \times ancho del cordón

p_r = Presión ejercida sobre el cordón de la rebaba, esta se calcula con la constante:

$$K_r = \frac{\varepsilon}{2\lambda} \quad \text{o} \quad p_r = \frac{\sigma_0}{Q_r} [e^{Q_r} - 1]$$

$$Q_r = \frac{2\mu\lambda}{\varepsilon}$$

6.7 COMENTARIO FINAL

En la sección 6.6 se presentan algunas relaciones matemáticas entre parámetros de proceso que permiten determinar la carga de forja, tanto para el caso de forja libre como en estampa; en esta última condición de forja se debe tener cuidado en los resultados que se obtienen, por lo limitado de su aproximación y por las posibles fuentes de error durante el cálculo, además de no considerar nada con respecto a las deformaciones. En el diseño de un dado, en opinión de este autor, resulta mucho importante el análisis del flujo (campos de desplazamiento y deformaciones), que la determinación de la carga. En cualquier etapa del proceso resulta de particular importancia la determinación de los campos de desplazamiento, ya que esto permite una mejor definición de las geometrías intermedias y con esta base la determinación de las preformas y dado acabador. Es por dicha razón que una de las áreas que con mayor ahínco se ha estudiado desde los años 70 del siglo pasado, es el modelado por métodos numéricos; particularmente mediante el método del

elemento finito (MEF), de los procesos de conformado mecánico de los metales. A la fecha existen diversas paqueterías comerciales [Abaqus®, Deform®, QFORM®, FORGE® NxT] que han sido utilizadas para tal fin. Algunas de estas, como es el caso de ABAQUS®, son paqueterías de MEF de amplio espectro mediante las cuales se pueden analizar tanto problemas lineales como no lineales, elásticos, viscoplásticos, etc., mientras que Deform®, QFORM®, FORGE® han sido desarrollados para el análisis de problemas de conformado mecánico de metales. Cualquiera que sea la paquetería a disposición es necesario tener una idea muy clara de las condiciones del proceso (temperaturas de inicio y fin, comportamiento mecánico del material, lubricación, número de preformas y geometrías generadas, entre otras) para que así los datos y restricciones correspondan con la realidad industrial y, por consecuencia, los resultados obtenidos sean lo más aproximado posible.

La prospección del proceso mediante métodos de cálculo más precisos permite eliminar los procesos de ensayo-error para optimar una estampa, ya que optimizan el diseño, reducen el desperdicio y mejoran la calidad metalúrgica de la pieza; todo lo cual es garante de productos que respondan a las necesidades del mercado a un menor costo y con menor huella de carbono al ambiente.

CAPÍTULO 7

LAMINACIÓN

7.1 GENERALIDADES

La laminación consiste en la reducción de la sección transversal de un material al hacerlo pasar entre dos rodillos cilíndricos que giran en sentido opuesto (figura 7.1). Dichos cilindros producen la deformación plástica del material por medio de esfuerzos de compresión y corte. Los de compresión se deben a que según el material que se introduce entre los rodillos, el espesor libre entre ellos va siendo menor. Los esfuerzos cortantes son debidos a que las fibras externas del material están sujetas a la fuerza de fricción de los rodillos.

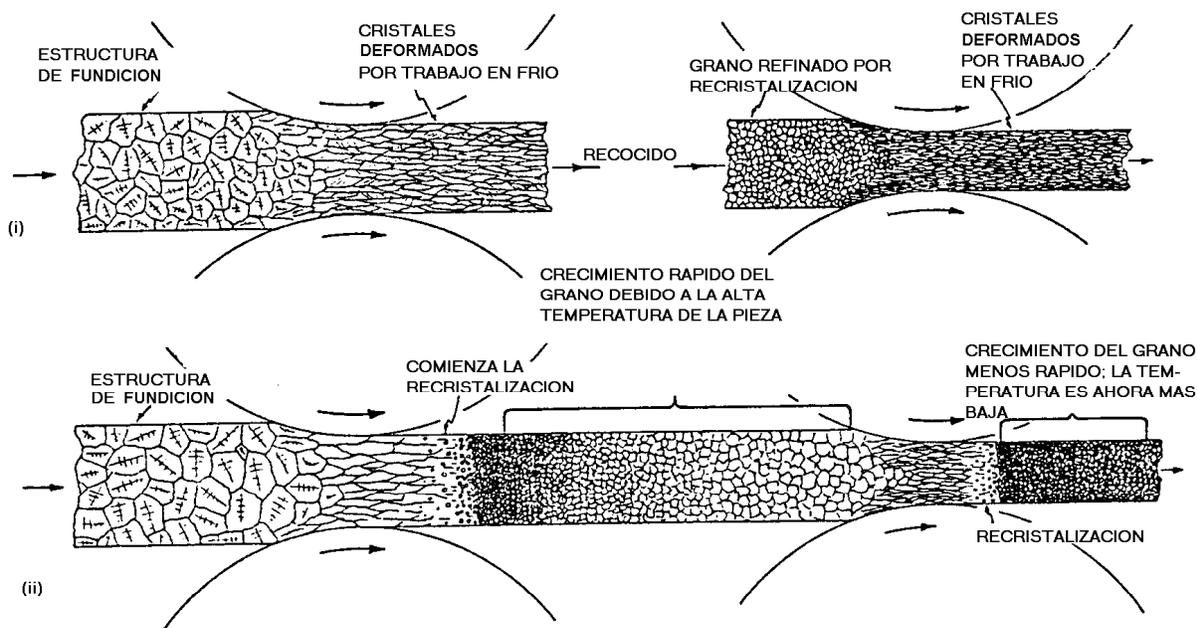


FIGURA 7.1 Efecto del proceso de laminación sobre la estructura. i) En frío ii) En caliente

No está bien establecido quién y cuándo empezó a utilizar los laminadores. Resulta evidente que las primeras aplicaciones del proceso de laminación se orientaron al ajuste de espesores de láminas de metales no ferrosos (Cu, Ag, Au, Pb, Sn) para posteriormente utilizarse para el hierro. El primer antecedente del proceso se remonta a 1495, cuando Leonardo da Vinci presenta un dispositivo para laminar estaño. Hasta finales del siglo XVII, los laminadores fueron accionados a mano y, posteriormente, ya en el siglo XVIII, se emplearon ruedas hidráulicas para su funcionamiento. El laminado industrial del hierro data de fines del siglo XVIII, particularmente se puede relacionar su verdadero nacimiento en 1783, cuando el inglés Henry Cort [1741-1800, industrial y maestro fundidor inglés, el cual se distingue por sus innovaciones en la refinación y producción de hierro] obtiene la patente británica No. 1351, la cual introduce los rodillos ranurados que se emplean en la manufactura de barras de hierro. Si bien los historiadores no se han puesto de acuerdo en quien fue el primero en usar rodillos ranurados sí coinciden en que Cort fue el primero en combinar el uso de una serie de técnicas (pudelado y laminado), tanto en el afine como en el conformado del hierro que permitieron un sensible incremento en la producción de este, razón por la cual varios historiadores lo han denominado como el padre de la moderna laminación.



(a) **FIGURA 7.2** (a) Tren de laminación en caliente de productos planos,
 (b) Enrollador en caliente de planos

El motor de vapor se empezó a utilizar a fines del siglo XVIII, lo cual transformó el proceso de laminación en uno de los pilares de la industria, ya que se utilizó no solo para la producción de placas o láminas sino también de perfiles estructurales y de los elementos de vías que se requerían para el rápido desarrollo del ferrocarril (1830-1850). Para 1856, se instala en Saar, Alemania, el primer laminador de gran potencia que podía ser utilizado en la producción de perfiles estructurales grandes, lo cual revolucionó a la industria de la construcción (figura 7.3). Al finalizar la guerra civil, en EUA se instalaron las primeras grandes laminadores, mientras que, en 1867, H.

Bedson construyó en Gran Bretaña el primer tren continuo para alambón. Para 1885, los hermanos Mannesmann desarrollaron un proceso derivado de la laminación el cual permite producir tubos de acero sin costura. En 1897, se instalaron con éxito los primeros motores eléctricos para accionar los laminadores, los que sustituyeron, a partir de esta fecha, a todos los motores de vapor que se habían empleado. Los primeros trenes de laminación continuos se ponen en operación para 1892, y ya, para 1906, se instalan los primeros laminadores reversibles.

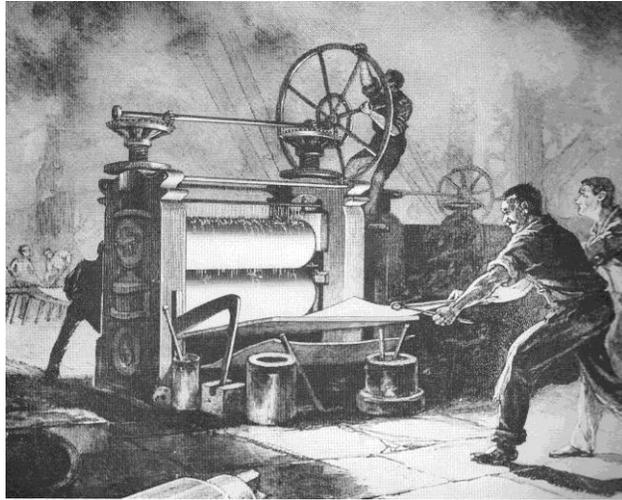


FIGURA 7.3 Molino de laminación accionado por vapor, segunda mitad del siglo XIX

7.2 PROCESO DE LAMINACIÓN

Hoy en día, la laminación es el medio más económico para reducir la sección transversal de un material, por esto, tiene un gran campo de aplicaciones, tanto en frío como en caliente. Algunas de sus características y limitaciones son:

Laminación en frío

- Buen acabado superficial
- Buen control dimensional
- Bajo porcentaje de reducción posible. Se hace necesario un recocido para aliviar tensiones por deformación plástica en frío (acritud)

Laminación en caliente

- Posibilidad de altos porcentajes de reducción
- Deficiente acabado superficial
- Limitado control dimensional
- Menores cargas de deformación

Con base en estas propiedades, se elige el proceso que se debe seguir para la obtención de un producto determinado y, en muchos casos, se utilizan combinaciones de ellos (figura 7.4).

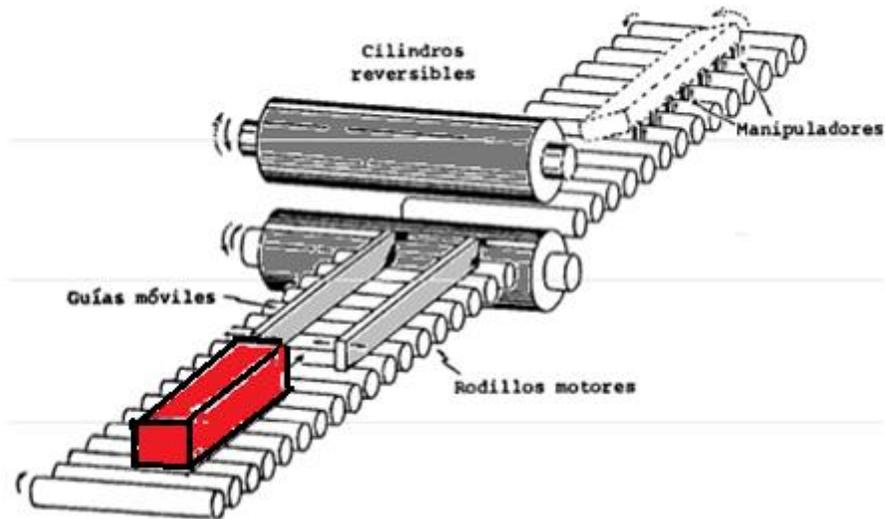


FIGURA 7.4 Proceso de laminación (laminador dúo reversible)

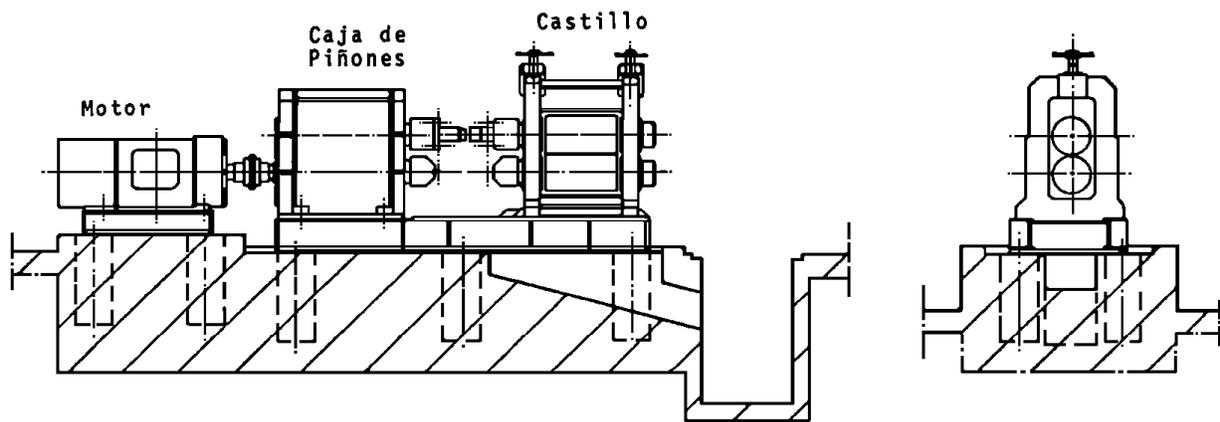
Generalmente, los primeros pasos de deformación, en los que se requieren grandes reducciones, se realizan en caliente; mientras que cuando es necesario un mejor acabado o dimensiones precisas, se lamina en frío.

Los laminadores se pueden clasificar en dos grandes grupos: los que laminan formas planas, constituidos por rodillos lisos y paralelos; y los que se utilizan para producir perfiles tales como: redondos, cuadrados, rieles, viguetas, canales y varilla; para lo que se utilizan rodillos con diferentes tipos de acanaladuras.

Arreglos de laminadores

La unidad básica a través de la cual se realiza el proceso se denomina caja de laminación. Está constituida por el bastidor, chumaceras, medios de accionamiento y sistemas de ajuste de la apertura de los rodillos, así como de otros elementos auxiliares tales como las guías de entrada y salida. Estos arreglos se designan o clasifican de acuerdo con el número y disposición de los rodillos, se tiene entonces:

LAMINADOR O ARREGLO DÚO: Es la disposición más antigua, sencilla y versátil, ya que se emplea tanto en desbaste como en acabado. El arreglo dúo consta de dos rodillos (de igual diámetro) que giran en sentido opuesto, con eje de rotación horizontal, y están contenidos en un mismo plano vertical (figura 7.5). En el caso de que se cuente con una sola caja para realizar el proceso, este será lento debido al tiempo que se pierde al llevar el material a la entrada del laminador, además de que se requieren mesas elevadoras.



(a)

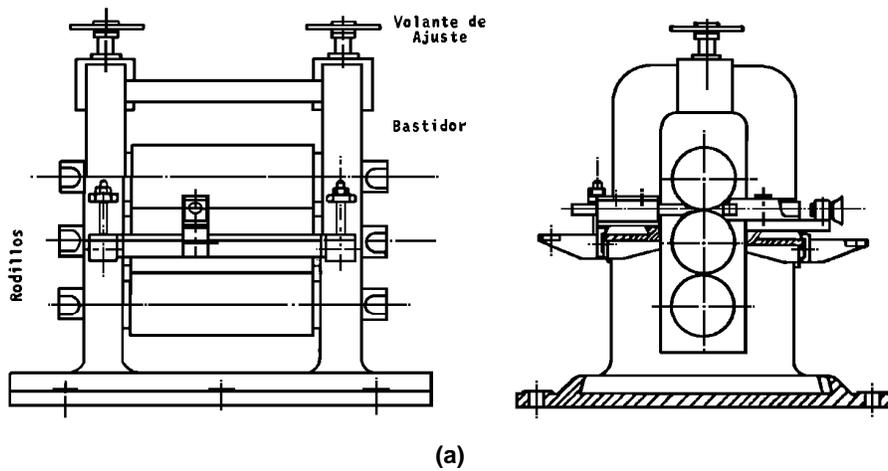


(b)

FIGURA 7.5 (a) Laminador dúo. (b) Laminador dúo de grandes dimensiones con ajuste hidráulico (Cauffiel Technologies)

El desarrollo lógico a partir de lo anterior fue el laminador dúo reversible, en el que el material puede ser laminado en ambos sentidos. Este arreglo está limitado por la longitud del material y por la velocidad de laminación. Se emplea en el desbaste de barras o placas de hasta 10 m de longitud.

ARREGLO TRÍO: Consta de tres rodillos de igual diámetro, con eje de rotación horizontal; los ejes de los tres se encuentran contenidos en un mismo plano vertical (figura 7.6). Presenta las ventajas de dúo y dúo reversible, razón por la que es utilizado en desbaste así como en trenes desplegados. En el caso de que sean empleados en el desbaste, será necesario que cuenten con mesas elevadoras en ambos lados.



(a)



(b)

FIGURA 7.6 (a) Laminador trío (vista frontal y lateral). (b) Caja trío (dongyun, China)

LAMINADOR CUARTO: Está compuesto por cuatro rodillos (figura 7.7), dos de trabajo y dos de apoyo, cuyo eje de rotación está contenido en un mismo plano vertical. Los rodillos interiores (de trabajo) normalmente son forjados y su diámetro es de 1/2 a 1/3 de los de apoyo.

Este tipo de arreglos se emplea básicamente en los pasos de acabado de hoja; se busca que estos reduzcan la carga y eviten variaciones del espesor de la lámina sobre el eje transversal (se evita la flexión de los rodillos); sin embargo, también encuentran aplicación en pasos intermedios de desbaste sobre todo para materiales tenaces.

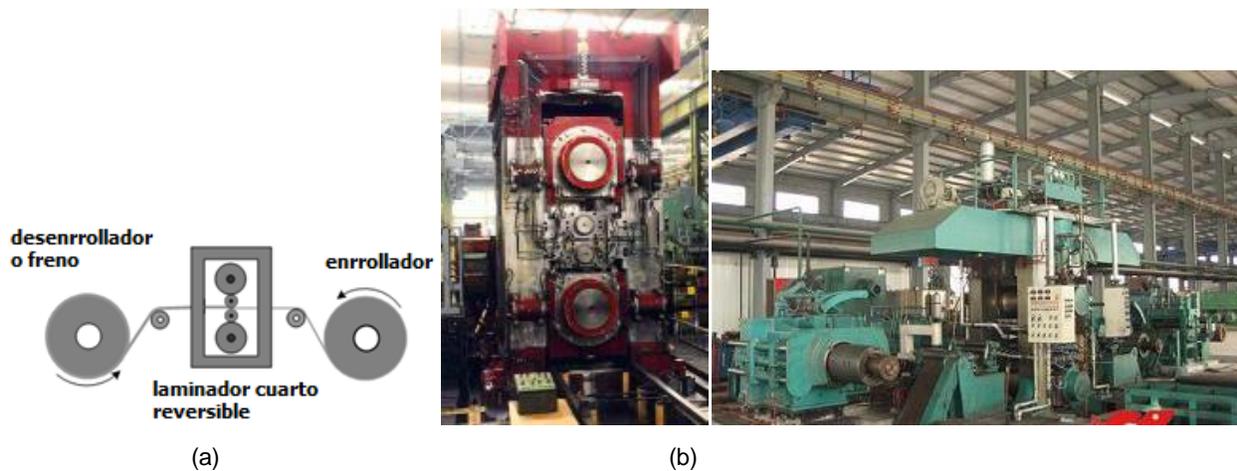


FIGURA 7.7 Laminador cuarto. **(a)** Descripción esquemática de un laminador cuarto con enrollador y freno (desenrollador). **(b)** Caja de laminación. **(c)** Laminador cuarto reversible con enrollador y freno

LAMINADOR DE RACIMO: Consta de dos rodillos de trabajo de pequeño diámetro y cuatro o más rodillos de apoyo (figura 7.8), que están contenidos en varios planos verticales. Se emplea en el acabado de hoja metálica de alta resistencia y de pequeño espesor.

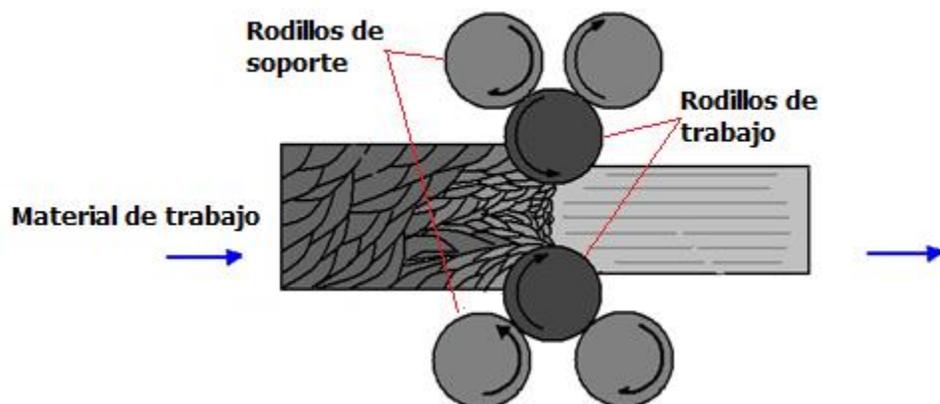


FIGURA 7.8 Laminador en racimo

LAMINADOR SENDZIMIR. Es una refinación del arreglo de racimo en el que se tienen del orden de 18 rodillos de apoyo (figura 7.9). Se emplea cuando se van a laminar metales muy tenaces, de anchos mayores a 1 m y de espesores muy pequeños. La aplicación del rodillo de pequeño diámetro permite reducir la carga y, por lo tanto, la potencia necesaria, además de que facilita la laminación de pequeños espesores, así como el preciso control del espesor. Por ejemplo, en estos laminadores se puede trabajar hoja de acero inoxidable de hasta 1.6 m de ancho con los rodillos de menos de 10 cm de diámetro.



FIGURA 7.9 Laminador Sendzimir

LAMINADOR PLANETARIO: Este arreglo (figura 7.10) combina los efectos de forja y laminación, permitiendo grandes reducciones en una sola etapa. Se podrá entonces pasar de un planchón a lámina (reducción del 90% o aun mayor), con lo cual el laminador hace las veces de todo un tren. Consiste en una serie de rodillos de pequeño diámetro, los cuales giran sobre dos rodillos de apoyo de mayor diámetro. Dadas las grandes reducciones y las obvias características del producto acabado, es necesario contar con rodillos de empuje y cuando menos un par de rodillos acabadores. Por su complejidad y alto costo son muy poco comunes.

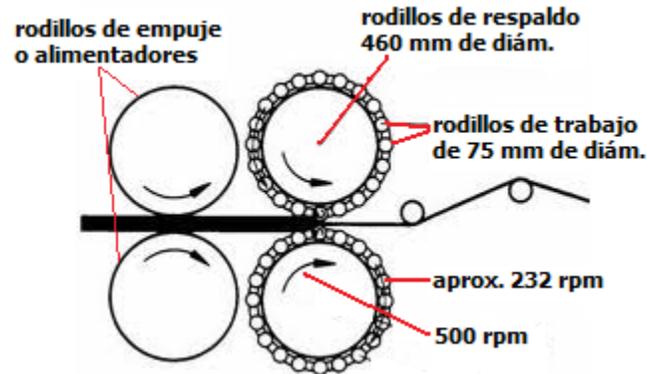


FIGURA 7.10 Laminador planetario

En ocasiones se utiliza la combinación de rodillos en una misma caja de laminación, donde el eje de un par de estos se encuentra rotado 90° con respecto a los otros. A este arreglo se le conoce como caja universal y como block "x" cuando los rodillos se encuentran en planos a 45° con respecto a la horizontal. Estos arreglos pueden ser utilizados en la fabricación de vigas o en el ajuste de los costados de placas.

7.3 TREN DE LAMINACIÓN

Cuando se desea obtener un determinado producto, como la varilla corrugada, barra hexagonal, cuadrada, circular; o perfiles tales como vigas, etcétera, y además se requiere de un gran volumen de producción, será necesario recurrir a un tren de laminación (figuras 7.11, 7.12 y 7.13), formado por una o más cajas de laminación, las cuales trabajan de manera secuencial. Los trenes de laminación se clasifican tanto con base en el producto obtenido, como de acuerdo con la disposición de las cajas que los constituyen, teniéndose entonces:

TREN CONTINUO: Se compone de cajas que se encuentran una a continuación de otra; el material que se está laminando pasa de una a otra caja sin interrupción, y se lamina la misma barra en varias cajas al mismo tiempo (cajas acomodadas en serie).

SEMICONTINUOS: Tienen la misma disposición del continuo; sin embargo, en ellos se puede retirar el material en pasadas intermedias, si así se desea.

EN LÍNEA O DESPLEGADOS: Están compuestos por cajas alineadas o dispuestas en líneas paralelas. Entre caja y caja existen dispositivos repetidores y formadores de lazo; normalmente un

único motor principal acciona todas las cajas del tren. Se emplean cajas trío, donde el tercer rodillo sirve únicamente como árbol de transmisión.

EN ZIGZAG: Es una combinación de tren continuo y de línea. En los trenes continuos se emplean cajas dúo agrupadas de dos en dos. Si se tienen rodillos horizontales y verticales, de tal forma que el material pueda ser deformado en dos direcciones o si se tienen cajas universales, se habla de trenes *no twist* (sin giro).

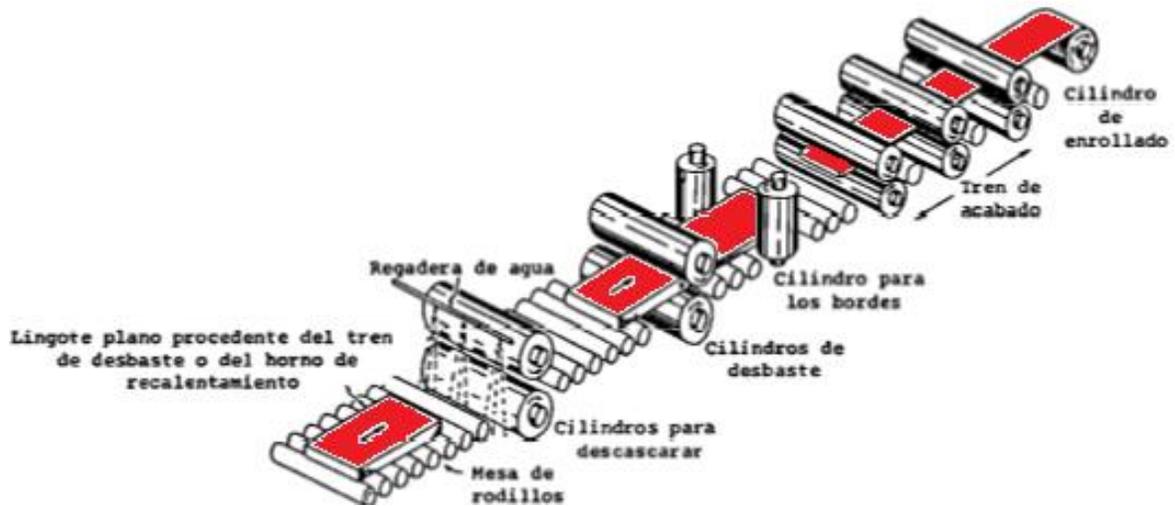


FIGURA 7.11 Tren de laminación de tipo continuo



FIGURA 7.12 Tren de laminación en zig-zag



FIGURA 7.13 Ejemplos de tren alineado o desplegado

Elementos de un tren de laminación

Un tren de laminación, como ya se ha comentado, está constituido por una o más cajas de laminación, caja de piñones, reductor, y motor, (figura 7.14).

La caja de laminación está compuesta por el castillo o bastidor, generalmente fabricado de acero vaciado, aunque en ocasiones se elabora a partir de placas soldadas o hierro nodular; estos últimos se utilizan para laminado en caliente.

Cuando las condiciones de trabajo así lo requieran, se usarán rodillos de acero forjado. Los rodillos están soportados por:

- a) Chumaceras, que pueden ser tipo buje (prácticamente ya no se utilizan en la actualidad), y son fabricadas, generalmente, de bronce o polímeros termofijos.
- b) Rodamientos, que son los más utilizados en la actualidad. Los tipos de rodamientos más empleados son los de rodillos cilíndricos y los axiales de rodillos cónicos.

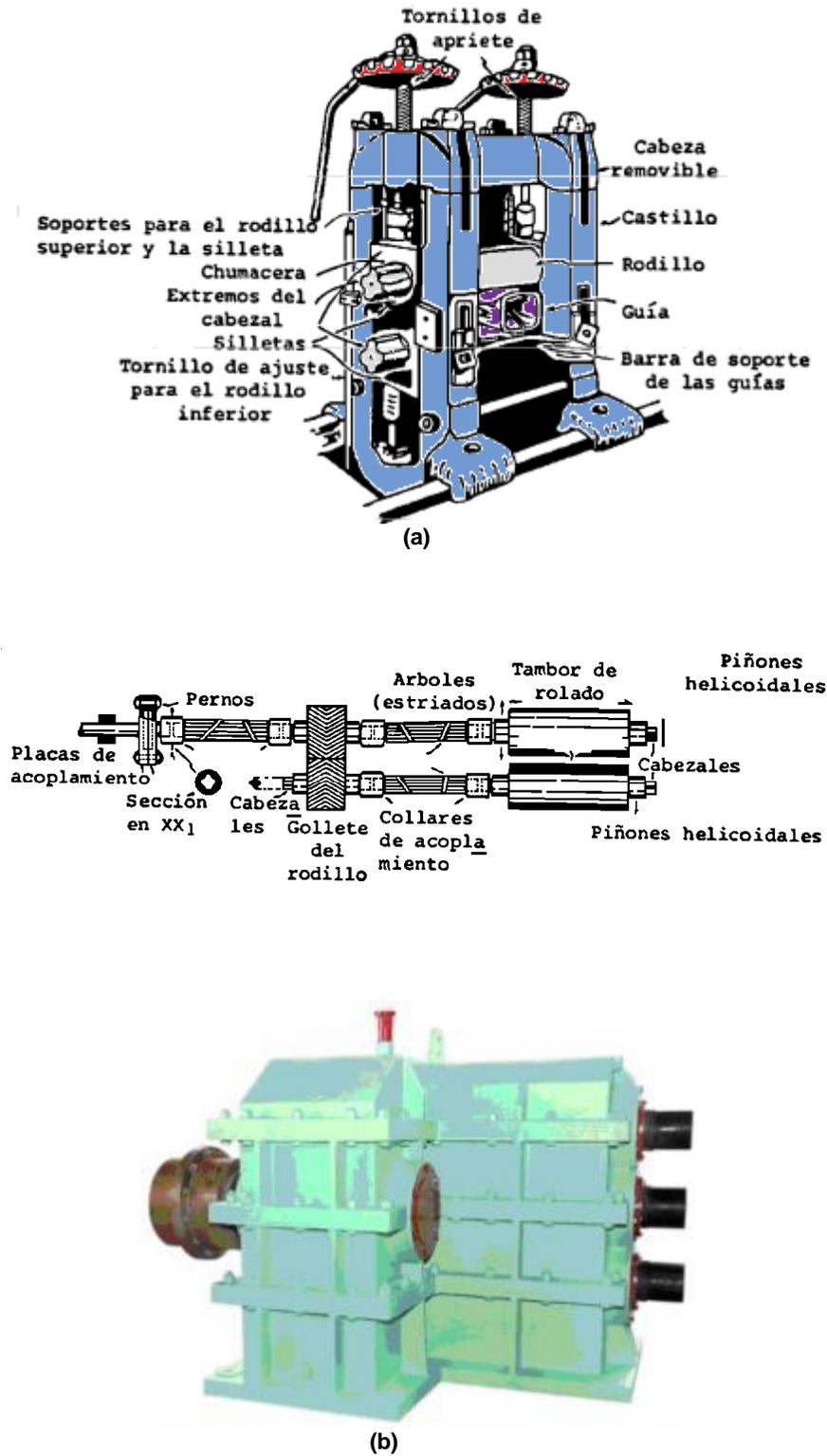


FIGURA 7.14 Partes principales de un tren de laminación. **(a)** Caja de laminación. **(b)** Transmisión

Para los árboles de transmisión se usan aceros al carbono o cromo-molibdeno, mientras que los coples son, en muchos casos, de hierro colado para que puedan actuar como fusibles mecánicos.

La caja de piñones es un implemento intermedio entre el reductor y los rodillos, su finalidad es dar movimiento a igual velocidad y sentidos contrarios a los rodillos de laminación. Está constituida por piñones de igual diámetro de paso de doble helicoidal (para evitar cargas axiales). Cuando se trata del accionamiento de una caja trío, el árbol motriz será el central.

Las juntas de acoplamiento entre los piñones y los rodillos son de tipo universal para absorber el grado de desalineamiento de la transmisión que se produce al variar la separación entre los rodillos. Dado que la velocidad del motor es mayor que la de los rodillos, será necesario el empleo de un reductor de velocidad, el cual está constituido con engranes dobles helicoidales. En algunos casos esta unidad se encuentra incorporada a la caja de piñones.

En función del tipo de motor seleccionado, se requiere en ocasiones (trenes de diseño muy antiguo), un volante de inercia entre el motor y el reductor (figura 7.15).



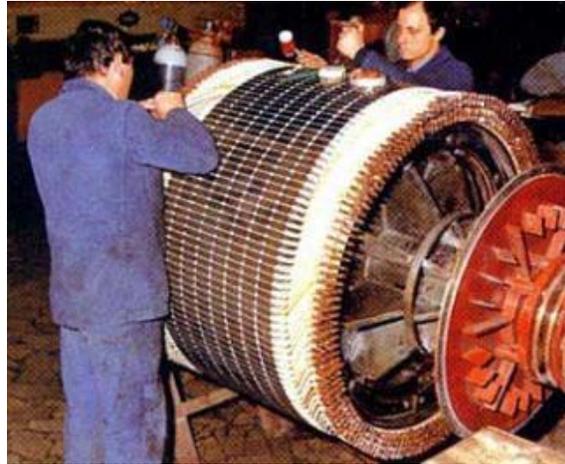
FIGURA 7.15 Molino para laminación en frío de lámina de pequeño espesor; cuenta con una caja de laminación, enrollador y freno

En el caso de trenes continuos se emplean motores de corriente directa; se tendrá un motor por cada una o dos cajas. En los trenes desplegados se emplean motores de corriente alterna de anillos rozantes, los cuales proporcionan el suficiente par y potencia para impulsar todas las cajas que componen al tren (figura 7.16).

Para ajustar la deformación del material es necesario que el rodillo superior, en el caso de los dúo, o el superior e inferior, en el caso de los trío, sea capaz de tener movimiento vertical. Por esto es necesario contar con un sistema de ajuste y suspensión para los rodillos superiores.



(a)



(b)

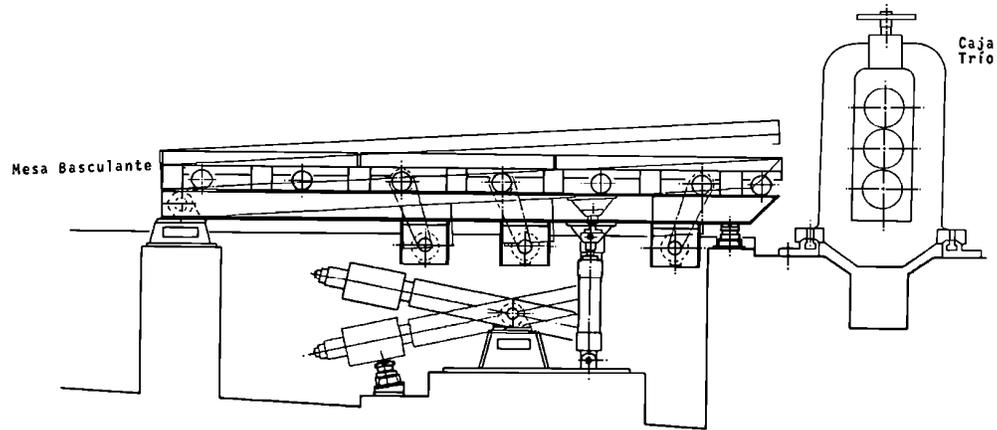
FIGURA 7.16 (a) Motor de CD para caja de laminación. (b) Rotor de un motor de CA para un molino de laminación

En una caja trío las chumaceras centrales se encuentran fijas, mientras que, como se ha comentado anteriormente, tanto las superiores como las inferiores pueden ser reguladas verticalmente en ambos sentidos con la finalidad de poder ajustar el claro entre los rodillos. Las chumaceras inferiores pueden tener un mecanismo de cuña para su regulación, mientras que las superiores son reguladas mediante husillos.

Como los rodillos deben permanecer siempre a su separación máxima calibrada, es necesario mantener el rodillo superior permanentemente oprimido hacia arriba, por lo que se utiliza un mecanismo de suspensión, que puede estar constituido por resortes entre las chumaceras superiores y las centrales (o entre las inferiores y las superiores en el caso de un dúo); en ocasiones se ajustan las chumaceras a la parte superior por medio de tirantes. Es usual suspender los rodillos pequeños de la parte superior del bastidor mediante resortes.

ELEMENTOS AUXILIARES DEL TREN DE LAMINACIÓN: El número y tipo de los elementos auxiliares que se presentan en un tren dependerá del tipo de este, del producto que se va a fabricar y del grado de automatización de la planta (figura 7.17). Son comunes, entre otros:

- a. Horno de precalentamiento
- b. Mesas fijas y basculantes
- c. Tijeras de despunte y descole
- d. Guías de entrada y salida
- e. Repetidores
- f. Arrastradores

**FIGURA 7.17** Mesa basculante

Además de los anteriores, se tienen tijeras de emergencia, canaletas, freno colas y mesas de enfriamiento, así como otros equipos que dependerán del caso particular.

Dadas las características cada vez más elevadas en cuanto a propiedades mecánicas, acabado y tolerancia del material laminado, es común encontrar en las modernas plantas que los trenes sean controlados por computadora, permitiendo entonces la obtención de propiedades mecánicas más elevadas y con tolerancias cerradas (figura 7.18).

**FIGURA 7.18 (a)** Proceso de laminación controlado por sistemas computacionales

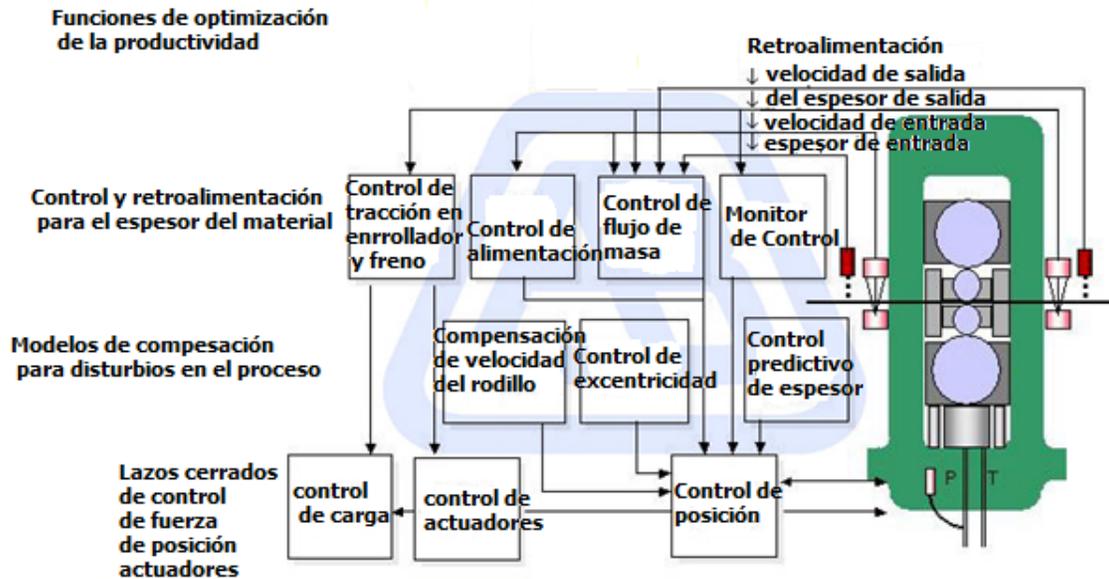


FIGURA 7.18 (b) Proceso de laminación controlado por sistemas computacionales

7.4 ANÁLISIS DEL PROCESO DE LAMINACIÓN

Para determinar la carga y potencia demandadas por el proceso, se consideran las relaciones involucradas entre la geometría de los rodillos y las fuerzas, así como el efecto que representan la temperatura, velocidad, reducción y acabado de los rodillos.

Relaciones geométricas en el laminado

Al tener una deformación plástica, el gasto volumétrico a la entrada y salida es igual:

$$b_0 h_0 v_0 = b_f h_f v_f \quad (7.1)$$

donde

b = ancho

h = espesor

v = velocidad

0 = condición de entrada

f = condición de salida

En el laminado de productos planos se puede considerar que el ensanchamiento es nulo, por lo tanto:

$$v_f = v_0 \left(\frac{h_0}{h_f} \right)$$

La reducción está definida como:

$$r = \frac{(h_0 - h_f)}{h_0} \quad (7.2)$$

La presión de laminado se aplica sobre el arco de contacto. Para facilitar el análisis, se va a considerar la proyección de este en la dirección de laminado; esta nueva variable se considerará como longitud proyectada del arco de contacto (L_p).

$$R^2 = L_p^2 + \left(R - \frac{\Delta h}{2} \right)^2$$

$$L_p = \left(R\Delta h - \frac{\Delta h^2}{4} \right)^{1/2} \quad (7.3)$$

donde R es el radio del rodillo.

Como $\Delta h \ll R$, entonces se puede reducir a:

$$L_p = (R\Delta h)^{1/2}$$

Por lo tanto, la carga de laminación será:

$$P = \bar{p}bL_p \quad (7.4)$$

donde \bar{p} es la presión promedio de laminación.

El ángulo formado por el plano de entrada y el ángulo que contiene los ejes de rotación de los rodillos, se denomina ángulo de mordedura (α) y está dado por:

$$\alpha = \text{ang sen} \frac{L_p}{R} \quad (7.5)$$

La máxima reducción teórica posible se puede obtener si se considera que la fuerza que provoca la entrada del material a los rodillos debe ser mayor y en el límite, igual a la que se opone al paso de este. De lo anterior y con base en la figura 7.17, se tiene:

$$F \cos \alpha = f_R \sin \alpha \quad (7.6)$$

donde

F = Fuerza tangencial a la superficie del rodillo

f_R = Fuerza radial

$$\frac{F}{f_R} = \tan \alpha \quad (7.7)$$

$f_R = p_R dA$

p_R = presión radial

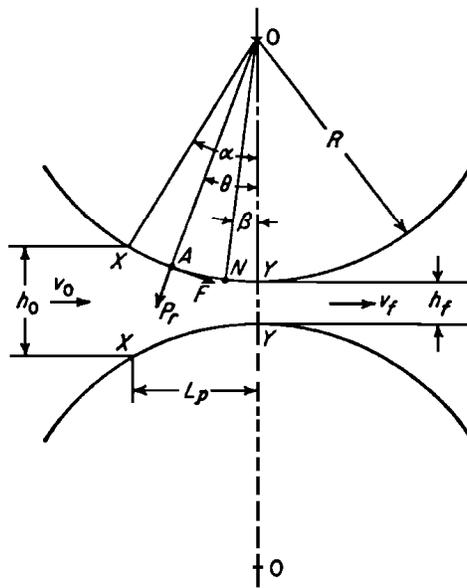


FIGURA 7.19 Descripción esquemática de los diferentes parámetros geométricos de la laminación

Por definición se sabe que:

$$F = \mu f_R \quad (7.8)$$

De lo anterior, y mediante trigonometría, se puede llegar a:

$$\Delta h_{m\acute{a}x} = \mu^2 R \quad (7.9)$$

De la ecuación 7.9 se tiene que la máxima reducción está limitada por el coeficiente de fricción y el radio de los rodillos, razón que justifica los grandes diámetros de estos en el desbaste.

Las fuerzas necesarias para deformar al material durante el laminado provocan dos tipos fundamentales de deformación elástica en los rodillos. Primero, los rodillos tienden a flexionarse debido a que el material tiende a separarlos (figura 7.20), mientras que el movimiento axial de los piñones está restringido; esto puede provocar variaciones de espesor a lo ancho de la hoja, lo cual será compensado con coronamiento del rodillo. Segundo, los rodillos se deforman en la región de contacto; por esta razón, el radio en la zona de contacto se incrementa a un valor R' que se calcula como:

$$R' = R \left(1 + \frac{cP}{b\Delta h} \right) \quad (7.10)$$

donde

R' = Radio de contacto

R = Radio del rodillo

P = Carga

c = Constante elástica del material del rodillo

Y la constante es

$$c = 16 \frac{1-\nu}{E\pi} \quad (7.11)$$

donde

ν = Coeficiente de Poisson

E = Módulo de elasticidad del material

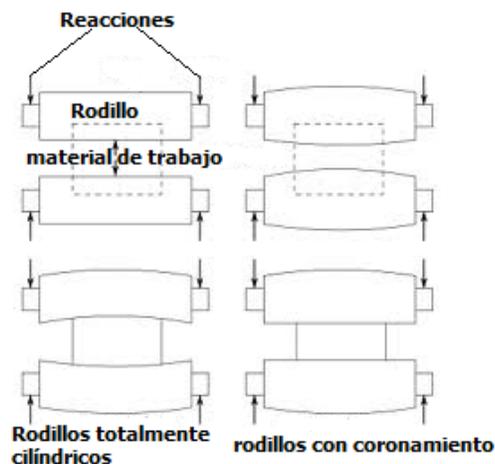


FIGURA 7.20 Deflexión de los rodillos por efecto de la carga de laminación y su efecto en el material

En el lado derecho se observa la ventaja de coronar el rodillo (su diámetro central es mayor):

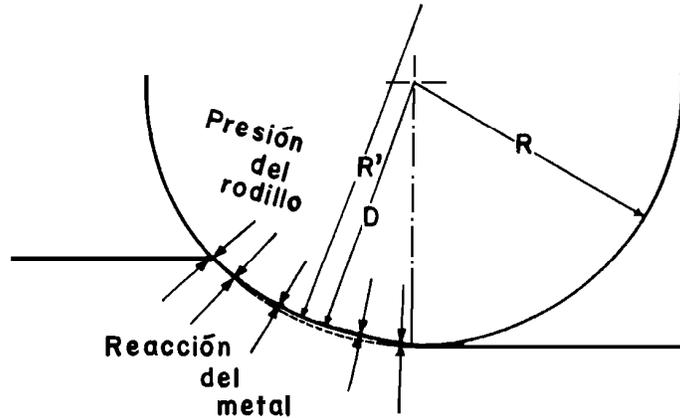


FIGURA 7.21 Reacción del metal que ocasiona aplastamiento en los rodillos

Cálculo experimental de la carga

A la fecha existen diversos métodos analíticos, empíricos y experimentales a partir de los cuales se puede evaluar de forma aproximada la carga de laminación. Su exactitud está delimitada por las características del proceso en particular que se analice.

La ecuación más sencilla se deduce considerando el aplastamiento del material y considera un 20% adicional por fricción:

$$P = 1.2\sigma_0 b L_p \quad (7.12)$$

y

$$\sigma_0 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_y \quad (7.13)$$

donde

σ_0 = Esfuerzo de cedencia para una condición biaxial de deformación

σ_y = Esfuerzo de cedencia a la deformación homogénea

Se habla de deformación homogénea siempre y cuando se cumpla que:

$$\frac{b}{L_p} \leq 4$$

Realizando una analogía de laminación con forja se llega a expresiones como:

$$P = \sigma_0 b L_p \left(1 + \frac{L_p}{4h} \right) \quad \text{fricción sin deslizamiento} \quad (7.14)$$

$$P = \sigma_0 b L_p \left(1 + \mu \frac{L_p}{2h} \right) \quad \text{fricción con deslizamiento} \quad (7.15)$$

$$\bar{h} = \frac{h_0 + h_f}{2}$$

donde

\bar{h} = espesor promedio

μ = coeficiente de fricción (el cual será estudiado posteriormente)

σ_0 = esfuerzo de cedencia promedio

A partir del mismo análisis se llega a:

$$P = \sigma_0 b \frac{L_p}{Q} [e^Q - 1] \quad (7.16)$$

donde

$$Q = \mu \frac{L_p}{h}$$

Método de Ekelund

Se trata de una ecuación arbitraria, basada en un análisis simplificado de esfuerzos.

$$P_0 = \sigma_0 b L'_p \left(1 + \frac{1.6\mu L'_p - 1.2\Delta h}{h_0 + h_f} \right) \quad (7.17)$$

donde

$$L'_p = \sqrt{R'\Delta h}$$

Para laminado en caliente de aceros, el coeficiente de fricción se puede evaluar aproximadamente con las siguientes expresiones:

$$\mu = 1.05 - 0.0005T \quad \text{Para cilindros (rodillos) de fundición gris}$$

$$\mu = 1.05 - 0.0005T \quad \text{Para cilindros de acero}$$

donde T es la temperatura expresada en °C.

Estas ecuaciones son empleadas para la práctica industrial, cuando el coeficiente de fricción no es bien conocido.

Análisis teórico de la carga

Uno de los problemas de conformado mecánico que más se ha estudiado es la laminación. En todos estos estudios se ha pretendido expresar las presiones y fuerzas que se generan durante el proceso, en función de variables geométricas y de la resistencia del material (figura 7.22). Dada la variedad de casos que pueden presentarse, esto ha resultado en soluciones complejas.

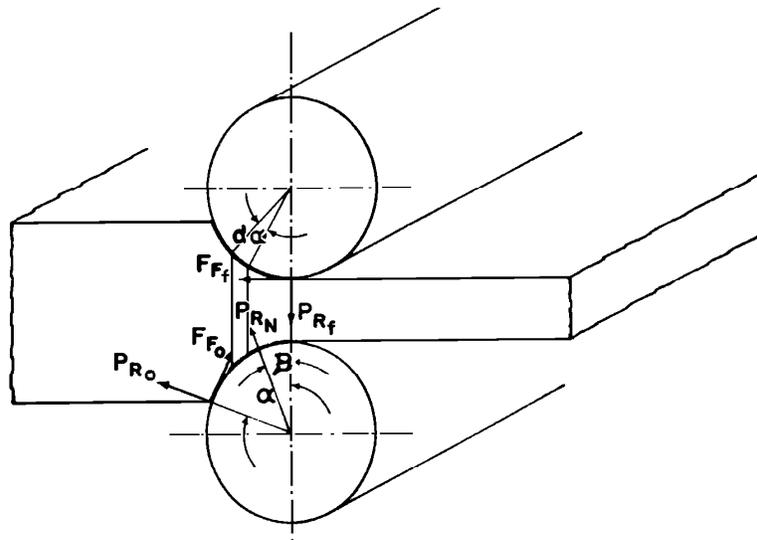


FIGURA 7.22 Distribución de presiones durante la laminación

La ecuación diferencial de equilibrio para un material que se deforma entre rodillos es común para todas las teorías. Para desarrollarla, se deberá cumplir que:

- Existan condiciones de deformación plana.
- No se considera la deformación elástica de los rodillos.
- La velocidad periférica de los rodillos sea constante.

Las condiciones mencionadas básicamente se cumplen para laminación en frío. Para el caso de laminación en caliente no se podrá resolver, de forma analítica, la ecuación diferencial resultante, debido a la compleja dependencia que existe del esfuerzo de cedencia con respecto a la velocidad de deformación y temperatura; asimismo, se complica la solución analítica al no poder justificar la simplificación de dicha ecuación, ya que los ángulos de mordedura son mucho mayores.

En la figura 7.23 se puede observar que al realizar un balance de fuerzas antes y después del punto neutro, la única diferencia será el sentido y, por tanto, el signo de la fuerza de fricción.

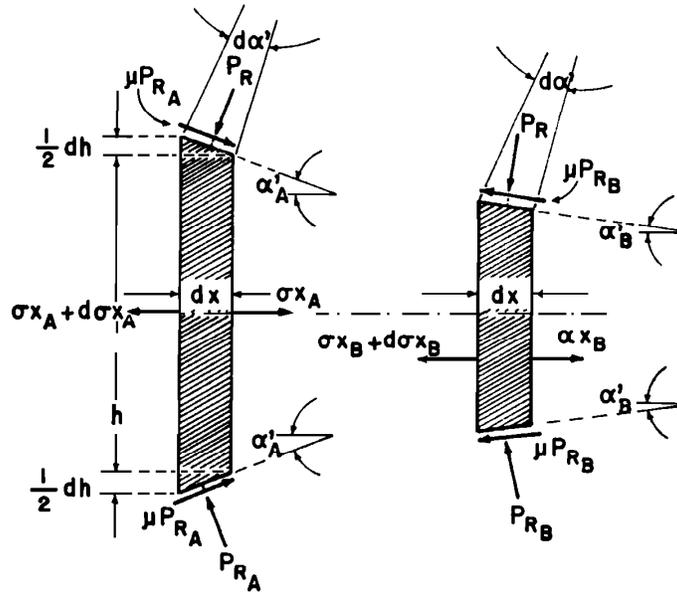


FIGURA 7.23 Antes y después del punto neutro

Como $\sum f_x = 0$, por su movimiento uniforme.

Variables utilizadas:

p_R = Presión radial

σ_x = Esfuerzo longitudinal debido a la presencia del devanador o freno

α' = Ángulo definido con respecto al plano de salida

x = Coordenada paralela al eje de laminación

a) Carga debida a esfuerzos longitudinales (considerar unidad de ancho)

$$(\sigma_x + d\sigma_x)(h + dh) - \sigma_x h$$

b) Carga debida a la fuerza de fricción

$\mu p_R =$ Esfuerzo cortante debido a la fricción, su área de aplicación es (deformación plana):

$$A = \frac{dx}{\cos \alpha}$$

Considerando que se aplica en los dos rodillos:

$$\pm 2p_R \mu \frac{dx}{\cos \alpha} \cos \alpha \quad \text{Carga de fricción}$$

signo de las figuras:

(+) neutro a la salida

(-) entrada a neutro

Por último, se tiene la carga debida a la presión radial:

$$p_R A = \text{Fuerza radial}$$

donde

$$A = \frac{dx}{\cos \alpha}$$

$$p_R \sin \alpha = \text{Proyección sobre el eje } x$$

Fuerza con respecto al eje x debido a p_R (considerando el efecto de los 2 rodillos):

$$2p_R \frac{dx}{\cos \alpha} \sin \alpha$$

De lo anterior se tiene que:

$$\Sigma f_x = 0$$

$$(\sigma_x + d\sigma_x)(h + dh) - \sigma_x h \pm 2\mu p_R \frac{dx}{\cos \alpha} \cos \alpha + 2p_R \frac{dx}{\cos \alpha} \sin \alpha = 0$$

Desarrollando la ecuación anterior se llega a:

$$\sigma_x dh + h d\sigma_x + d\sigma_x dh \pm 2\mu p_R d\alpha + 2p_R \tan \alpha dx = 0$$

despreciando el producto de dos diferenciales:

$$d\sigma_x dh = 0$$

$$\sigma_x dh + h d\sigma_x \pm 2\mu p_R d\alpha + 2p_R \tan \alpha dx = 0$$

Por otra parte,

$$\sigma_x dh + h d\sigma_x = d(\sigma_x h)$$

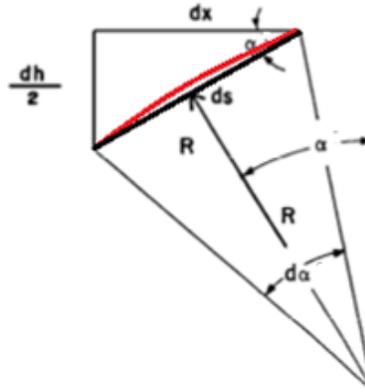


FIGURA 7.24

Colocando todos los términos en función de $Rd\alpha$ (coordenadas cilíndricas):

$$ds = Rd\alpha$$

$$dx = Rd\alpha \cos \alpha$$

$$\frac{dh}{2} = Rd\alpha \sin \alpha$$

Como:

$$\operatorname{tg} \alpha \cos \alpha = \frac{\operatorname{sen} \alpha}{\cos \alpha} \cos \alpha = \operatorname{sen} \alpha$$

Se tiene entonces que:

$$d(\sigma_x h) \pm 2\mu p_R R \cos \alpha d\alpha + 2p_R R \operatorname{sen} \alpha d\alpha = 0$$

Despejando $d(\sigma_x h)$

$$\frac{d(\sigma_x h)}{d\alpha} \pm 2p_R \mu R \cos \alpha + 2p_R R \operatorname{sen} \alpha = 0$$

Reordenando

$$\frac{\partial(\sigma_x h)}{\partial \alpha} = 2p_R R (\operatorname{sen} \alpha \pm \mu \cos \alpha) \quad (7.18)$$

A la expresión anterior, se le conoce como ecuación de Von Karman debido a que él fue el primero en desarrollarla (1925).

Cálculo de la carga para laminado en frío

En este caso, los ángulos de contacto son muy pequeños, usualmente menores a 6°, por lo que se pueden considerar las siguientes simplificaciones:

$$\text{sen } \alpha = \alpha$$

$$\text{cos } \alpha = 1$$

Entonces

$$\frac{\partial(\sigma_x h)}{\partial \alpha} = 2p_R R(\alpha \pm \mu)$$

Esta ecuación diferencial se puede resolver considerando que el criterio de fluencia, según Von Mises, se puede expresar como:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma'_0$$

donde

σ'_0 = Esfuerzo de cedencia considerando deformación biaxial

σ_1, σ_3 = Esfuerzos principales

Analizando el diagrama de la figura 7.22, se tiene que los esfuerzos principales se pueden aproximar a través de σ_x, p :

p = Presión de laminación

$$\sigma_1 = \sigma_x$$

$$\sigma_3 = p$$

Por lo tanto,

$$\sigma_x - (-p) = \sigma'_0$$

Realizando $\sum f_y = 0$ para determinar la relación entre la presión radial y la presión de laminación.

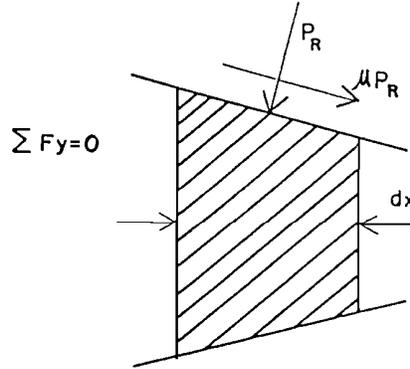


FIGURA 7.25

$$p_R \frac{dx}{\cos \alpha} \cos \alpha \pm \mu p_R \frac{dx}{\cos \alpha} \sin \alpha - p dx = 0$$

$$p = p_R (1 \pm \mu \tan \alpha)$$

De lo anterior y la condición de fluencia, tenemos

$$d(h(\sigma'_0 - p)) = 2p_R R(\alpha \pm \mu) dx$$

De la ecuación anterior, se obtiene

$$d\left(h\sigma'_0 \left(1 - \frac{p}{\sigma'_0}\right)\right) = 2p_R R(\alpha \pm \mu) dx$$

La diferencial de un producto se puede escribir

$$h\sigma'_0 d\left(1 - \frac{p}{\sigma'_0}\right) + \left(1 - \frac{p}{\sigma'_0}\right) d(h\sigma'_0) = 2p_R R(\alpha \pm \mu) dx$$

Debido a que cuando el espesor se reduce, el límite de fluencia se incrementa, entonces el producto:

$$h\sigma'_0 = \text{Constante} \quad \therefore \quad d(h\sigma'_0) = 0$$

Además,

$$h\sigma'_0 d\left(1 - \frac{p}{\sigma'_0}\right) = -h\sigma'_0 d\left(\frac{p}{\sigma'_0}\right)$$

Sustituyendo todo lo anterior

$$-h\sigma'_0 d\left(\frac{p}{\sigma'_0}\right) = 2p_R R(\alpha \pm \mu)d\alpha$$

y reordenando:

$$\frac{d\left(\frac{p}{\sigma'_0}\right)}{\frac{p}{\sigma'_0}} = \frac{2R(\alpha \pm \mu)d\alpha}{h}$$

Para integrar lo anterior, se requiere que el espesor h se determine en función de la posición angular

$$h = h_f + dh$$

De la figura 7.26

$$\frac{dh}{2} = R - R \cos \alpha$$

$$dh = 2R(1 - \cos \alpha)$$

Cuando α es pequeño ($\alpha \leq 6^\circ$)

$$\cos \alpha = 1 - \frac{(\alpha)^2}{2}$$

Por lo tanto,

$$dh = 2R \left[1 - \left(1 - \frac{(\alpha)^2}{2} \right) \right]$$

$$dh = R(\alpha)^2$$

$$h = h_f + R(\alpha)^2$$

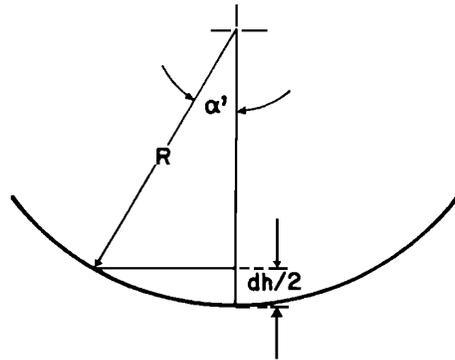


FIGURA 7.26

Adicional a lo anterior, se tiene

$$p = p_R(1 \pm \mu \tan \alpha)$$

De nuevo, considerando ángulos muy pequeños $\alpha \leq 6^\circ$

$$\mu \tan \alpha \ll 1$$

Por lo que:

$$p \approx p_R$$

Sustituyendo

$$\frac{d\left(\frac{p_R}{\sigma'_0}\right)}{\frac{p_R}{\sigma'_0}} = \frac{2R(\alpha \pm \mu)d\alpha}{h_f + R(\alpha)^2}$$

$$\frac{d\left(\frac{p_R}{\sigma'_0}\right)}{\frac{p_R}{\sigma'_0}} = \frac{2R\alpha d\alpha}{h_f + R(\alpha)^2} \pm \frac{2R\mu d\alpha}{h_f + R(\alpha)^2}$$

Reordenando, se obtiene:

$$\frac{d\left(\frac{p_R}{\sigma'_0}\right)}{\frac{p_R}{\sigma'_0}} = \frac{2\alpha d\alpha}{\frac{h_f}{R} + (\alpha)^2} \pm \frac{2\mu d\alpha}{\frac{h_f}{R} + (\alpha)^2}$$

La ecuación se integra de acuerdo con:

$$\int \frac{2\alpha d\alpha}{h_f / R + (\alpha)^2} = \int \frac{du}{u} = \text{Ln } u + C$$

donde

$$u = \frac{h_f}{R} + (\alpha)^2$$

$$du = 2\alpha d\alpha$$

Entonces

$$\int \frac{2\mu d\alpha}{h_f / R + (\alpha)^2} = 2\mu \int \frac{du}{a + bu^2}$$

donde

$$a = h_f / R$$

$$b = 1$$

$$u = \alpha$$

$$2\mu \int \frac{du}{a + bu^2} = 2 \frac{\mu}{\sqrt{ab}} \left(\text{tg}^{-1} \sqrt{\frac{a}{b}} \right) u + C$$

De lo anterior se tiene

$$\text{Ln} \left(\frac{p_R}{\sigma'_0} \right) = \text{Ln} \left[\left(\frac{h_f}{R} \right) + (\alpha)^2 \right] \pm 2\mu \left(\frac{R}{h_f} \right)^{\frac{1}{2}} \text{tg}^{-1} \left[\left(\frac{R}{h_f} \right)^{\frac{1}{2}} \alpha \right] + C$$

Se puede hacer un cambio de variable para facilitar el manejo de la ecuación.

Se define H

$$H = 2 \left(\frac{R}{h_f} \right)^{\frac{1}{2}} \text{tg}^{-1} \left[\left(\frac{R}{h_f} \right)^{\frac{1}{2}} \alpha \right]$$

Por lo tanto,

$$\text{Ln} \left(\frac{p_R}{\sigma'_0} \right) = \text{Ln} \left[\frac{h_f}{R} + (\alpha)^2 \right] \pm \mu H + C$$

Donde se obtiene

$$\frac{p_R}{\sigma'_0} = C \left[\frac{h_f}{R} + (\alpha)^2 \right] \exp(\pm \mu H)$$

Para evaluar la constante de integración

a) Condiciones de salida

$$\alpha = 0 \rightarrow H = 0$$

Si el esfuerzo de cedencia a la salida es

$$\sigma_0 = \sigma_{0f}$$

Considerando un esfuerzo longitudinal al eje de laminación

$$\sigma_{xf}$$

De la solución se obtiene:

$$C = \frac{p_R}{\sigma_{0f}} \frac{R}{h_f} \quad \text{a la salida}$$

Sustituyendo, se tiene la ecuación para la determinación de la presión radial de punto neutro a la salida, además del balance de fuerzas con respecto al eje y , se tiene

$$p_{R0} = p_0$$

y la condición de fluencia de Von Mises

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma'_0 \quad \sigma_1 = p \quad \sigma_3 = \sigma_{xf}$$

$$p_{R0} = \sigma_{0f} - \sigma_{xf}$$

Por lo tanto,

$$p_R = (\sigma_{0f} - \sigma_{xf}) \frac{R}{h_f} \left[\frac{h_f}{R} + (\alpha)^2 \right] \exp(\mu H)$$

$$\text{sen } \alpha = \frac{L_p}{R} = \frac{(R\Delta h)^{\frac{1}{2}}}{R} = \left(\frac{\Delta h}{R} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Para ángulos muy pequeños

$$\text{sen } \alpha \approx \alpha \quad \therefore \quad (\alpha)^2 = \frac{\Delta h}{R}$$

Sustituyendo para simplificar

$$p_R = (\sigma_{0f} - \sigma_{xf}) \frac{R}{h_f} \left(\frac{h_f}{R} + \frac{\Delta h}{R} \right) \exp(\mu H)$$

Por lo tanto,

$$p_R = (\sigma_{0f} - \sigma_{xf}) \frac{\bar{h}}{h_f} \exp(\mu H) \quad (7.19)$$

Evaluación de la constante de la entrada al punto neutro

Para la condición de entrada se tiene

$$H = H_0$$

β ángulo de mordedura

$$H_0 = 2 \left(\frac{R}{h_f} \right)^{1/2} \text{tg}^{-1} \left[\left(\frac{R}{h_f} \right)^{1/2} \theta \right]$$

Para cualquier punto entre θ (ángulo de mordedura) y β (ángulo al neutro):

$$\frac{p_R}{\sigma_0} = C \left[\frac{h_f}{R} + (\alpha)^2 \right] \exp(-\mu H)$$

Para la entrada

$$C = \frac{p_R}{\sigma_0} \left[\frac{h_f}{R} + (\alpha)^2 \right]^{-1} \exp(-\mu H_0)$$

Cuando $\alpha = \theta$ (entrada)

$$\left[\frac{h_f}{R} + (\alpha)^2 \right]^{-1} = \left(\frac{h_f + \Delta h}{R} \right)^{-1} = \left(\frac{h_0}{R} \right)^{-1} = \frac{R}{h_0}$$

sustituyendo

$$\frac{p_R}{\sigma_0} = \frac{(\sigma_{0f} - \sigma_{xf})}{\sigma_0} \frac{R}{H_0} \frac{\bar{h}}{R} \exp[\mu(H_0 - H)]$$

Presión radial de la entrada al neutro

$$p_R = (\sigma_{00} - \sigma_{x0}) \frac{\bar{h}}{h_0} \exp[\mu(H_0 - H)] \quad (7.20)$$

Las ecuaciones (7.19) y (7.20), desarrolladas anteriormente, permiten calcular la presión radial para cualquier posición, de esto la carga puede ser evaluada como:

$$P = R'b \int_0^\theta p d\alpha \quad (7.21)$$

Cálculo de la carga para laminado en caliente

Las teorías desarrolladas para laminado en caliente no han alcanzado el grado de avance que se tiene para laminado en frío, debido principalmente a que las condiciones de fricción (varía punto a punto en función de materiales, lubricación y temperatura) y el esfuerzo de cedencia es una función compleja de la temperatura y de la velocidad de deformación $\dot{\epsilon}$ (esta varía durante todo la etapa de deformación, siendo máxima a la entrada y mínima a la salida), como se puede constatar en:

$$\dot{\epsilon} = \frac{v_f}{h} = \frac{2\omega R \sin \alpha}{h_f + D(1 - \cos \alpha)} \quad (7.22)$$

De (7.22) se comprueba que la máxima velocidad de deformación se presenta cerca de la entrada del material a los rodillos, debiendo tener en cuenta que la rapidez de deformación varía además con la distancia del elemento diferencial al rodillo. Con la finalidad de realizar una aproximación se tiene que la velocidad de deformación promedio está dada por:

$$\bar{\dot{\epsilon}} = \frac{1}{\theta} \int_0^\theta \dot{\epsilon} d\alpha$$

$$\bar{\dot{\epsilon}} = \frac{1}{\theta} \int_0^{\theta} \frac{(2\omega R \operatorname{sen} \alpha)}{h_f + 2R(1 - \cos \alpha)} d\alpha$$

Si

$$h = h_f + 2R(1 - \cos \alpha)$$

$$dh = 2R \operatorname{sen} \alpha d\alpha$$

donde

$$\bar{\dot{\epsilon}} = \frac{\omega}{\theta} [\operatorname{Ln}(h_f + 2R(1 - \cos \alpha)) - \operatorname{Ln}(h_f)] \quad (7.22')$$

$$\bar{\dot{\epsilon}} = \frac{\omega}{\theta} \operatorname{Ln} \frac{h_0}{h_f}$$

v_R = Velocidad radial o periférica de los rodillos

θ = Ángulo de mordedura

ω = Velocidad de giro del rodillo

A partir de la ecuación diferencial básica de laminación (ecuación de Von Karman 7.18):

$$\frac{d(\sigma_x h)}{d\alpha} = 2p_R(\operatorname{sen} \alpha \pm \mu \cos \alpha)$$

y sustituyendo una solución obtenida por Orowan con las aproximaciones propuestas por Bland y Ford, Sims desarrolló una ecuación para la carga de laminación, que en su forma simplificada queda:

$$P = \sigma_0 b L_p Q \quad (7.23)$$

Donde Q es función compleja de la reducción, del espesor y del coeficiente R/h

$$Q = \frac{\sqrt{hf}}{4\Delta h} \left[\pi \tan^{-1} \sqrt{\frac{\Delta h}{h_0}} - \sqrt{\frac{R}{h_0}} \left[\operatorname{Ln} \left(\frac{h_n^2}{h_0 h_f} \right) \right] \right] - \frac{\pi}{4} \quad (7.23a)$$

h_n = Espesor al punto neutro

Dicho valor puede ser obtenido de la figura 7.27.

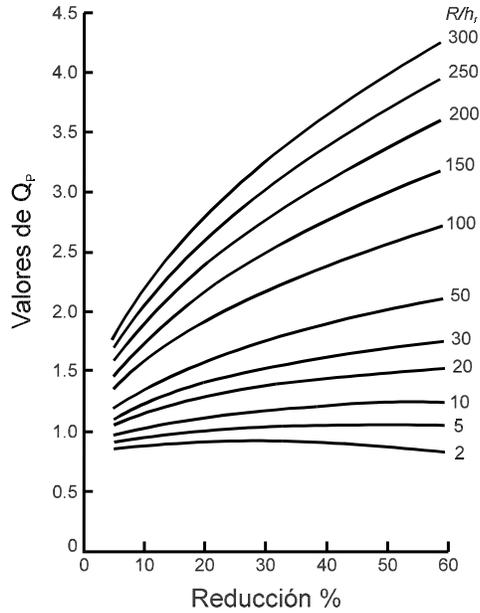


FIGURA 7.27

Existen otras ecuaciones aplicables al laminado en caliente, entre otras, se encuentran las que desarrollaron Bland y Ford empleando análisis de campo de líneas de deslizamiento:

$$P = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} b L_p \left[\frac{\pi}{2} + \frac{L_p}{(h_0 + h_f)} \right] \quad (7.24)$$

El par podrá ser calculado mediante:

$$T = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} b L_p^2 \left[1.6 + 0.91 \frac{L_p}{(h_0 + h_f)} \right] \quad (7.25)$$

Danton y Crane han propuesto para la determinación de la carga:

$$P = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} b L_p \left[1.31 + 0.53 \frac{L_p}{(h_0 + h_f)^{1/2}} \right] \quad (7.26)$$

El esfuerzo de cedencia a la deformación homogénea se puede obtener gráficamente a partir de la reducción, temperatura y velocidad de deformación.

Cálculo de la carga cuando se tienen enrolladores o frenos

El efecto de proporcionar tracción tanto anterior como posterior, cuando se lamina el material, puede comprenderse fácilmente empleando el criterio de Von Mises para deformación plana:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \bar{\sigma}_0$$

Sustituyendo valores:

$$P - \sigma_h = \bar{\sigma}_0$$

Donde σ_h representa un esfuerzo de tracción a lo largo del eje de laminación. Esto significa que la carga aplicada por el enrollador o freno reduce en igual proporción la aplicada por los rodillos para llevar a efecto el proceso de laminación. Dicha práctica da como resultado un menor desgaste de los rodillos, mejor acabado y uniformidad en el espesor del material. De lo anterior, se tiene que la carga aplicada por los rodillos será:

$$P_t = P \left[1 - \frac{\sigma_a + \sigma_b}{\sigma_0} \frac{\beta}{\alpha} \right]$$

donde

P_t = Carga requerida cuando son aplicados esfuerzos de tensión a lo largo del eje de laminación

σ_a = Esfuerzo longitudinal debido al freno

σ_b = Esfuerzo longitudinal debido al enrollador

P = Carga necesaria para producir la misma deformación sin la presencia de la carga longitudinal

α = Ángulo de mordedura

β = Ángulo neutro

Cálculo del par y la potencia

La potencia necesaria para laminar un material se consume principalmente en cuatro puntos; (a) Deformación del material, (b) Pérdidas debidas a fricción en los rodamientos, (c) Pérdidas en

reductores de velocidad y en la transmisión en general, (d) Pérdidas de tipo eléctrico en motores y generadores.

Las pérdidas producidas por enrolladores y frenos también deberán ser consideradas en este punto. Obviamente, el valor más representativo es el necesario para deformar el material. Para calcular entonces este punto, será necesario conocer la carga de laminación, la cual se distribuye de acuerdo con lo indicado en la figura 7.28:

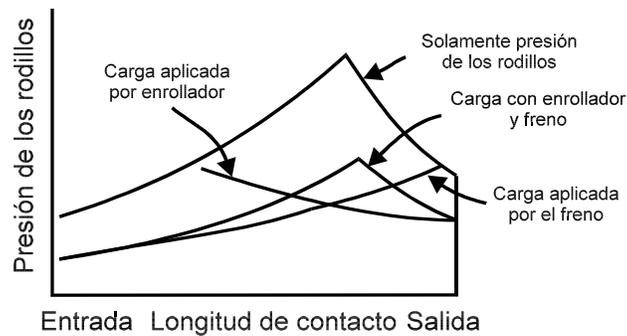


FIGURA 7.28 Distribución de la carga de laminación

Sin embargo, se puede considerar que la carga concentrada P de efecto equivalente se encuentra aplicada a una distancia a del plano que contiene a los ejes de rotación de los rodillos. Para calcular el brazo de palanca a , se procede de la siguiente manera:

Se define una nueva variable λ

$$\lambda = \frac{a}{L_p} \quad (7.27)$$

Para laminado en caliente se puede considerar que:

$$\lambda = 0.5$$

En el laminado en frío se debe considerar una corrección por el aplastamiento elástico sufrido por los rodillos, de acuerdo con Ford:

$$\therefore \lambda < 0.5$$

$$0.43 \leq \lambda \leq 0.48$$

El par de laminación efectivo:

$$T = 2 Pa \quad (7.28)$$

La potencia será entonces:

$$\dot{W} = T\omega \quad (7.29)$$

Coefficiente de fricción

La fricción existente entre los rodillos y el material durante el proceso de laminación es de gran importancia para su adecuado desarrollo. Por un lado, es una función compleja de la velocidad, temperatura, material, acabado de los rodillos, lubricante (refrigerante) utilizado y el material que se va a laminar; además, varía punto a punto con respecto al arco de contacto. Todo esto hace sumamente complicada su correcta medición, por lo que en todas las teorías de laminación se toma el coeficiente de rozamiento como un valor constante.

Para laminado en frío con empleo de lubricante, se recomienda que el valor de este varíe entre 0.05 y 0.10, mientras que para el laminado en caliente es común considerar valores superiores a 0.20. Para condiciones sin deslizamiento, como ejemplo se tiene que para laminado de acero, con rodillos de este mismo material, a una temperatura de 1100 °C y aplicando grafito coloidal disuelto en agua como lubricante, el coeficiente de fricción varía de 0.20 a 0.40. Es de suma trascendencia el valor de dicho coeficiente, ya que limitará el ángulo de contacto máximo según:

$$\mu = \tan \theta$$

Por último, se tiene que un incremento en el coeficiente de fricción redundará en un desplazamiento del punto neutro hacia la entrada y, por tanto, en un aumento de la carga y potencia demandada para el proceso. Aun cuando la ecuación antes expuesta podría ser aplicada para obtener el coeficiente de fricción, el resultado obtenido no será preciso, por lo que este procedimiento se descarta.

Otros métodos han sido empleados basándose en la carga y el par:

$$\mu = \frac{T_1}{PR} \quad (7.30)$$

T_1 = Par de accionamiento de un rodillo

Es posible calcularlo también mediante mediciones del avance S , donde:

$$S = \frac{1}{4} \left[\frac{r}{1-r} \right] \left[1 - \frac{\alpha}{2\mu} \right]^2 \quad (7.31)$$

El avance se define como la diferencia relativa entre la velocidad de salida del material y la de los rodillos:

$$S = \frac{v_f - v_R}{v_R} \quad (7.32)$$

donde

v_f = Velocidad de salida del material

v_R = Velocidad periférica de los rodillos

De acuerdo con (Roberts, 1983), el coeficiente de fricción se incrementa con la temperatura con base en sus experimentos realizados en un laminador dúo, por tanto, se tiene:

$$\mu = 2.7 \times 10^{-4} T - 0.08$$

donde T está dado en °F.

Sin embargo, es necesario considerar también lo reportado por Galeji (1969), que refiere que la fuerza de fricción decrece con el incremento de la temperatura, de tal forma que el coeficiente de fricción se describe como:

$$\mu = 1.05 - 0.0005 T - 0.56 v_L \quad \text{para rodillos de acero}$$

y

$$\mu = 0.94 - 0.0005 T - 0.056 v_L \quad \text{para rodillos de hierro gris.}$$

Mientras que para rodillos de soporte de acero $\mu = 0.82 - 0.0005 T - 0.56 v_L$

Lo propuesto por Galeji corresponde con las observaciones experimentales en procesos de laminación, mientras que lo expresado por Roberts se ha determinado por ensayos de compresión de anillos de acero inoxidable. Por su parte, Rowe (1977) calcula la fricción a partir de:

$$\mu = 0.84 - 0.0004 T$$

Esto para laminación en caliente, de tal forma que la temperatura deberá ser mayor a 700 °C.

Lenard y Barbulovic, en 2002, a partir de ensayos de laminación en caliente de aceros de bajo carbono, descascarados, y utilizando una solución refrigerante, proponen que (*Primer on Flat Rolling*, John G. Lenard):

$$\mu = -0.183 - 0.636 \left(\frac{n}{\dot{\epsilon}} \right) \exp \left(-0.279 \frac{\Delta T}{T} \right) + 0.248 \left(\frac{p}{\sigma_{0m}} \right)^{1.2}$$

donde

n = velocidad angular [rev / s]

ΔT = reducción superficial de temperatura en la pasada

T = temperatura promedio durante la pasada [°K]

p = presión interfacial promedio

σ_{0m} = esfuerzo de cedencia promedio

MÍNIMO ESPESOR. La deformación elástica de los rodillos se incrementa con la presión de laminación, lo cual da como resultado que en ocasiones los rodillos se deformen elásticamente con mayor facilidad a que el material lo haga plásticamente. Por lo tanto, para un material con condiciones de deformación especificadas se llega al caso en el que no pueda ser reducido adicionalmente el espesor de la hoja metálica.

$$h_{\min} \propto \sigma_0 \mu R$$

Se ha comprobado que se pueden alcanzar espesores más pequeños cuando se emplean rodillos de menor diámetro. Un análisis más completo del problema demuestra que el espesor límite es proporcional al coeficiente de fricción, al radio del rodillo y al esfuerzo de cedencia del material deformado e inversamente proporcional al módulo de elasticidad de los rodillos.

$$h_{\min} \approx c \mu \sigma_0 R \tag{7.33}$$

7.5 DEFECTOS EN LOS PROCESOS DE LAMINADO

Los defectos que presentan los productos laminados tienen dos orígenes principales:

- a) Los defectos provenientes del material tales como heterogeneidad, rechupes y porosidad. Para evitar estos problemas, se descarta la cabeza del lingote y se elimina así la zona de rechupes. Dado que el proceso tiene un efecto mezclador y de afine de grano, es posible entonces eliminar la estructura de fundición, así como la porosidad interna y la segregación, con lo que se limitan sus efectos y se da como resultado notables mejoras en las características mecánicas de los productos obtenidos. Para garantizar los efectos benéficos anteriormente mencionados, será necesaria una reducción total de cuando menos un 75%, además de que la temperatura final no sea elevada.
- b) Los defectos generados por prácticas inadecuados durante la laminación o simplemente inherentes al proceso. Como ejemplo se tiene que el espesor del material después de pasar entre los rodillos no será igual a la separación original de estos (sin carga), sino que resultará un poco mayor. Esta diferencia se puede explicar con base en la deformación elástica que sufre la estructura del laminador al paso del material a través de los rodillos.

Los rodillos deben estar perfectamente paralelos, ya que de lo contrario el espesor de la hoja no será uniforme. Exceso de deformación durante el paso, flexión de los rodillos o su coronamiento excesivo, provocarán que la deformación a lo ancho de la hoja no sea uniforme lo que redundará en ondulaciones, pandeo en la hoja y rompimientos en la punta (dando lugar a ramificaciones), como se puede ver en la figura 7.29.

Cuando la reducción es muy elevada, de tal forma que la parte central se expande lateralmente más que la superficie, se da lugar a un abarrilamiento de las superficies laterales, teniéndose el efecto inverso para pequeñas reducciones:

$$\frac{\bar{h}}{L_p} > 2$$

Cuando el material presenta una discontinuidad o zona débil en su parte media, se puede dar lugar a una falla o al rompimiento de la punta de la cinta. A este tipo de fallas por su aspecto se le conoce como hocico de cocodrilo. Los defectos en las superficies laterales de la placa (agrietamiento, concavidad o convexidad) pueden ser minimizados o anulados a partir del empleo de cajas universales.

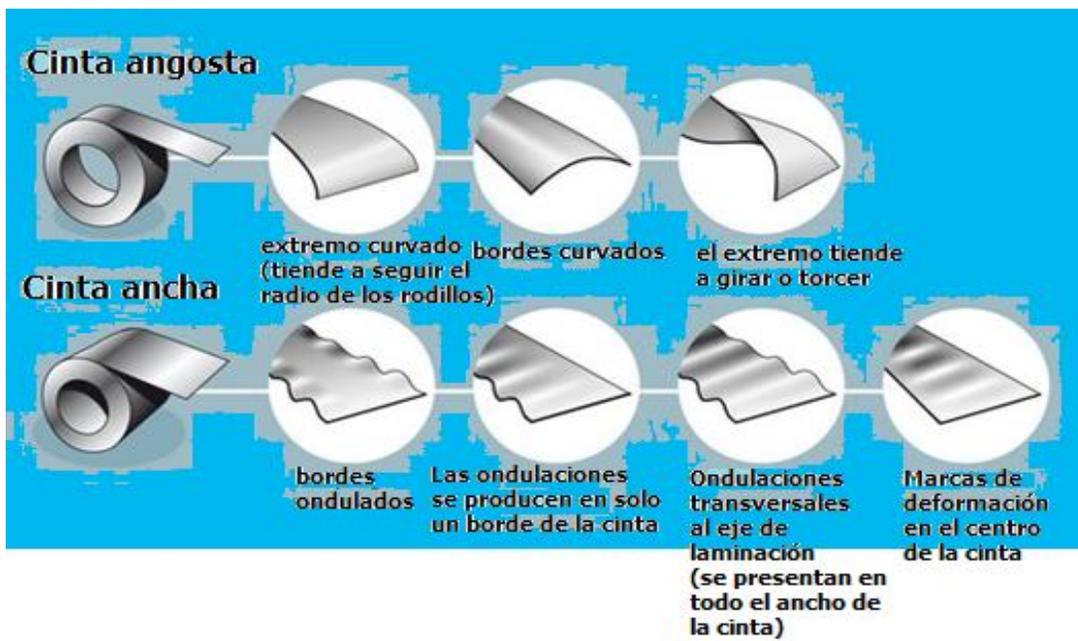
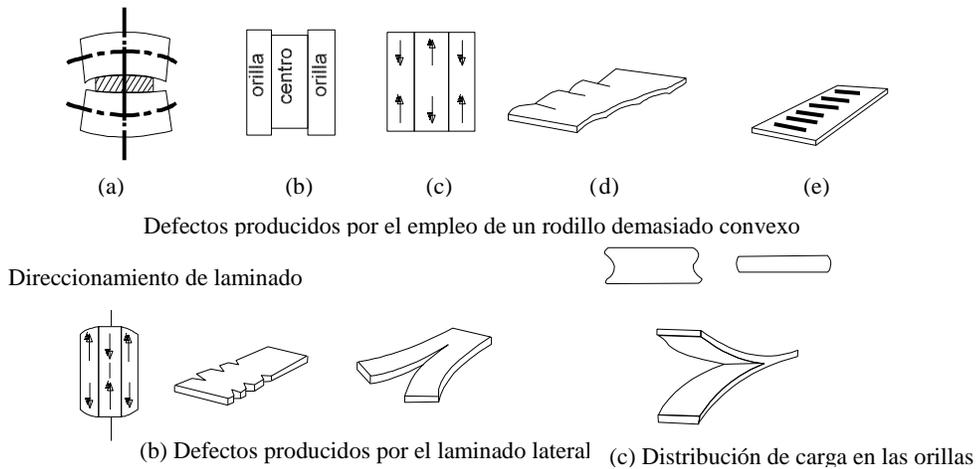


FIGURA 7.29 Defectos en chapa laminada

7.6 CONTROL DE PROCESO

Las grandes producciones comunes de los modernos trenes de laminación vuelven imperativa la necesidad de que estas instalaciones estén bajo un control automático. El espesor del material laminado puede variar tanto a lo ancho como a lo largo.

Se han desarrollado métodos diversos, la mayoría revisa el espesor del material ya laminado, y se ajustan, de ser necesario, la separación de los rodillos del arreglo anterior. Las altas velocidades, características de las actuales instalaciones, han hecho forzoso el desarrollo de sistemas con elevada velocidad de respuesta, los cuales miden continuamente el espesor del material, ya sea a partir de rayos X o bien mediante el empleo de radioisótopos. En laminado en caliente, la medición podrá ser efectuada de manera indirecta a partir de la carga requerida y de la curva característica. La señal de realimentación permitirá hacer los ajustes convenientes para minimizar el error.

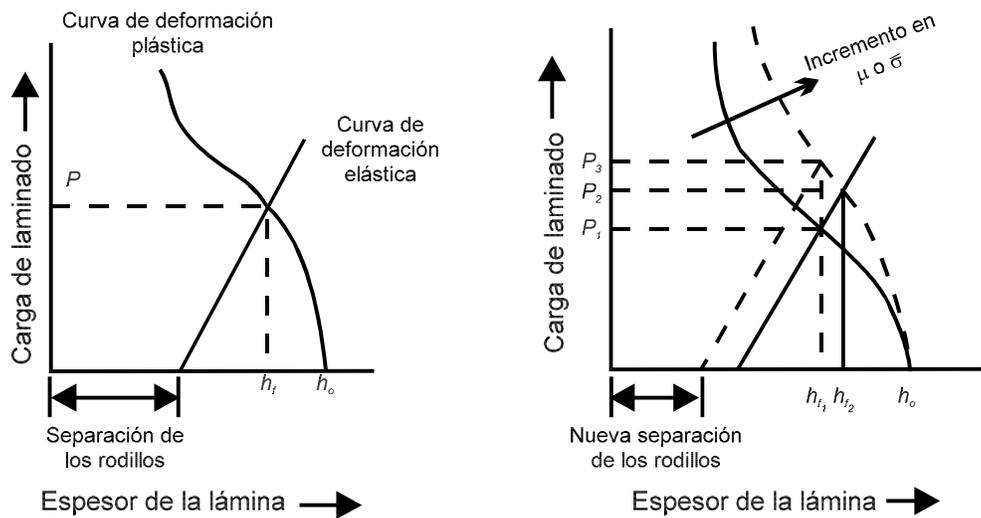


FIGURA 7.30 Uso de las curvas características para el cambio de las condiciones de laminación

Los sistemas correctivos implementados a la fecha han dado mejor resultado que aquéllos basados en la colocación de sensores a la entrada del material. Esto ha sido aplicado a nivel industrial debido a la gran cantidad de variables por medir e interpretar (esfuerzo de cedencia, espesor de entrada, temperatura, condición superficial), lo cual se suma a las altas velocidades de laminación de hasta 70 m/s.

Independientemente de los controladores de espesor, es común el empleo de fotoceldas para controlar la tensión entre castillos, cuando se trabaja con trenes continuos o semicontinuos.

7.7 GEOMETRÍA DE LAS SECCIONES DEL PERFIL LAMINADO

Al laminar productos no planos, como varilla (figura 7.30), barras de diversas secciones, rieles, viguetas, etcétera, el proceso se complica aún más, ya que será necesario considerar el ensanchamiento y desarrollar una secuencia tal, que permita máximas reducciones, así como uniformidad en la deformación. Por ejemplo, en la producción de barras redondas sigue la siguiente secuencia: cuadrado-óvalo-redondo; mientras que para barra cuadrada, se sigue: cuadrado-óvalo-redondo-óvalo-cuadrado (figura 7.31).

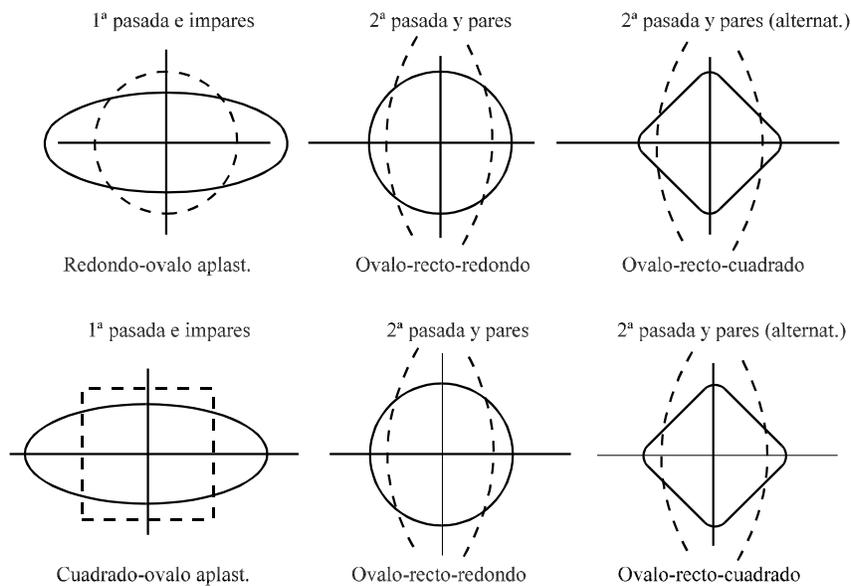


FIGURA 7.31 Secuencias de laminación

Es evidente que la realización de otros perfiles requiere de pasos más complicados, en función de la geometría de la sección transversal del perfil que se va a obtener (figura 7.32).

Durante la laminación se debe evitar el pandeo del material. Como ejemplo de las reducciones obtenidas, se tiene la calibración que se aplica en la fabricación de varilla a partir de palanquilla de 0.1 m.

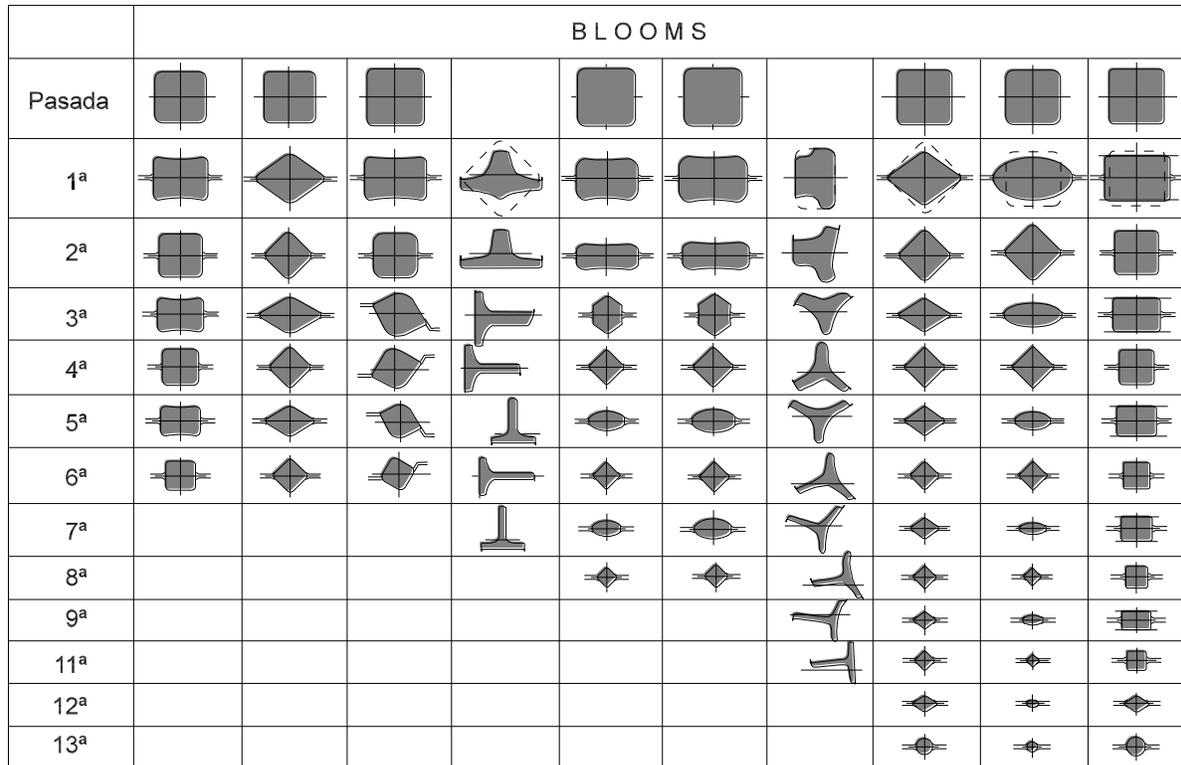


FIGURA 7.32 Distintos métodos para laminar palanquilla

Cálculo del ensanchamiento

En todos los desarrollos teóricos presentados anteriormente se desecha el ensanchamiento sufrido por el material. En la laminación de planchas o tiras de ancho considerable dicha aseveración es correcta, ya que la fricción en la dirección de laminación es mucho menor que con sentido transversal. Durante la laminación de barras angostas, el ensanchamiento del material es mayor, además de que en muchos casos, es deseable. Esto se debe a que la fricción lateral es de menor magnitud que en el caso anterior y, por lo tanto, la resistencia limita el flujo del material en sentido longitudinal.

Los factores que determinan la magnitud del ensanchamiento son:

- a) Reducción de altura
- b) Diámetro de los rodillos
- c) Tipo del material de los rodillos
- d) Tipo de material a laminar
- e) Temperatura del material

- f) Coeficiente de fricción entre el material y los rodillos
- g) Velocidad del proceso

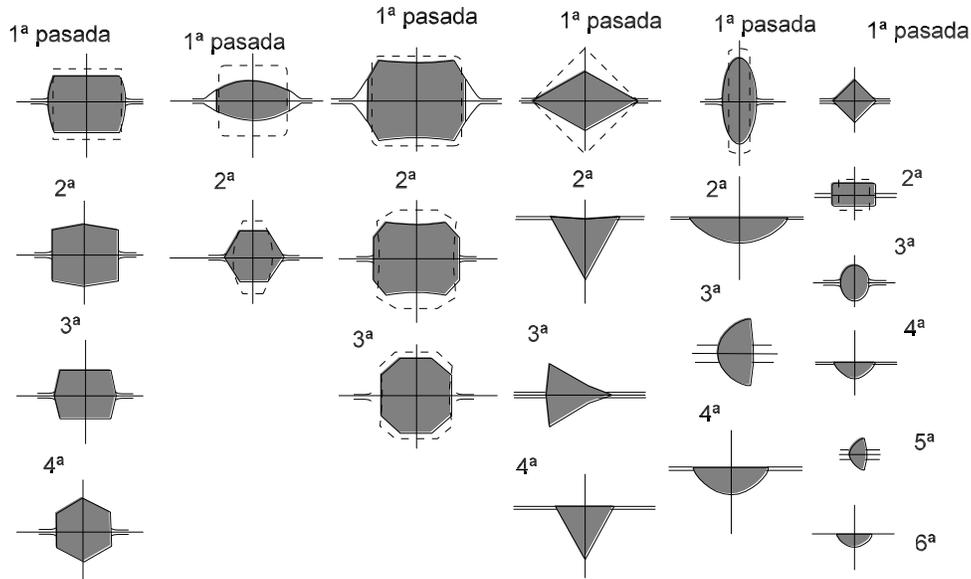


FIGURA 7.33 Laminación de perfiles hexagonales, octogonales, triangulares y media caña

Se ha comprobado que este último factor no tiene efectos para velocidades de 10 m/s. Arriba de esta velocidad, el ensanchamiento tiende a disminuir ligeramente, de ahí que la mayoría de las ecuaciones desarrolladas omitan dicho factor. Existe una gran cantidad de expresiones de complejidad y precisión muy variada, una de ellas es la implementada por Sven Ekelund, que aunque es compleja y necesita resolverse a partir de un proceso iterativo, garantiza resultados excepcionalmente buenos.

$$\frac{b_0^2 - b_f^2}{2} = 4m\sqrt{\rho\Delta h}\Delta h - 2m(h_0 + h_f)\sqrt{\rho\Delta h}Ln \frac{b_f}{b_0} \quad (7.35)$$

$$m = 1.6\mu \frac{\sqrt{r\Delta h} - 1.2\Delta h}{h_0 + h_f}$$

donde

b_0 = Ancho inicial del material

b_f = Ancho final del material

r_T = Radio de trabajo de los rodillos

$$r_T = \frac{D_c + S_c - h_f}{2}$$

D_c = Diámetro del cuerpo de dos rodillos

S_c = Separación entre rodillos

El coeficiente de fricción está dado por

$$\mu = 1.05 - 0.0005 T - 0.56v_L$$

para rodillos de acero, y

$$\mu = 0.94 - 0.0005 T - 0.056v_L$$

para rodillos de fundición vaciados en coquilla.

Donde

T = Temperatura de laminación en °C

v_L = Velocidad de laminación ($\frac{m}{s}$)

Para dar solución a la expresión propuesta por Ekelund (7.35), se pueden utilizar métodos como el de Newton-Raphson que se agilizan fácilmente mediante un programa de cómputo apropiado.

Considerando el método de Newton-Raphson, la ecuación 7.35 se puede resolver como:

$$b_{fn} = b_{fn-1} - \frac{f(b)}{f'(b)}$$

El método de Ekelund fue desarrollado para productos planos, por lo que en el caso de no planos, será necesario simplificar la memoria de pasos a sus equivalentes de planos, procediendo entonces al cálculo. Para lograr, lo anterior A. Fennd propuso un método basado en el cálculo del rectángulo equivalente, en función de los puntos donde la sección de entrada interseca al paso en cuestión.

Para definir el rectángulo equivalente de la sección de entrada, se toma como ancho la distancia entre los puntos de intersección. A continuación, se calcula el área comprendida por el perímetro de la sección, hasta los puntos de intersección. La altura del rectángulo se calcula utilizando dos parámetros antes definidos. Este tipo de procedimientos es aplicable a las secuencias:

- Redondo-óvalo-redondo
- Cuadrado-óvalo-cuadrado
- Diamante-diamante



FIGURA 7.34 Laminador alineado o desplegado empleado para la laminación de barras (instalado en Gujarat, India).



FIGURA 7.35 Perfiles estructurales obtenidos por laminación

7.8 TENDENCIAS A FUTURO

Resulta indiscutible que la metalurgia del siglo XXI se orienta a nuevos materiales producidos por nuevas tecnologías; materiales nanoestructurados, nanopartículas, polímeros conductores, propiedades físicoquímicas especiales, producción mediante métodos aditivos, entre otros muchos aspectos. En particular, los procesos de laminación de metales y aleaciones se orientarán a la reducción de la energía consumida en el proceso y a un mayor control de este, de tal forma que se obtengan tolerancias más cerradas, a la vez que mejores propiedades mecánicas (resistencia máxima, límite de cedencia, tenacidad), mediante la obtención de grano ultrafino en laminado en caliente.

Del análisis del proceso de laminación se ha observado que la fricción, si bien necesaria para este, está relacionada con la carga requerida y, por consecuencia, con el trabajo demandado, por lo que es necesario considerar la tendencia a reducir los coeficientes de fricción, sobre todo para laminado en caliente.

En particular, el acero será todavía la aleación más utilizada en la primera mitad del siglo XXI y, por tanto, laminada en mayor cantidad. Estos seguirán siendo materiales de amplio espectro para cuyas diferentes composiciones será factible obtener mejores propiedades físicas, combinando el efecto de los aleantes con el de los tratamientos termomecánicos realizados con un alto grado de control, situación que demandará modificaciones en los trenes de laminación y en su instrumentación.

Dentro de la política mundial de Recicla, Reúsa, Recupera; uno de los resultados que se puede prever para los próximos años es un sensible incremento en el reúso de placas y perfiles de desecho, como pueden ser las provenientes de barcos, tanques, rieles y perfiles, todos los cuales pueden utilizarse como material de partida para la producción de hojas y perfiles de menores dimensiones. Este tipo de procedimientos, si bien son casi tan antiguos como la industria de la laminación, ahora serán mucho más atractivos.

CAPÍTULO 8

EXTRUSIÓN

8.1 GENERALIDADES

La extrusión es un proceso de conformado mecánico cuyos antecedentes se remontan a principios del siglo XIX. Sus primeras aplicaciones fueron en la fabricación de tuberías de plomo para la conducción de gas y agua en la Inglaterra victoriana.

La experiencia obtenida en la extrusión de plomo promovió que, ya en 1894, se aplicara en la fabricación de perfiles de latón, dando como resultado que en la época actual el proceso sea ampliamente usado en la fabricación de perfiles de formas muy diversas (figura 8.1), no solo para metales suaves, tales como el plomo y aleaciones de cobre o aluminio, sino también para aceros y aleaciones de níquel, entre otros.



FIGURA 8.1 Mediante extrusión es factible producir perfiles de geometrías complejas

El principio del proceso de extrusión (figura 8.2) es similar a la acción que se lleva a cabo para extraer pasta dental del tubo dentífrico. Se tiene el material en estado plástico, dentro de una cámara de compresión; se ejerce presión sobre este obligándolo a salir a través de un dado o boquilla (orificio) con la forma del perfil que se requiere obtener. En función de lo anterior, es fácil comprender que no existe casi ninguna limitación en cuanto a la figura del perfil deseado. Por extrusión se entiende la transformación que sufre un lingote, normalmente cilíndrico, que es obligado a fluir a través de un dado con la forma requerida, obteniendo entonces el perfil, que puede ser sólido o hueco, de sección transversal constante.

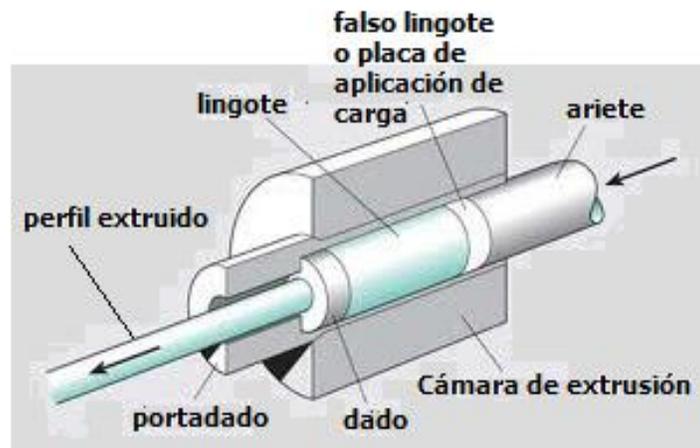


FIGURA 8.2 Descripción esquemática del proceso de extrusión

Aun cuando la productividad del proceso es sensiblemente menor que en la laminación, la extrusión presenta como gran ventaja la multitud de formas que se pueden producir, muchas de las que son imposibles de fabricar por laminación. Además, sus tolerancias son más cerradas y los acabados, mejores (figura 8.3).

Como en realidad lo único que se requiere variar para producir un determinado perfil es el dado, y debido a su relativo bajo costo, el proceso de extrusión se puede aplicar con grandes ventajas cuando se requieren producciones pequeñas que no justifican de forma alguna el costo de los rodillos necesarios para manufacturar mediante laminación.



FIGURA 8.3 Se presentan dos ejemplos de dados para la extrusión de aluminio de perfiles de geometría compleja

8.2 PROCESO DE EXTRUSIÓN

Dadas las fuertes deformaciones a las que es sometido el material y las elevadas cargas resultantes, este proceso de compresión indirecta se realiza normalmente en caliente. De acuerdo con la manera en que se desarrolla el proceso, se puede clasificar en dos tipos:

- a) Extrusión directa
- b) Extrusión indirecta, también conocida como invertida

Extrusión directa

En este caso, el metal extruido fluye en la misma dirección que el pistón. Se considera entonces que el lingote se desplaza con respecto a la cámara de compresión durante el proceso, dando como resultado que la presión sea función de la longitud del lingote (figura 8.4).

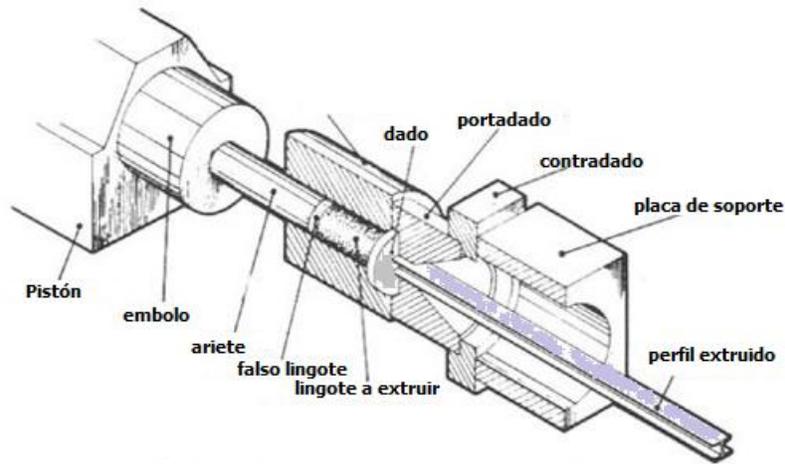


FIGURA 8.4 Proceso de extrusión directa

Extrusión indirecta

El metal fluye en dirección opuesta a la del movimiento del pistón (figura 8.5); en este caso el dado se encuentra montado regularmente en un ariete hueco. No existe movimiento relativo entre la pared del contenedor y el tocho, lo cual se traduce en que la carga de extrusión no es función de la longitud del lingote, además de que es sensiblemente menor que para la extrusión directa. Es conveniente mencionar que debido a las características del proceso, este tiene limitaciones y requiere además de un herramental complicado, lo cual restringe su campo de aplicación, dando como resultado que la extrusión directa sea el método más utilizado.

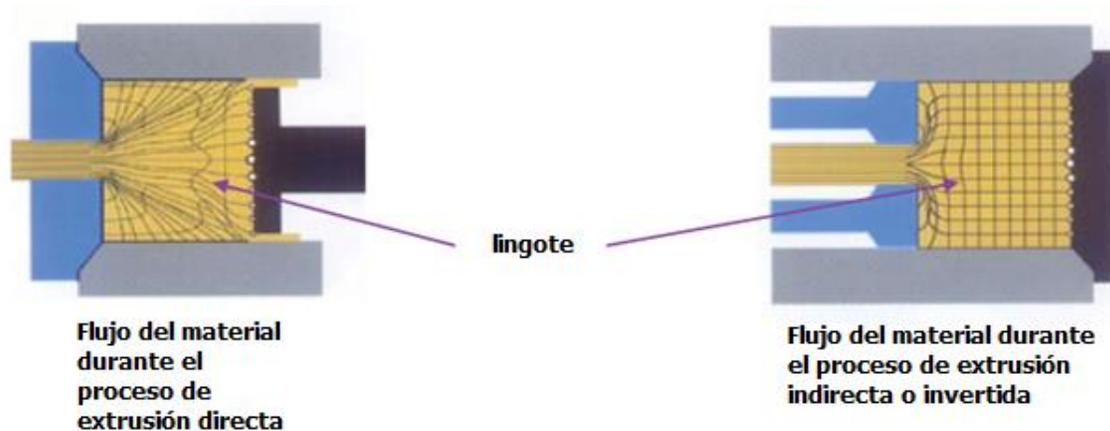


FIGURA 8.5 Flujo del metal durante la extrusión directa e indirecta

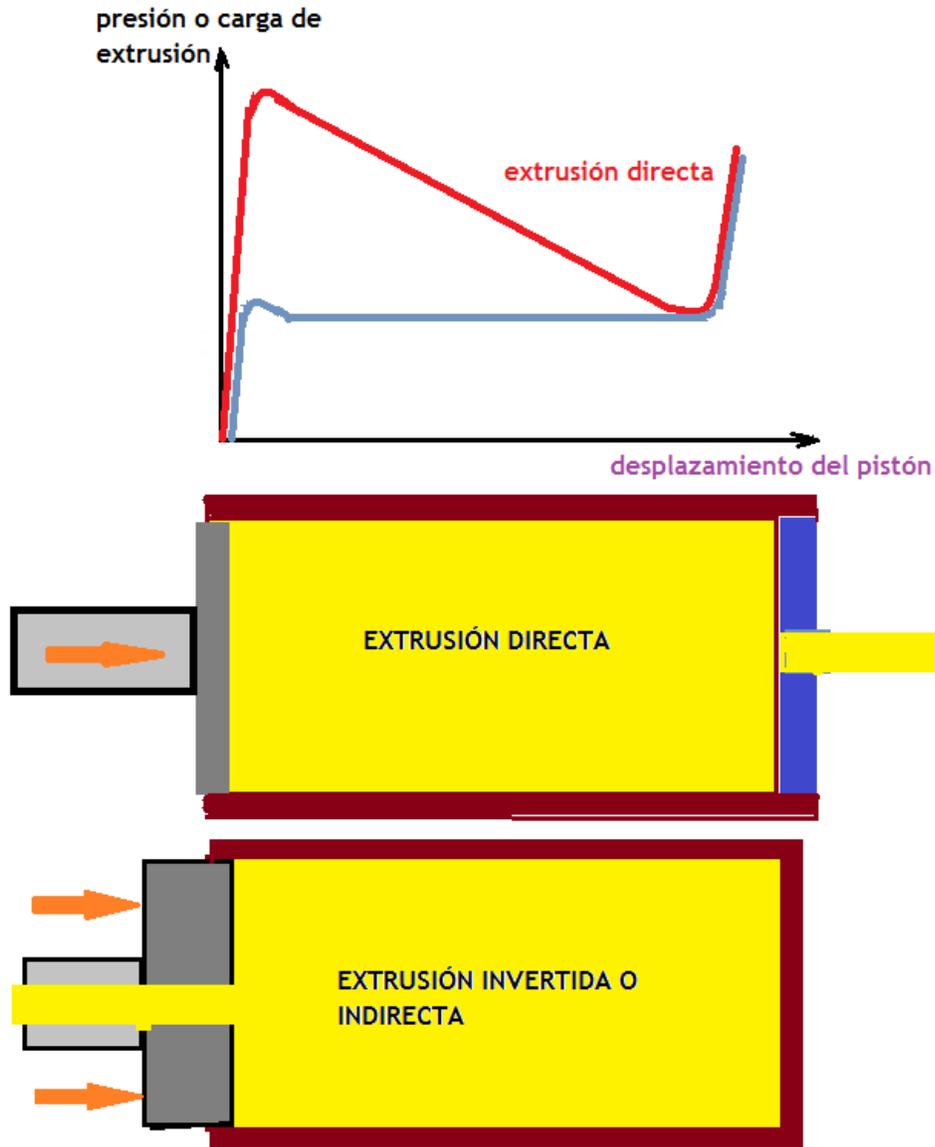


FIGURA 8.6 Variación de la carga de extrusión en función del desplazamiento del pistón

Aun cuando no es común, los procesos de extrusión también pueden ser clasificados con base en la temperatura a la que se realiza el proceso:

EXTRUSIÓN EN CALIENTE. Tanto el proceso directo como el inverso se realizan en condiciones de temperatura y velocidades de deformación tales que no se presente endurecimiento; la presión requerida es menor y la única desventaja la presenta el control dimensional y geométrico del producto.

EXTRUSIÓN EN FRÍO. Este proceso se aplica en la fabricación de pequeñas partes de maquinaria, como pernos, válvulas de admisión; así como partes asimétricas. Sus principales ventajas son la precisión dimensional y la buena resistencia del producto. En este caso queda la extrusión por impacto, la cual se emplea en la producción de perfiles huecos de pequeña longitud.

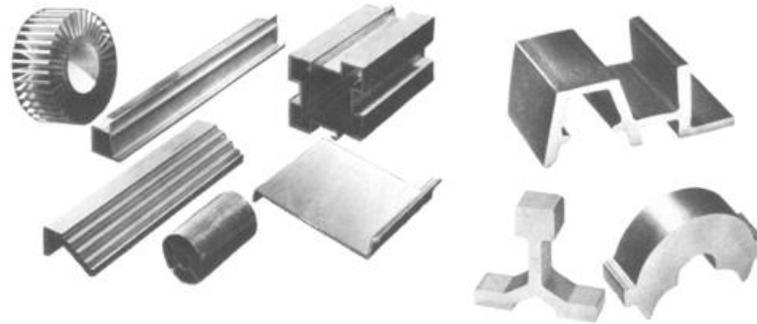


FIGURA 8.7 Perfiles extruidos de aluminio

8.3 PRENSA DE EXTRUSIÓN

El proceso de extrusión tiene sus orígenes en el Reino Unido con la patente obtenida por Joseph Bramah en 1797, con la finalidad de producir tubos de plomo (el metal se encontraba en estado semilíquido), sin embargo, su aplicación industrial inicia en 1820 cuando Thomas Burr construye la primera prensa hidráulica, no obstante, habría que esperar hasta fines del siglo XIX (Alexander Dick, 1894) cuando el proceso se empieza a utilizar para aleaciones de cobre y de aluminio. Desde entonces, se ha aumentado la capacidad de la carga de las prensas, modificando sus características constructivas, a la vez de mejorar los diseños de los dados y su respectivo montaje.

En la actualidad, las prensas de extrusión son generalmente de accionamiento hidráulico y se pueden clasificar en verticales y horizontales, ya que dependen de la dirección de viaje del ariete. Las más comunes son estas últimas. Las prensas horizontales son las más usadas en la producción comercial de perfiles y barras; se construyen regularmente con capacidades que van de 1500 a 5000 toneladas, aunque existen en operación hasta de 14000 toneladas. El diámetro del lingote está relacionado con la capacidad del equipo; por ejemplo, para extruir un lingote de cobre de unos 25 cm de diámetro se requiere una prensa de 1000 a 1500 toneladas, mientras que para uno de 58 cm de diámetro por 1 m de longitud, será necesaria una de 5000 toneladas.

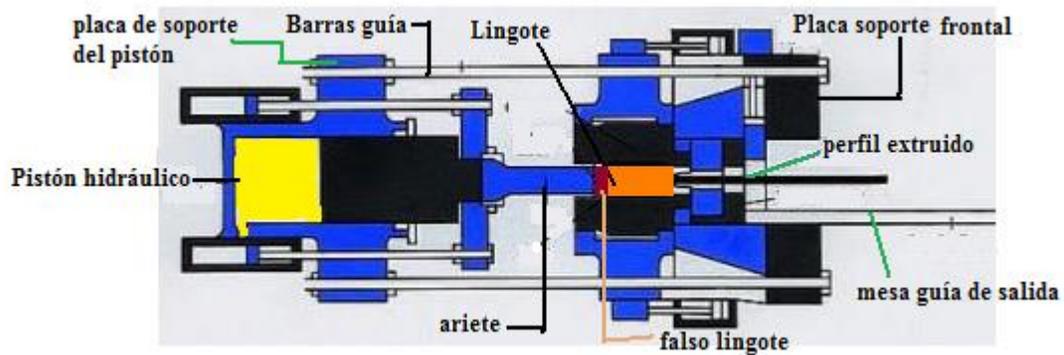
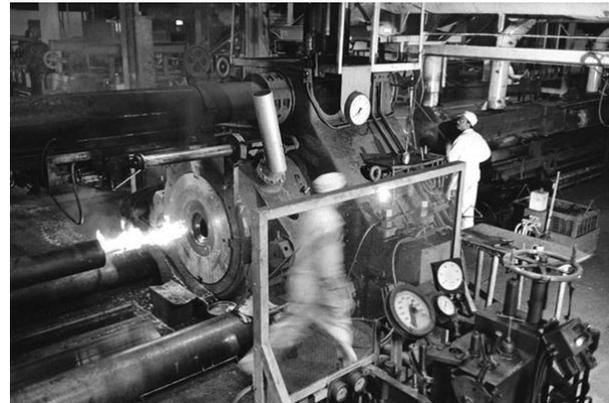
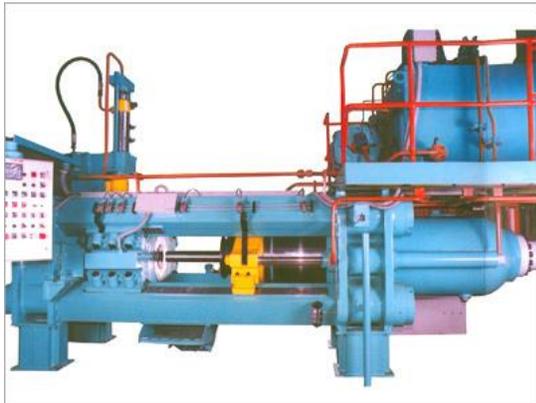


FIGURA 8.8 Prensas de extrusión horizontal y detalle de perfil extruido.

La velocidad del ariete estará determinada en función del material que se pretenda extruir. Aleaciones de alto punto de fusión (aceros y aleaciones refractarias) requieren velocidades del orden de 25 a 40 m/min para evitar así problemas por la transferencia de calor del lingote al herramental. Por otra parte, para materiales como el aluminio son necesarios desplazamientos del pistón de hasta 0.1 m/min.

Elementos fundamentales de la prensa de extrusión

Los elementos básicos de cualquier prensa de extrusión (figura 8.9) son: el cabezal fijo, contenedor o cámara de compresión, dado con sus elementos de soporte, pistón con ariete para ejercer la presión sobre el lingote, sistema hidráulico con sus bombas y acumuladores, y el sistema de control. Desde el punto de vista de la deformación, el dado es la pieza más importante, este es sometido a grandes cargas de compresión, así como a desgaste, choque térmico y oxidación. Su precisión y acabado son determinantes en la calidad dimensional del producto fabricado.

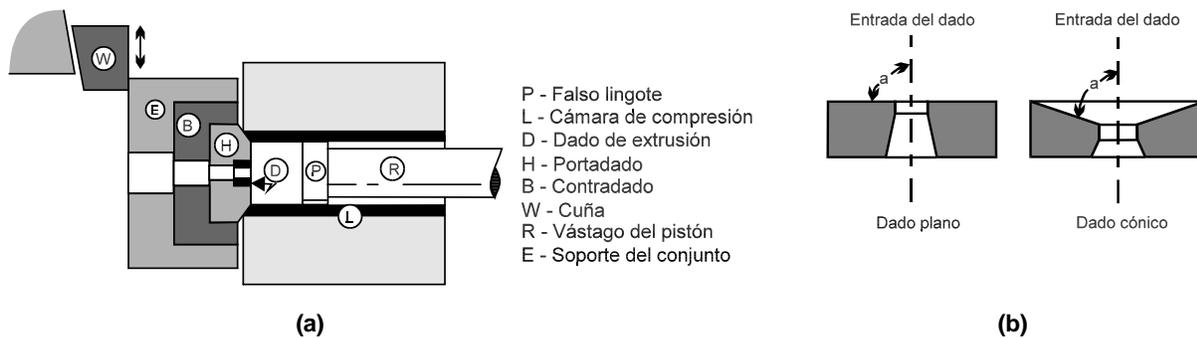


FIGURA 8.9 a) Construcción típica de una prensa de extrusión. b) Dados típicos de extrusión



FIGURA 8.10 Dados para extrusión

Por su forma, las matrices se pueden clasificar en planas, en las que el semiángulo de entrada es de 90°. El metal al fluir a través del dado forma una zona muerta, dando lugar así a su propio ángulo de entrada.

Dados con entrada cónica: En general, este tipo de boquillas se emplea cuando se dispone de una buena lubricación. Al reducir el ángulo de entrada se logra una mayor homogeneidad en la

deformación, además de que se reduce la presión de extrusión. Existe un límite en el semiángulo de entrada para el cual se incrementa la fricción en la superficie del dado, es por esto que normalmente dicho ángulo varía entre los 45° y 60° .

PISTÓN CON ARIETE. Es el encargado de transmitir la carga necesaria para hacer fluir el lingote a través del dado, su diámetro debe ser menor que el del contenedor con el fin de que no exista fricción entre estos. Para evitar notorias pérdidas de presión al deformar el lingote sobre el propio ariete, la carga se transmite mediante un disco o cojín denominado falso lingote, cuyo diámetro es de unos milímetros menor que el contenedor, lo que permite la formación de una calavera o cáscara (figura 8.11), evitando con esto que partes de la superficie original del lingote sean extruidas.

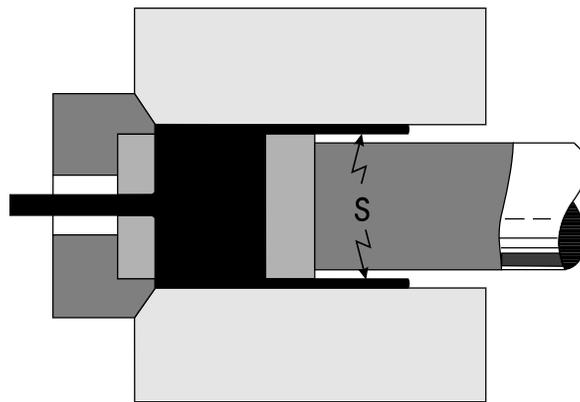


FIGURA 8.11 Formación de una calavera (S) durante la extrusión

Como en la extrusión, el flujo del material a través de la boquilla no es homogéneo, se concentran los defectos al final del ciclo, por lo que es práctica común extruir el lingote hasta un máximo de 85 a 95% de su longitud original.

Aplicaciones del proceso

El proceso se emplea actualmente en la producción de una gran variedad de perfiles en metales muy diversos. Lo mismo se producen perfiles de formas intrincadas, que tubos o barras, tal como se puede apreciar en la figura 8.1. Quizá la aplicación más conocida es en los diversos perfiles de aluminio, los que son empleados en ventanería, decoración, etc. , los elementos estructurales de un aeroplano son también fabricados por este método, así como tubos sin costura de aleaciones de cobre y aluminio, perfiles cuadrados, hexagonales, redondos y elípticos de latón.

8.4 CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES EN EL PROCESO DE EXTRUSIÓN

METALES Y ALEACIONES COMÚNMENTE EXTRUIDOS. Aun cuando el proceso se desarrolló inicialmente para metales blandos, a la fecha se producen perfiles extruidos de plomo, estaño y aleaciones, magnesio, algunos tipos de bronce, latones y aleaciones de zinc y níquel, así como de aluminio, que son las más comunes. Por otra parte, también se extruyen con alguna frecuencia aceros al carbono y aceros inoxidable y, en mucha menor proporción, metales como zirconio, titanio, molibdeno y talio.

TEMPERATURAS DE EXTRUSIÓN. El proceso de extrusión se efectúa, normalmente, en caliente. La temperatura a la que se calienta el lingote antes de ser colocado en la cámara dependerá del material a procesar, aun cuando se puede considerar que es del orden de $2/3$ de la temperatura de fusión en Kelvin.



FIGURA 8.12 Piezas ya maquinadas, las cuales fueron formadas inicialmente por extrusión en frío

VELOCIDADES DE EXTRUSIÓN. No existe un método teórico mediante el cual se puede determinar la velocidad de extrusión, de manera cuando menos aproximada, razón por la que esta se definirá por prueba y error para cada aleación. Su límite inferior está determinado por el enfriamiento que sufre el lingote, ya que a velocidades muy reducidas se tiene como resultado la imposibilidad de continuar el proceso después de cierto tiempo; por otra parte, la velocidad no puede ser incrementada indiscriminadamente, ya que el material tiende a presentar ralladuras, provocando entonces su rechazo. En general, mayores velocidades de extrusión dan lugar a incrementos en la presión requerida y, por lo tanto, en la carga y potencia desarrollada por el

equipo. Un aumento del orden de 1000% provocará un incremento en la presión de aproximadamente 50%.

En caso de extruir materiales de alto punto de fusión, como los aceros y aleaciones de níquel, las velocidades de extrusión necesarias son aún superiores a los 30 m/min, así se evitan daños en el herramental y equipo por las altas temperaturas involucradas. Se tiene entonces que la velocidad de extrusión está determinada por el material que se va a procesar y por las características del equipo empleado.

Características del flujo del material durante el proceso

Para obtener la máxima eficiencia del proceso, es necesario tener plena conciencia de los fenómenos que se ven involucrados en él. Por tal motivo, muchos de los trabajos de investigación se han desarrollado con la finalidad de conocer las características de flujo de un lingote metálico durante el proceso de extrusión. Uno de los investigadores que más aportó en este campo fue Pearson (1944), quien a principios de la década de los cuarentas publicó por primera ocasión su obra. El problema más grave que presentan estos estudios es que el patrón de flujo del material varía con el tiempo durante el ciclo. Pearson obtuvo un gran volumen de información al extruir lingotes cilíndricos de estaño previamente seccionados en los que se inscribía un patrón o red de alambre; a través de la distorsión de dicha red se determina entonces el valor de la deformación. De los experimentos realizados, se identificaron tres patrones de deformación, cuya diferencia se atribuyó a la fricción entre el lingote y la cámara.

El tipo A (figura 8.13) se presenta cuando no existe fricción entre el contenedor y el material, por lo tanto, es típico de extrusión invertida. En este caso, las líneas perpendiculares a las del flujo sufren distorsión solo hasta que se encuentran en la cercanía del dado; una vez en la vecindad de este, la superficie del lingote se deforma y la región central fluye rápidamente.

El tipo B se caracteriza por la presencia de una componente de fricción de limitada influencia.

El tipo C muestra el patrón de flujo cuando existe fricción sin deslizamiento entre el lingote y el contenedor. En este caso, se forma una zona muerta a partir de la placa de apoyo del contenedor y se extiende hasta el extremo opuesto del lingote. El flujo ocurre por cortante a lo largo del plano por debajo de la superficie del lingote. Este patrón es típico de la extrusión directa de metales, como el aluminio y el cobre.

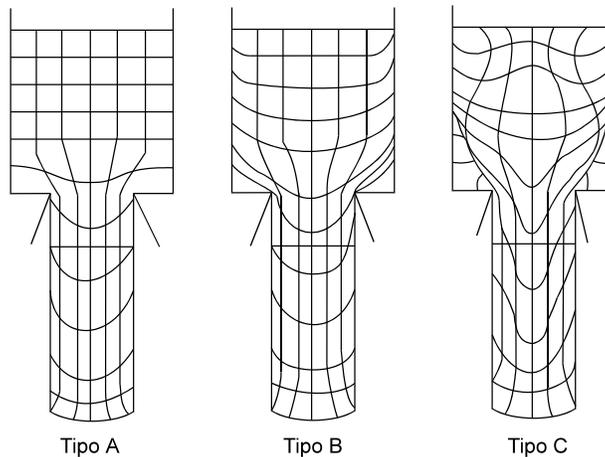


FIGURA 8.13 Patrones de flujo durante el proceso de extrusión

FRICCIÓN Y LUBRICACIÓN. La carga requerida para procesar un producto dado mediante extrusión está determinada por la fricción, la cual, dependiendo del tipo de proceso, se presenta entre el contenedor y el lingote al fluir el material a través del dado (extrusión directa) o solamente en el dado, en el caso de la extrusión indirecta. Aun cuando el empleo de lubricantes redundaría en una disminución de la carga, en general, estos no son utilizados debido a las dificultades para dosificarlos adecuadamente. Las aleaciones de aluminio y los metales suaves ejemplifican el caso en el que no se requiere lubricación.

Defectos en productos extruidos

Existe una gran diversidad de imperfecciones que pueden presentar los perfiles extruidos. A la más conocida se le denomina “defecto de extrusión”. Existen también problemas por la heterogeneidad del producto, agrietamiento, ampollas y rayas. Estos defectos pueden tener su origen en el lingote, en imperfecciones del herramental o en las condiciones del proceso.

Defecto de extrusión. Se caracteriza por la presencia de discontinuidades internas provenientes de las zonas superficiales del lingote, cuando están sucias u oxidadas. Por la forma en que se presenta el flujo del material (figura 8.14), una vez que se ha extruido aproximadamente 2/3 del lingote, su superficie forma la zona interior del perfil. Para evitar lo anterior, será necesario descartar el 30% del lingote, lo cual es antieconómico, o bien emplear un cojín de apoyo (falso lingote) de diámetro inferior a la cámara, con su auxilio se forma una cáscara o calavera mediante la cual se elimina la superficie oxidada o sucia (figura 8.11).

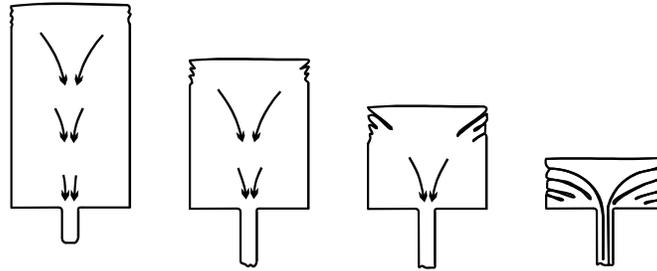


FIGURA 8.14 Formación del defecto de extrusión

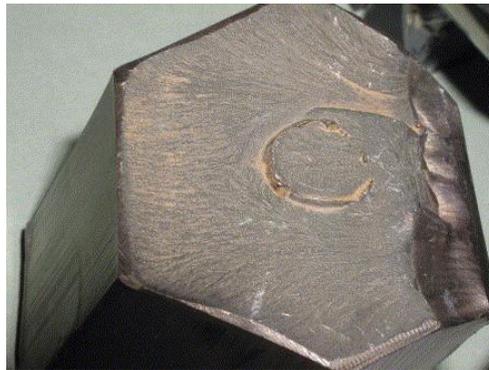


FIGURA 8.15 Defecto de extrusión en una barra hexagonal. Resulta evidente la presencia de una discontinuidad en el centro de la barra¹

Heterogeneidad. Se debe a las diversas condiciones que presenta el lingote durante el proceso. Lo anterior se refleja en variación del tamaño de grano a lo largo del eje de la barra. Dicha problemática presenta diversos orígenes, entre los que se pueden mencionar el diseño del dado y la velocidad de extrusión.

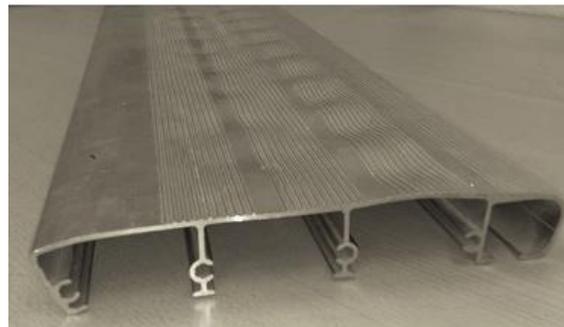


FIGURA 8.16 Defecto producto de un flujo no homogéneo a través del dado [ALKO Engineering]

¹ *Failure of components and products by 'engineered-in' defects: Case studies*, Engineering Failure Analysis. Volumen 12 Issue 6, p. 1000-1026. Diciembre, 2005.

Grietas. El agrietamiento o resquebrajamiento transversal de la sección extruida se presenta en extrusión directa fundamentalmente. Son causadas normalmente por temperaturas demasiado elevadas (cercanas a las de fusión incipiente), aunque también se puede tener el mismo efecto por una velocidad excesiva y altos coeficientes de fricción, lo que se traduce entonces en un incremento de la temperatura del lingote. Estas fallas pueden no ser aparentes, manifestándose ya en servicio o al efectuar algún tratamiento térmico al material.

Rayas. Se pueden deber a un mal acabado del dado, a lubricación inadecuada o a una excesiva velocidad del proceso. Se caracterizan por ser paralelas a la dirección de extrusión.

Ampollas. Son aquellas sopladuras que aparecen en el perfil y cuyo origen está en los gases adquiridos por el metal en su proceso de fusión, o también en las grasas presentes en el contenedor o en la misma superficie del lingote. Los paros del equipo se manifiestan en forma de depresiones periféricas ligeras y estrechas, perpendiculares al eje de extrusión.

Agrietamiento de Chevrón. Este defecto (figura 8.17), con aspecto de espinazo de pescado, se presenta con bajos cocientes de extrusión. Se ha demostrado que se relaciona con la variación de las condiciones de fricción en la zona de deformación en el dado.

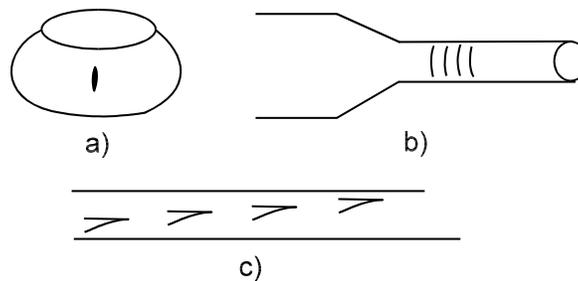


FIGURA 8.17 Ejemplos de grietas en proceso de deformación plástica: **a)** Grietas superficiales producidas por excesiva deformación. **b)** Grietas superficiales debidas a una excesiva fricción en el dado en proceso de extrusión. **c)** Grietas tipo espinazo de pescado en estirado de barras

8.5 EXTRUSIÓN DE TUBOS

La manufactura de los tubos es una rama importante de los procesos de extrusión. Su campo de aplicación se encuentra en las aleaciones no ferrosas, fundamentalmente en las de aluminio y cobre.

El ajuste del diámetro interior del tubo se puede hacer mediante un mandril que pase axialmente por el lingote, de tal forma que su punta coincida con la abertura del dado. Existen tres clases de arreglos de mandril que se pueden usar: el clavado fijo, el clavado flotante y el perforado o con pistones concéntricos.

En el primero y segundo es necesario partir de un lingote hueco, el barreno puede ser producido por maquinado o venir así del vaciado. La producción de estos lingotes es ciertamente costosa, además de que la superficie del barreno está normalmente oxidada (durante el calentamiento) y/o sucia, lo que se traduce en defectos en el tubo (figura 8.18).

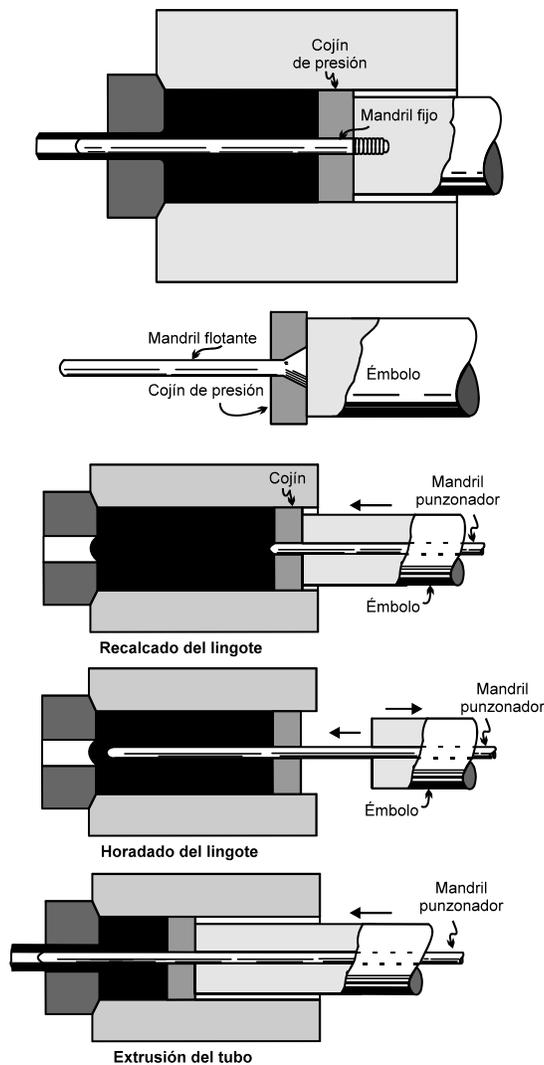


FIGURA 8.18 Tipos de mandriles utilizados en la producción de perfiles huecos

El empleo de un mandril flotante garantiza, en general, una mejor concentricidad, ya que si la barra ha sido perforada con exactitud, el mandril se centrará a sí mismo. Por este método se pueden obtener concentricidades con una variación del 1%.

Desde la década de los ochenta, se desarrolló un sistema de doble dado, en el que un elemento de pequeña longitud, montado en la propia matriz, hace las veces de mandril.



FIGURA 8.19 Tubos extruidos de acero inoxidable

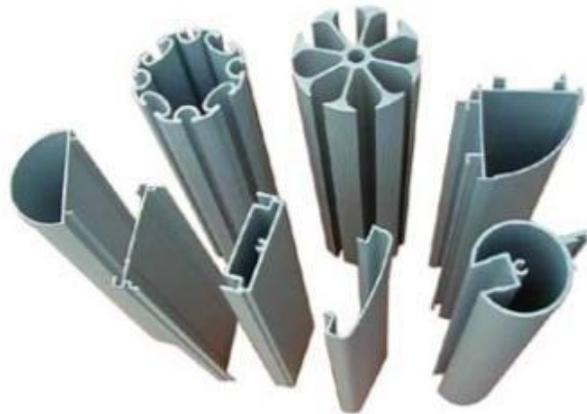


FIGURA 8.20 Perfiles huecos de aluminio producidos por extrusión [Zhanei-Cooper Company]

Uno de los dados que conforman este sistema tiene una serie de alimentaciones distribuidas en forma equidistante. A través de dicha pieza se forma un número igual de elementos sólidos, que inmediatamente son comprimidos y mezclados; sueldan estos entonces por temperatura y presión,

forman así un flujo unitario alrededor del mandril. El diámetro exterior del tubo se ajusta por el segundo dado de sección anular. La aplicación de este proceso queda restringida fundamentalmente a los metales y aleaciones que se pueden soldar por temperatura y presión sin grandes inconvenientes, razón por lo que se usa en aleaciones de aluminio. Además de la simplicidad, el proceso permite obtener secciones de gran longitud con exactitud de forma y dimensiones; puede ser utilizado en la fabricación de perfiles complicados de sección hueca, como los cambiadores de calor, que en ocasiones presentan aletas externas e internas.

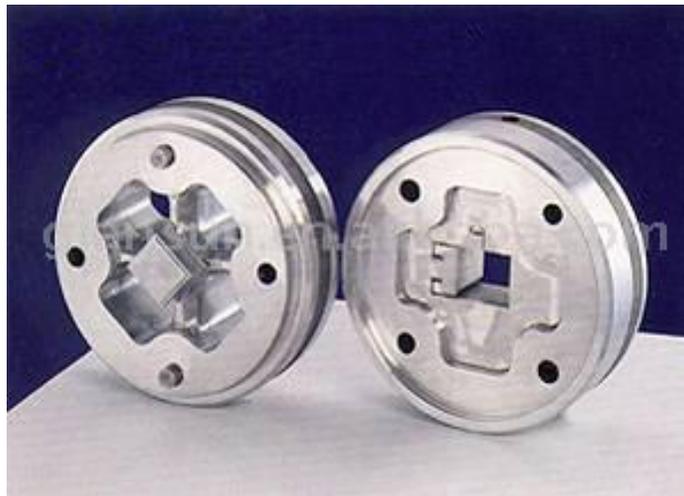


FIGURA 8.21 Dado en dos etapas para la producción de perfiles extruidos huecos

8.6 ANÁLISIS DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN

El proceso de extrusión se caracteriza por grandes deformaciones, en este caso el porcentaje de deformación es un parámetro poco descriptivo, por lo que se define entonces el cociente de extrusión (R):

$$R = \frac{\text{Sección transversal del lingote}}{\text{Sección transversal extruida}} = \frac{A_0}{A_f} \quad (8.1)$$

Mediante este parámetro, se establecen las características del proceso. En la práctica, generalmente, R toma valores entre 10 y 60, aunque normalmente es mayor de 12, ya que valores menores de 10 heredan estructuras de fundición. En el caso de extrusión en caliente, se ha llegado a valores extremos de la relación de extrusión hasta de 40 en aceros y de 400 en aluminio.

Otro parámetro relacionado es la reducción fraccional de área (r) :

$$r = 1 - \frac{A_f}{A_0} \quad (8.2)$$

Se tiene entonces que:

$$R = \frac{1}{1-r} \quad (8.3)$$

En el proceso de deformación plástica no se presentan cambios volumétricos en el material, razón por la que:

$$\dot{V}_0 = \dot{V}_f \quad (8.4)$$

donde

\dot{V}_0 = Gasto volumétrico a la entrada

\dot{V}_f = Gasto volumétrico a la salida

Es entonces que

$$v_e = v_p R \quad (8.5)$$

donde

v_e = Velocidad del producto extruido

v_p = Velocidad de desplazamiento del pistón

Para seleccionar el equipo que se va a emplear en un proceso de extrusión, es necesario determinar la carga requerida (P) :

$$P = p_e A_0 \quad (8.6)$$

Donde el verdadero problema lo representa el cálculo de la presión de extrusión p_e .

En principio, este se puede considerar como:

$$p_e = Q_e \bar{\sigma}_0 \quad (8.7)$$

donde

$\bar{\sigma}_0$ = Esfuerzo de cedencia promedio

Q_e = Factor de extrusión > 1

Sin un análisis más detallado, en la literatura se presenta una relación empírica de la siguiente forma:

$$Q_e = 0.8 + 1.2 \text{Ln} R \quad (8.8)$$

CÁLCULO DE LA PRESIÓN DE EXTRUSIÓN. Para obtener una primera aproximación, se considera únicamente el trabajo de deformación del lingote

$$dW = \sigma_0 V d\varepsilon$$

$$d\varepsilon = \frac{dA}{A}$$

$$dW = \frac{\sigma_0 V dA}{A}$$

El trabajo desarrollado por el pistón es

$$dW = p dV$$

Integrando e igualando, donde el volumen desplazado por el pistón es igual al extruido, entonces:

$$pV = \sigma_0 V \text{Ln} R$$

Por lo que

$$p = \sigma_0 \text{Ln} R \quad (8.9)$$

La presión evaluada en la ecuación 8.9 es la que se necesita aplicar teóricamente al lingote para deformarlo. No se toman en cuenta los efectos de la fricción y del trabajo redundante, en atención a dichas condiciones se le puede adicionar un factor α mayor que la unidad, por lo tanto, queda:

$$p_e = \alpha \sigma_0 \text{Ln} R \quad (8.10)$$

El desarrollo anterior no considera varios de los efectos que se producen durante el proceso, por lo que es conveniente elaborar un análisis que considere la fricción. En el caso de extrusión directa, se presenta la fricción entre el contenedor y el lingote, y entre el material y el dado.

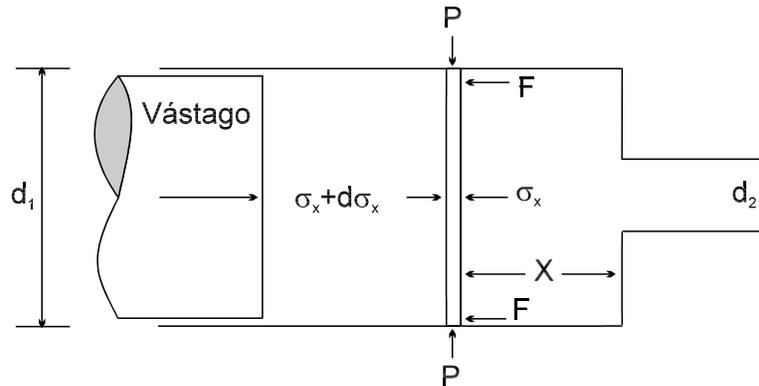


FIGURA 8.22 Equilibrio de cargas durante el proceso de extrusión

De acuerdo con la figura 8.22, se va a extruir un lingote de área A_0 y de longitud l_0 de un material con esfuerzo de cedencia σ_0 , se toma un elemento de ancho dx y se considera el equilibrio en la dirección de extrusión:

$$\sum f_x = 0$$

$$(\sigma_x + d\sigma_x)A_0 - \sigma_x A_0 - f_f = 0$$

La fuerza de fricción f_f es

$$f_f = \mu P$$

donde

$$P = p\phi\pi dx \tag{8.11}$$

De lo anterior, se desarrolla la ecuación diferencial que describe el fenómeno:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} - \frac{4\mu p}{\phi} = 0$$

La condición de cedencia está dada por:

$$\sigma_x - p = \sigma_0$$

se tiene entonces:

$$\frac{d\sigma_x}{\sigma_x - \sigma_0} = \frac{4\mu dx}{\phi}$$

Resolviendo, a partir de considerar que la presión mínima de extrusión es igual al esfuerzo mínimo de cedencia

$$\sigma_e = \sigma_0 \exp\left(\frac{4\mu l}{\phi}\right) \quad (8.12)$$

Por otra parte, si se parte de la carga mínima de deformación, la ecuación se expresa como:

$$\sigma_e = \sigma_0 \text{Ln}R \exp\left(\frac{4\mu l}{\phi}\right) \quad (8.13)$$

Considerando una expansión en series:

$$e^x = 1 + x + x^2 / 2! + \dots + x^n / n!$$

cuando $x \ll 1$

Por lo tanto,

$$\sigma_x = \sigma_0 (1 + 4\mu l / \phi) \quad (8.14)$$

Aun cuando la ecuación 8.12 considera el efecto de la fricción, no se toma en cuenta el trabajo redundante. En la extrusión, la deformación no es homogénea, por esto, investigadores tales como Zhokolobov han propuesto la siguiente expresión:

$$\sigma_x = \sigma_0 ((l + \text{Ln}R) \exp(4\mu l / \phi) - 1) \quad (8.15)$$

Para determinar la pérdida del material al pasar a través del dado, se ha propuesto, por analogía con estirado, la siguiente expresión:

$$p_d = \sigma_0 \frac{1+B}{B} \left[1 - \left(\frac{1}{R}\right)^B \right] \quad (8.16)$$

en donde

$$B = \mu \cot \alpha$$

α – Semiángulo de la entrada

En el caso de dados planos ($2\alpha = 180^\circ$), Kudo propuso la siguiente expresión:

$$p_d = \sigma_0 (1.06 + 1.55 \text{Ln} R) \quad (8.17)$$

Se considera que el ancho del material b es tal, que se considera deformación plana, por lo que este parámetro es constante durante el proceso.

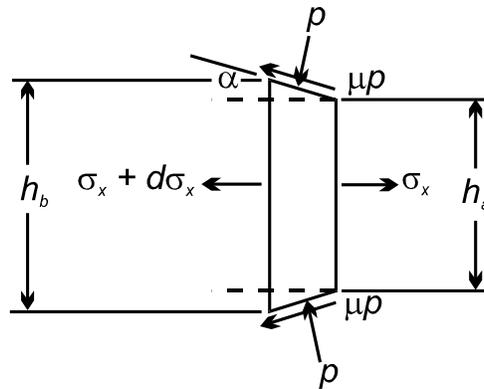


FIGURA 8.24 Análisis de las fuerzas al fluir el material

$$\sum f_x = 0$$

$$(\sigma_x + d\sigma_x)(A + dA) - \sigma_x A - \frac{2pb \operatorname{sen} \alpha}{\cos \alpha} dx - \frac{2b\mu p \cos \alpha}{\cos \alpha} dx = 0$$

$$A = hb$$

$$dA = bdh$$

$$dx = dh / 2 \tan \alpha$$

Si se hace un cambio de variable, de tal forma que $B = \mu \cot \alpha$ y se eliminan los productos de más de una diferencial, se tiene entonces que:

$$b\sigma_x dh + bhd\sigma_x - p(1 + B)bdh = 0$$

De la condición de fluencia:

$$\sigma_x - p = \sigma_0$$

$$p = \sigma_x - \sigma_0$$

$$\frac{d\sigma_x}{B\sigma_x - (1 + B)\sigma_0} = \frac{dh}{h} \quad (8.18)$$

Integrando la ecuación (8.18)

$$\frac{1}{B} \int \frac{du}{u} = \int \frac{dh}{h}$$

$$u = \sigma_x - \left[\frac{1+B}{B} \right] \sigma_0$$

$$du = d\sigma_x$$

$$\frac{1}{B} \text{Ln} \left[\sigma_x - \left[\frac{1+B}{B} \right] \sigma_0 \right]_{\sigma_0}^{p_d} = \text{Ln} h \Big|_{h_0}^{h_f}$$

Reordenando y simplificando se obtiene, finalmente

$$p_d = \left[\frac{1+B}{B} \right] \sigma_0 \left[1 - \left[\frac{h_f}{h_0} \right]^B \right]$$

En general, en extrusión directa se emplean ecuaciones de la forma:

$$p_e = \sigma_0 \left(a + b \text{Ln} R \right) \exp \left[\frac{4\mu}{\phi} l \right]$$

Donde el término exponencial representa la pérdida de carga por fricción en la cámara; el logaritmo, el trabajo de deformación; y los términos a, b describen la pérdida a través del dado p_d y el trabajo redundante ($p_{wr} < p_\varepsilon$). Es conveniente recordar que el trabajo redundante se puede considerar como una fracción del trabajo de deformación, por lo que el término ($b > 1$), ya que representa el efecto de la suma del trabajo de deformación con el trabajo redundante. Por consecuencia ($a \approx 0.4, b \approx 1.2$).

8.7 TENDENCIAS A FUTURO EN LA EXTRUSIÓN DE METALES

De lo antes expuesto, resulta evidente que, si bien los procesos de extrusión pueden ser aplicados a muy diversos metales y aleaciones, uno de sus principales nichos resulta de su aplicación en aleaciones ligeras, principalmente base aluminio. Por otra parte, existe una gran variedad de

aplicaciones que van desde las industrias aeronáutica a la automotriz, en donde la relación resistencia/peso se trata de maximizar. En cuanto a la huella de carbono de los distintos procesos, resulta por demás evidente la conveniencia de emplear menores temperaturas para el procesamiento de metales y aleaciones, situación en donde el reciclado de aleaciones ferrosas y no ferrosas resulta en un menor efecto negativo al ambiente. Todo lo antes explicado, se traduce en un constante incremento en el uso de aleaciones ligeras y, por consecuencia, en la aplicación de perfiles extruidos de las mismas. El análisis de "Technavio's Market Research" predice un incremento del orden de 6 a 7% anual en los productos de aluminio extruido, primordialmente por la necesidad de la industria automotriz de reducir el peso de los vehículos; además, no solo esta industria sino también la de la construcción, la electrónica y de telecomunicaciones (elementos disipadores de calor y elementos estructurales), la de energía solar (elementos estructurales) han incrementado, y seguirán haciéndolo, su demanda de perfiles extruidos de aluminio. Como en la mayoría de los casos, la demanda de China será la que oriente el mercado, calculándose que para 2020 represente el 59% del mercado, con una participación creciente en producción y consumo por parte de la India.

CAPÍTULO 9

TRABAJO EN FRÍO DE LOS METALES

9.1 GENERALIDADES

Algunas piezas metálicas producidas por deformación plástica son llevadas a su forma final por trabajo en caliente; en general, estos métodos representan procesos de formado primario. Los procesos del trabajo en frío involucran en su mayoría métodos para producir partes que, posteriormente, se integrarán a una pieza terminada. Por lo anterior, se les denomina como operaciones secundarias o de fabricación. Debido al incremento de la ductibilidad, inherente a la disminución de la temperatura, estos procesos no solo se podrán efectuar por cargas de compresión, como en las operaciones de trabajo en caliente, sino también por compresión indirecta, tracción biaxial, corte y dobléz.

Cuando el proceso demanda grandes porcentajes de deformación es necesario considerar recocidos intermedios como, por ejemplo, en la fabricación de chapas delgadas o alambres de diámetros pequeños.

El trabajo de la chapa metálica merece mención aparte, ya que estos procesos son comúnmente utilizados para la fabricación de una gran cantidad de objetos, como la carrocería de un automóvil, gabinetes para aparatos electrodomésticos (estufa, refrigerador, lavadora), perfiles producidos a partir de cintas de metal, mobiliario de oficina, etc. Para dar una idea de lo anterior, se tiene que un 30% del acero producido se utiliza en forma de láminas o placas; además, es conveniente recordar que no únicamente la hoja de acero se emplea para los fines antes mencionados. Una de las variables de análisis para determinar el grado de desarrollo de un país es la relación del consumo de perfiles estructurales con respecto al consumo de chapa metálica; cuando este cociente es mayor de la unidad representa que el país se encuentra en una etapa de desarrollo de infraestructura, mientras que si el consumo es dominante en chapa metálica, se trata de una estructura industrial manufacturera orientada a la producción de elementos de consumo.

Características de los procesos de trabajo en frío

Los procesos de trabajo en frío se caracterizan por:

- a) Mejor acabado superficial
- b) Tolerancias dimensionales más estrechas
- c) Cambio en las propiedades físicas (se pueden ajustar las propiedades mecánicas de acuerdo con las necesidades del producto)
- d) Mayor capacidad para ser deformados por cargas de tracción
- e) Mayor consumo de energía para la deformación
- f) Anisotropía
- g) Necesidad de recocidos intermedios, en el caso de grandes porcentajes de deformación

Después de la etapa en caliente el material deberá decaparse, esto es, limpiar la superficie mediante la eliminación de la capa de óxido, antes de proceder a su deformación, ya que dichas escamas limitarán la vida del herramental y producirán efectos muy negativos en el acabado y tolerancias de las piezas producidas.

Clasificación de los procesos efectuados en frío

Una forma de agrupar los procesos en frío es de acuerdo con la operación realizada; esto es:

TABLA 9.1 Clasificación de los procesos en frío

Estirado	Compresión	Doblez	Corte o desprendimiento	Procesos de aplicación particular
Barras	Acuñado	Doblado	Troquelado	Formados por alta energía
Tubos	Laminado	Rolado	Punzonado	Formado superplástico
Alambre	Calibrado	Doblado de placa	Corte de cinta o hendido	
Rechazado	Forja en frío	Rebordeado	Recorte	
Rechazado de potencia	Formado de roscas	Engargolado	Perforado	
Embutido con planchado	Extrusión	Formado con rodillos	Escopleado	
	Remachado		Ranurado	
			Lancetado	
			Rasurado	
			Corte con cizalla	

9.2 ESTIRADO DE ALAMBRE Y TUBO

Los procesos de estirado están comprendidos dentro de los de compresión indirecta ya que, aunque la carga aplicada para la deformación es de tracción, esta provoca esfuerzos de compresión, que son en sí los responsables de la deformación.

En alguna época, entre los siglos VI y X, los venecianos produjeron alambre de materiales suaves al obligar a la materia prima a pasar por orificios de diámetro menor al de ella; dicha operación se efectuaba a mano, por lo que su aplicación fue limitada. Se continuó la producción de "alambre" por el método tradicional en la época, que era mediante el corte de cintas angostas a partir de hojas previamente martilladas.



FIGURA 9.1 Banco manual para estirado de alambre a principios del siglo XIX

Estirado de alambre

La secuencia de fabricación es:

Laminado en caliente → decapado → trefilado

Alambrón

(recocidos intermedios)

En este método, la sección del material se reduce jalándola a través de un dado producido, generalmente, de carburo de tungsteno (figura 9.2). El material es ahusado en un extremo, de tal

manera que pueda pasar a través del orificio del dado para así sujetarlo con una mordaza y proceder a la operación (figura 9.2).

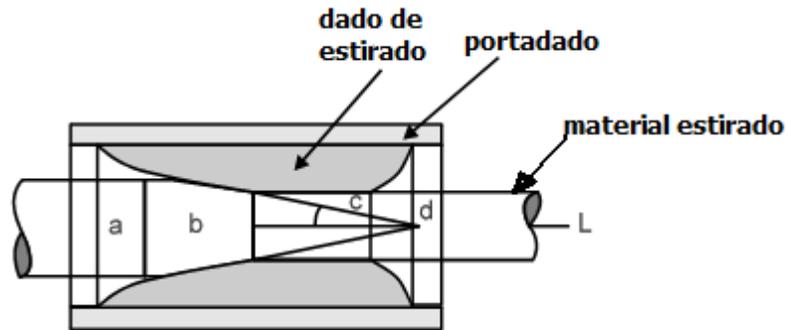


FIGURA 9.2 Dado de estirado

Al equipo utilizado se le conoce como banco de estirado. La operación puede ser intermitente, esto es, cuando se termina la reducción de todo el rollo de material, se pasa este a la siguiente etapa. Lo más usual es trabajar en serie o cascada, que es cuando el material pasa a través de varios dados de manera secuencial (figuras 9.3 y 9.4).

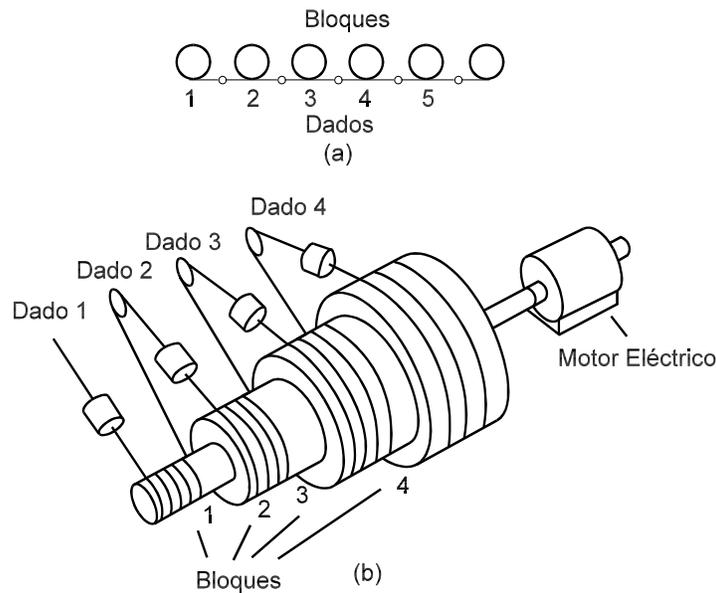


FIGURA 9.3 **a)** Banco de estirado accionado por varios motores, **b)** Banco de estirado en el cual varios de los pasos de reducción son accionados por un solo motor



FIGURA 9.4 Diferentes disposiciones para un banco de estirado (figura superior banco de estirado de 5 etapas, inferior, banco de estirado de 7 etapas)

Para lograr lo anterior, la velocidad de los tambores se deberá incrementar de acuerdo con la reducción sufrida por el material, lo cual se logra de las siguientes maneras:

Cada tambor de enrollado está accionado por un motor de CD, con un control de velocidad que permitirá ajustarla de acuerdo con la sincronía que se requiera. Dicho procedimiento es costoso, tanto en el caso de que se empleen motores de CD o de CA con variador de frecuencia, por tal motivo y con la finalidad de superar esta desventaja, se emplean máquinas accionadas por un solo

motor (figura 9.3b). Se tiene una serie de escalonamientos, cuyos diámetros están determinados por la velocidad periférica necesaria, la que a su vez se determina por la reducción efectuada.

En la práctica es casi imposible lograr la relación precisa del diámetro del escalonamiento con la reducción. Esto provocará entonces deslizamiento del material sobre el tambor y, por lo tanto, fricción, dando como resultado el calentamiento del material. Es conveniente entonces que los conos se encuentren inmersos en un baño de aceite. Independiente de dicho fenómeno, se genera una gran cantidad de calor al fluir el material a través del dado y ser la carga de estirado función del coeficiente de fricción; es conveniente entonces emplear recubrimientos para disminuir el rozamiento, y mejorar a la vez el acabado superficial del producto, en este caso se denomina al proceso como trefilado en seco. Cuando el dado se encuentra inmerso en el lubricante, el proceso se conoce como estirado en húmedo.

Para producir barras (diámetro mayor de 6 mm), se utilizan mesas o camas de estirado (figura 9.5) que pueden tener hasta más de 30 m de carrera; en este caso son posibles velocidades comprendidas entre los 10 y 30 m/min. Dichos equipos llegan a tener una capacidad aún mayor a las 130 toneladas de carga.



FIGURA 9.5 Mesa de estirado

Las máquinas de dados múltiples trabajan a velocidades mayores que las indicadas en el caso de estirado de barras, pueden ser de hasta 600 m/min en el caso de estirado de alambre de acero y de 2000 m/min para no ferrosos.

Dado de estirado

En el proceso de estirado, el elemento fundamental es el dado (figura 9.6). Consta de dos partes: el dado o boquilla de estirado, que se produce de carburo de tungsteno para dados grandes o de diamante para pequeños diámetros; y la cubierta o soporte, que se produce de acero y en el caso de dados pequeños también se puede fabricar de bronce. La sección transversal del dado se muestra en la figura 9.7.

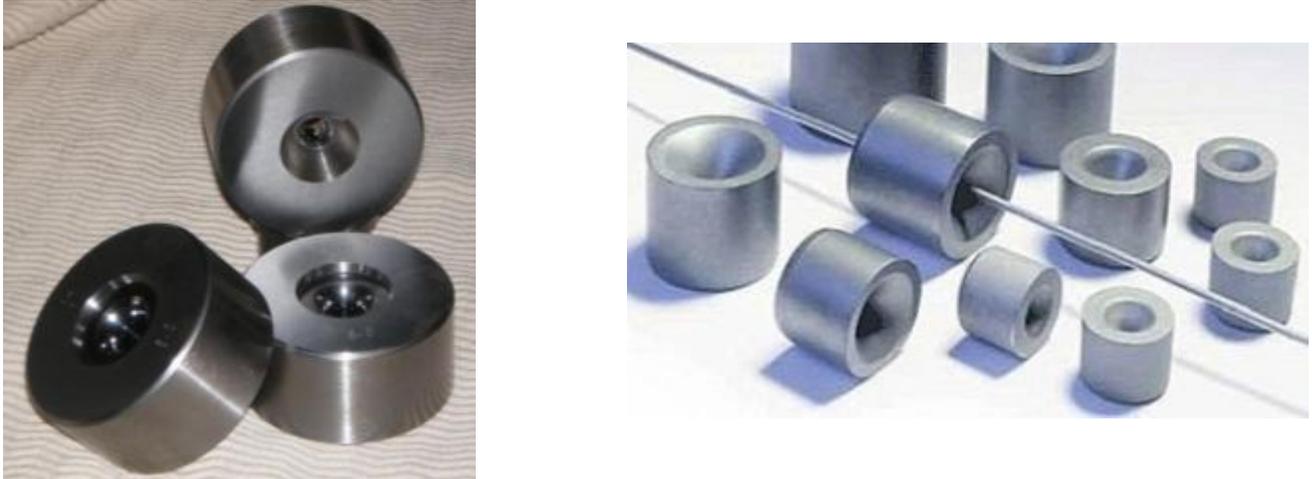


FIGURA 9.6 Dado con su buje de soporte (izquierda), diversos dados de carburo de tungsteno (derecha)

Las partes en que se puede dividir la sección del dado son:

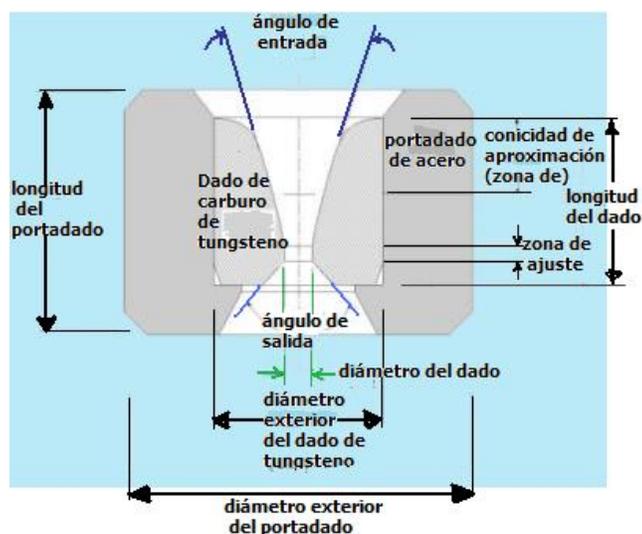


FIGURA 9.7 Dado de estirado (visto en sección transversal) se pueden observar las partes que lo componen así como sus diferentes secciones

CAMPANA O ENTRADA DEL DADO. Se diseña de tal forma que el material arrastre lubricante con él. Su forma propicia que la presión hidrostática se incremente, permitiendo así el flujo del lubricante.

CONO O ZONA DE APROXIMACIÓN. Su ángulo es determinante en la carga requerida para el proceso y será definido de acuerdo con las características del material. En esta zona, el metal choca contra su superficie y al ser arrastrado hacia la salida reduce su sección transversal.

ZONA DE DESLIZAMIENTO O DE AJUSTE DE LAS DIMENSIONES. En esta zona, el diámetro permanece constante y en realidad no hay reducción, pero sí produce una carga apreciable debida a la fricción. Su principal función es la de permitir reajustes del dado, ya que este sufre un apreciable desgaste; si la longitud de la zona fuera cero no se podría recalibrar el dado, ya que al hacerlo se perderían las dimensiones. Por tanto, la vida útil del dado está en función de la extensión de esta zona, por otra parte, si fuese demasiado extensa podría provocar la fractura del material por exceso de carga. En la práctica, su longitud es de aproximadamente $2/3$ del diámetro del dado.

SALIDA. Su conicidad permite la recuperación elástica del material, asimismo, reduce la posibilidad de desgaste cuando el dado está mal alineado.

El ángulo del dado, de acuerdo con lo que se indica en el inciso (c), es determinante en la carga requerida. El óptimo será aquel que minimice la energía necesaria para la deformación, la cual está determinada por tres componentes:

- a) Trabajo de deformación. Está definido por la deformación inherente al proceso.
- b) Carga de fricción. Depende del área de contacto y, por tanto, de la conicidad del dado. Un ángulo de entrada más pequeño significa un área de contacto mayor, considerando una reducción de referencia.
- c) Trabajo redundante. Es la energía extra necesaria para doblar primero en una dirección determinada las fibras del material y después regresarlas a la dirección de flujo. Es evidente que este término será mayor cuando el ángulo del dado se incremente.

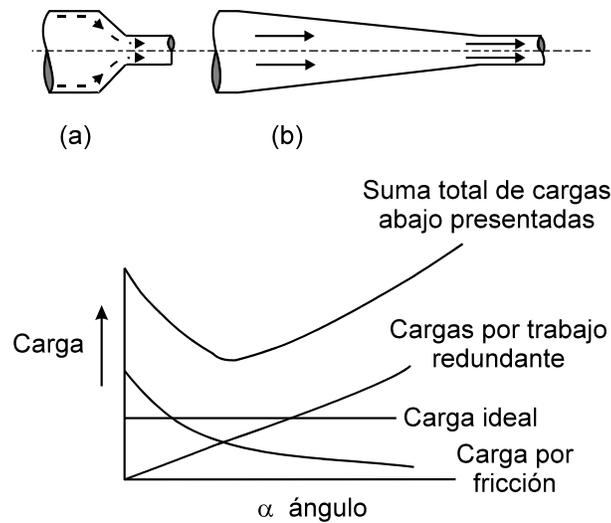


FIGURA 9.8 Efecto del ángulo del dado sobre la carga de estirado

El ángulo óptimo puede ser determinado a través de un análisis del límite superior. En general, se considera que a mayor resistencia del material, más pequeño es el ángulo óptimo.

TABLA 9.2 Ángulo óptimo de algunos materiales

Metal	Ángulo óptimo
Aluminio	24
Cobre	12
Acero	6

Defectos del material

Las fallas del producto pueden atribuirse básicamente a lo siguiente:

- a) Defectos del material de partida, como podrían ser grietas o fracturas.
- b) Limpieza inadecuada. El material está todavía recubierto con escamas de óxido que producen desgaste excesivo del dado y ralladuras sobre la pieza.
- c) Mal acabado del dado. Produce rayas longitudinales en el producto.

La fractura del material es un caso extremo en el que la carga de estirado supera la resistencia a la tracción del material. Para una reducción y conicidad fijas, esta posibilidad se incrementa con la fricción.

Análisis del proceso de estirado

El estirado de alambre, desde el punto de vista de su análisis, es uno de los procesos de conformado mecánico más simples. El método de análisis se puede ir variando de acuerdo con la complejidad y exactitud que se pretenda.

Presión de estirado considerando únicamente el trabajo de deformación:

$$\sigma_e = \sigma_0 \ln \left(\frac{A_0}{A_f} \right) \quad (9.1)$$

Este término no toma en cuenta ni la fricción ni tampoco el trabajo redundante.

Mediante el método del planchón, esto es con base en el principio de conservación de la cantidad de movimiento, se puede determinar la carga requerida para el estirado de una barra de sección circular (figura 9.9):

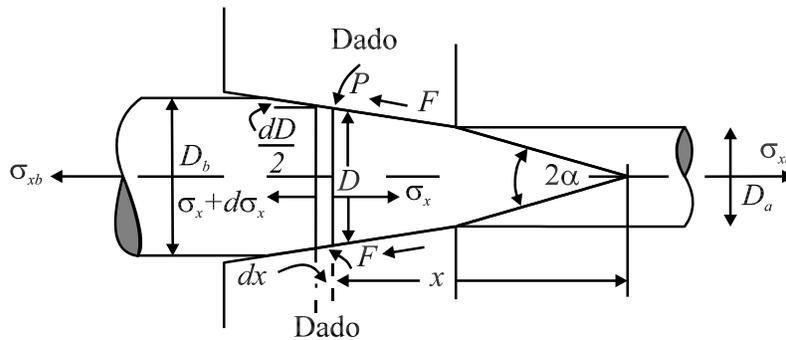


FIGURA 9.9 Esfuerzos generados durante el estirado

De dicho análisis se llega a:

$$\sigma_e = \sigma_0 \frac{1+B}{B} \left[1 - \left(\frac{A_f}{A_0} \right)^B \right] \quad (9.2)$$

Considerando un material de sección circular (alambre o barra)

$$\sigma_e = \sigma_0 \frac{1+B}{B} \left[1 - \left(\frac{D_f}{D_0} \right)^{2B} \right] \quad (9.3)$$

A partir de un análisis similar, J.G. Wistreich propuso:

$$\sigma_e = \bar{\sigma}_0 \operatorname{Ln} \left(\frac{A_0}{A_f} \right) (1+B) \quad (9.4)$$

En las ecuaciones anteriores no se tomó en cuenta para su deducción el trabajo redundante, este puede ser considerado a través de un factor f , de acuerdo con:

$$\phi = f(\alpha, r) = \frac{\varepsilon^*}{\varepsilon}$$

donde

ϕ = Factor de trabajo redundante

ε^* = Deformación redundante o excedente, esta es mayor a la que le corresponde a la del metal que ha sido homogéneamente deformado

Este factor se obtiene de la gráfica esfuerzo-deformación. Para esto se sobrepone la gráfica del material que ha sido estirado a la del material recocido (figura 9.8). Sobre esta se determina la deformación homogénea producida por el esfuerzo de cedencia que presenta el material estirado.

Un método alternativo para lo anterior consiste en un análisis a través del método del límite superior:

$$\sigma_e = \frac{\sigma_0 \left[2f(\alpha) \operatorname{Ln} \frac{R_0}{R_f} + \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\alpha}{\operatorname{sen}^2 \alpha} \right) \cot \alpha + 2\mu \left(\cot \alpha \left(1 - \operatorname{Ln} \frac{R_0}{R_f} \right) \frac{L}{R_f} \right) \right]}{1 + \frac{2\mu L}{R_f}} \quad (9.5)$$

donde

$f(\alpha)$ = Función del ángulo de entrada

L = Longitud de contacto del dado

R_0 = Radio del material de partida

R_f = Radio del alambre

Otra expresión menos complicada pero no menos válida, que se desarrolla por el mismo método es

$$\sigma_e = \sigma_0 \left[\left(1 + \frac{m}{\operatorname{sen} 2\alpha} \right) \operatorname{Ln} \frac{D_0}{D_f} + \frac{2}{3} \tan \alpha \right] \quad (9.6)$$

donde

$m =$ Factor de fricción

$\frac{2}{3} \tan \alpha =$ Representa el trabajo redundante

A partir del concepto de geometría de la zona de deformación, se puede también inferir acerca del trabajo redundante debido a que está íntimamente ligado con el coeficiente delta, que representa al cociente del espesor medio a la longitud de la zona de deformación.

Para el estirado de alambre, se tiene:

$$\Delta = \frac{\alpha}{r} (1 + \sqrt{1-r})^2 \quad (9.7)$$

donde

$\alpha =$ Semiángulo de entrada

$r =$ Reducción en el estirado

Para la mayoría de las operaciones de estirado, se emplean ángulos de 6° a 10° y reducciones dentro del rango del 20%; con estas condiciones, delta toma valores de 2 a 3. Mayores valores de dicho parámetro corresponderán a reducciones más pequeñas y ángulos mayores. Del análisis de datos experimentales se ha concluido que el factor de trabajo redundante (ϕ) está relacionado con el factor Δ en la forma

$$\phi = C_1 + C_2 \Delta \Rightarrow \phi \approx 0.8 + \frac{\Delta}{4.4} \quad (9.8)$$

El ángulo óptimo (ángulo al que corresponde con la mínima energía de estirado) se puede expresar a partir del valor de delta, según:

$$\Delta_{op} = 4.9 \left[\frac{\mu}{\text{Ln} \left(\frac{1}{1-r} \right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9.9)$$

Estirado de tubo

Los tubos sin costura son producidos en caliente mediante extrusión o por perforado de barras sólidas y, posteriormente, por estirado con rodillos. Con frecuencia son acabados por estirado en frío para mejorar sus propiedades mecánicas, garantizar mejores acabados y tolerancias más estrechas, y reducir el espesor de su pared o a la vez reducir su diámetro.

ETAPAS DEL PROCESO

Lingote de fundición → Formado del tubo → Decapado → Estirado de la barra hueca

(previamente formada por extrusión, o perforado y estirado)

Dependiendo del diámetro y de las características del producto, se podrá estirar por cuatro métodos: tres de ellos demandan el empleo de un punzón o mandril (figuras 9.10 y 9.11). Dichos procesos son:

Estirado sin mandril. Se utiliza para diámetros mayores de 6 mm, cuando no se requiere calibrar con precisión el diámetro interior. En este caso, los esfuerzos cortantes a la entrada y a la salida del dado son más intensos, la deformación redundante es mayor y como consecuencia las deformaciones por etapa necesariamente son más reducidas que en aquellos métodos que empleen un mandril.

Estirado con mandril fijo. Se utiliza en el caso de tubos de mayor diámetro, resulta evidente que la presencia del mandril limita la longitud inicial del tubo.

Estirado con mandril flotante. Permite el estirado de mayores longitudes. En este caso, el mandril es cónico a diferencia del utilizado en el caso anteriormente descrito, que es cilíndrico. Se puede demostrar que si la carga debida a la fricción se reduce, se podrán obtener mayores deformaciones por pasada. Un correcto diseño del mandril logrará reducciones por etapa de hasta el 45%. Los principales inconvenientes del proceso se derivan de la dificultad para lograr una adecuada lubricación interior.

Estirado con mandril móvil. Los problemas de fricción interior con el mandril se podrían solucionar utilizando uno de gran longitud que se desplace acompañando al tubo. Este mandril es en realidad un alambre o barra, cuyo diámetro es igual al del interior que se pretenda para el tubo. Para evitar problemas por soldadura debido a la presión y temperaturas inherentes al proceso, el mandril se deberá cubrir con un lubricante. A la salida, el mandril se mueve con la misma velocidad del tubo, donde esta es evidentemente mayor que la del material que se encuentra confinado en el dado; lo que provoca una carga de fricción en la interfase entre el mandril y el tubo, la cual se contrapone a la existente entre el dado y el material, reduciendo así la carga de estirado.

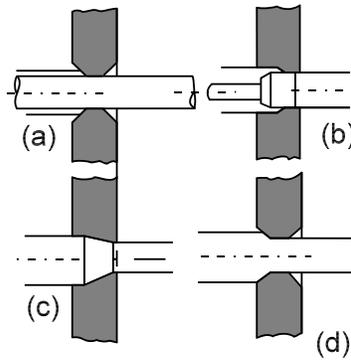


FIGURA 9.10 Estirado de tubo (a) Con mandril móvil. (b) Con mandril fijo. (c) Con mandril flotante (d) Sin mandril

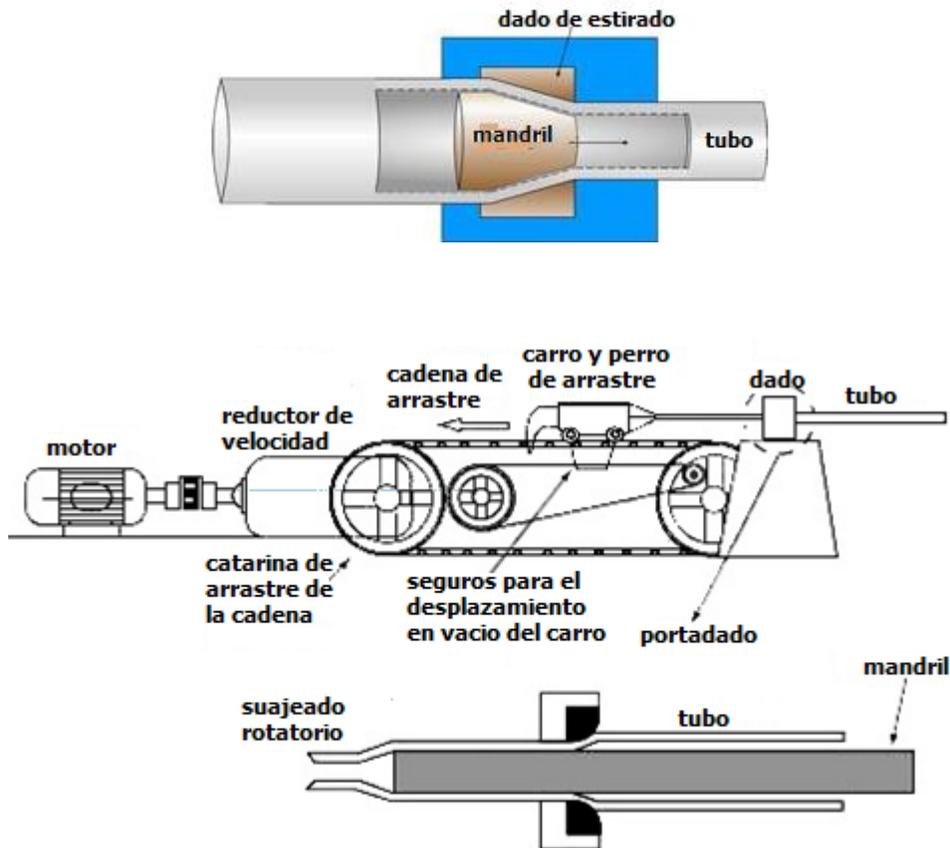


FIGURA 9.11 En la figura superior se muestra esquemáticamente el estirado con mandril flotante, imagen inferior estirado con mandril móvil y posterior suajeado

Una de las desventajas del proceso es la necesidad de retirar el mandril. Para efectuar esto, deberá aumentarse ligeramente el diámetro del tubo, lo cual se hace normalmente por rolado (figura 9.12).



FIGURA 9.12 Mesa hidráulica de estirado para tubo

Análisis de las cargas que se presentan durante la operación de estirado

En el caso de estirado sin mandril, el análisis es similar al empleado para barra o alambre, con la diferencia de que se considera deformación plana (figura 9.13), esto en virtud del espesor y condiciones de deformación.

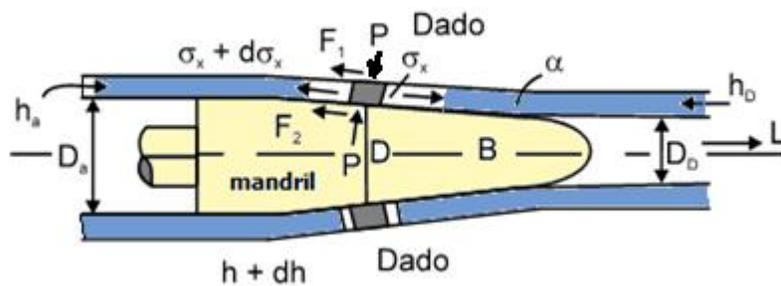


FIGURA 9.13 Esfuerzos generados en la operación de estirado de tubo

Para poder reducir el espesor del tubo, los ángulos del dado y del mandril no serán iguales, debiendo por tanto ser mayor el primero. Además, no existe razón alguna para que los coeficientes de fricción entre mandril y material, y entre este y el dado, sean iguales.

Las fuerzas que se presentan sobre el elemento diferencial analizado constan de cinco componentes:

I) Debida al esfuerzo longitudinal

$$(\sigma_x + d\sigma_x)(h + dh)\pi D - \sigma_x \pi h D$$

II) Por la reacción del dado

$$p(\tan \alpha)\pi D dx$$

III) Por la reacción del mandril

$$-p(\tan \beta)\pi D dx$$

IV) Por la fricción sobre el dado

$$\mu_1 p \pi D dx$$

V) Por la fricción sobre el mandril

$$\mu_2 p \pi D dx$$

Considerando el equilibrio de fuerzas:

$$(\sigma_x + d\sigma_x)(h + dh)\pi D - \sigma_x \pi h D + p(\tan \alpha)\pi D dx - p(\tan \beta)\pi D dx + \mu_1 p \pi D dx + \mu_2 p \pi D dx = 0$$

$$dh = (\tan \alpha - \tan \beta) dx$$

Sustituyendo y reordenando

$$(hd\sigma_x + \sigma_x dh) + pdh + \frac{(\mu_1 + \mu_2) pdh}{\tan \alpha - \tan \beta} = 0$$

Haciendo un cambio de variable, tal que:

$$B^* = \frac{\mu_1 + \mu_2}{\tan \alpha - \tan \beta}$$

Entonces

$$(hd\sigma_x + \sigma_x dh) + pdh(1 + B^*) = 0$$

Considerando el criterio de cedencia de Tresca, se tiene:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_0$$

$$\sigma_1 = \sigma_x$$

$$\sigma_3 = -p$$

Por lo tanto,

$$\sigma_x + p = \sigma_0$$

Reordenando y sustituyendo, se tiene:

$$hd\sigma_x = -(\sigma_x + p(1 + B^*))dh$$

$$hd\sigma_x = -(\sigma_x + (\sigma_0 - \sigma_x)(1 + B^*))dh$$

$$hd\sigma_x = -(\sigma_0(1 + B^*) - \sigma_x B^*)dh$$

$$\frac{d\sigma_x}{\sigma_x B^* - \sigma_0(1 + B^*)} = \frac{dh}{h}$$

$$\frac{d\sigma_x}{dh} - \frac{\sigma_x B^* - \sigma_0(1 + B^*)}{h} = 0$$

La solución de la ecuación es de la forma: $\frac{1}{B^*} \int_0^{\sigma_e} \frac{B^* d\sigma_x}{\sigma_x B^* - \sigma_0(1 + B^*)} = \int_{h_0}^{h_f} \frac{dh}{h}$

$$\sigma_e = \sigma_0 \left[\frac{1 + B^*}{B^*} \right] \left[1 - \left(\frac{h_f}{h_0} \right)^{B^*} \right]$$

donde σ_e representa el esfuerzo requerido para el estirado de tubo.

En caso de utilizar un mandril móvil, el análisis difiere del que aquí se presenta, ya que la fricción en la interfase mandril-material se opone a la que se presenta sobre el dado.

Por lo tanto, para un mandril móvil, el análisis estará dado por:

$$B^* = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\tan \alpha - \tan \beta}$$

En el caso de que los dos coeficientes de fricción sean iguales, la ecuación diferencial es

$$hd\sigma_x + (\sigma_x + p)dh = 0$$

Lo cual, al integrar, queda como:

$$\sigma_e = \sigma_0 \text{Ln} \frac{A_0}{A_f}$$

Expresión que representa a la carga para el caso de que no exista fricción. Si el coeficiente de fricción entre el mandril y el material excede del que se presenta entre el material y el dado, entonces el valor de B^* es negativa y, por tanto, el esfuerzo de estirado resulta menor que para el caso ideal sin fricción.

Otros métodos de estirado

Las operaciones de estirado no solo se relacionan con alambre y tubo, también se debe considerar su aplicación en productos planos (lámina), para esta existen los procesos de rechazado, embutido y de estirado. En el proceso de rechazado (figura 9.14), la lámina es obligada a deformarse sobre un mandril, el cual se encuentra rotando, esto por efecto de la presión ejercida por una o varias herramientas romas (sin filo) (figura 9.16).

Este método de conformado, de acuerdo con la presión ejercida, puede presentar una reducción sensible en el espesor de la lámina, y como el flujo plástico se produce por cargas cortantes, es considerado como un proceso de formado por corte. Esto es si la carga ejercida por la herramienta es lo suficientemente elevada, los esfuerzos no solo serán suficientes para doblar la lámina sobre el mandril sino permitirán también reducir el espesor. En el caso en cuestión, si se trata de formar piezas cónicas la relación de espesores (inicial y final) estará en función del semiángulo del cono, de acuerdo con la expresión $t_f = t_0 \text{sen} \alpha$; si α es menor de 30° se requerirán dos etapas, para concluir el formado, teniendo un recocido intermedio entre estas.

El rechazado de potencia se refiere a la aplicación de presión sobre la lámina a doblar sobre el mandril por efecto de algún ingenio mecánico, particularmente las herramientas son accionadas por pistones hidráulicos (figuras 9.14 y 9.15).



FIGURA 9.14 La operación de rechazado se realiza al empujar la lámina mediante una o varias herramientas sin filo, sobre el mandril, que se encuentra girando



FIGURA 9.15 Torno de CNC para rechazado

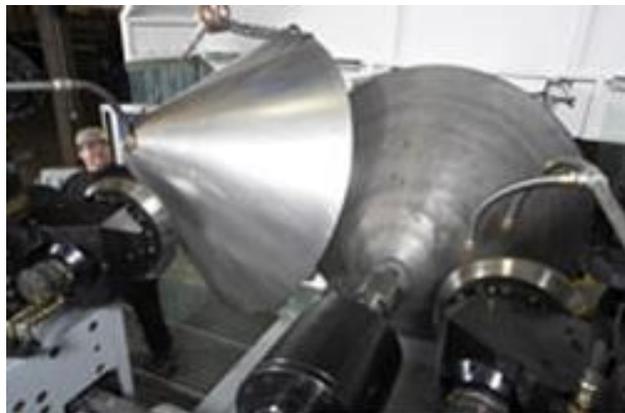
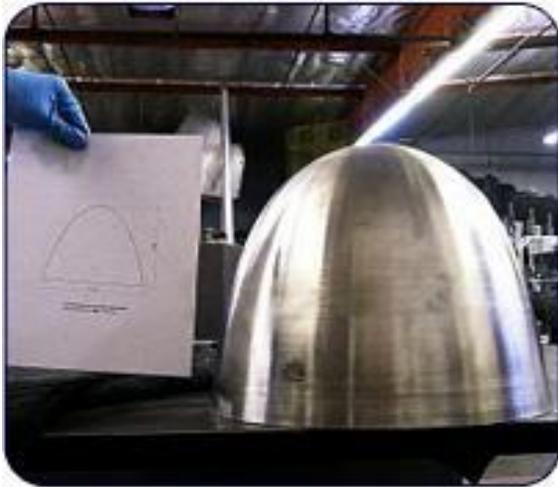


FIGURA 9.16 Ejemplos de formado mediante rechazado

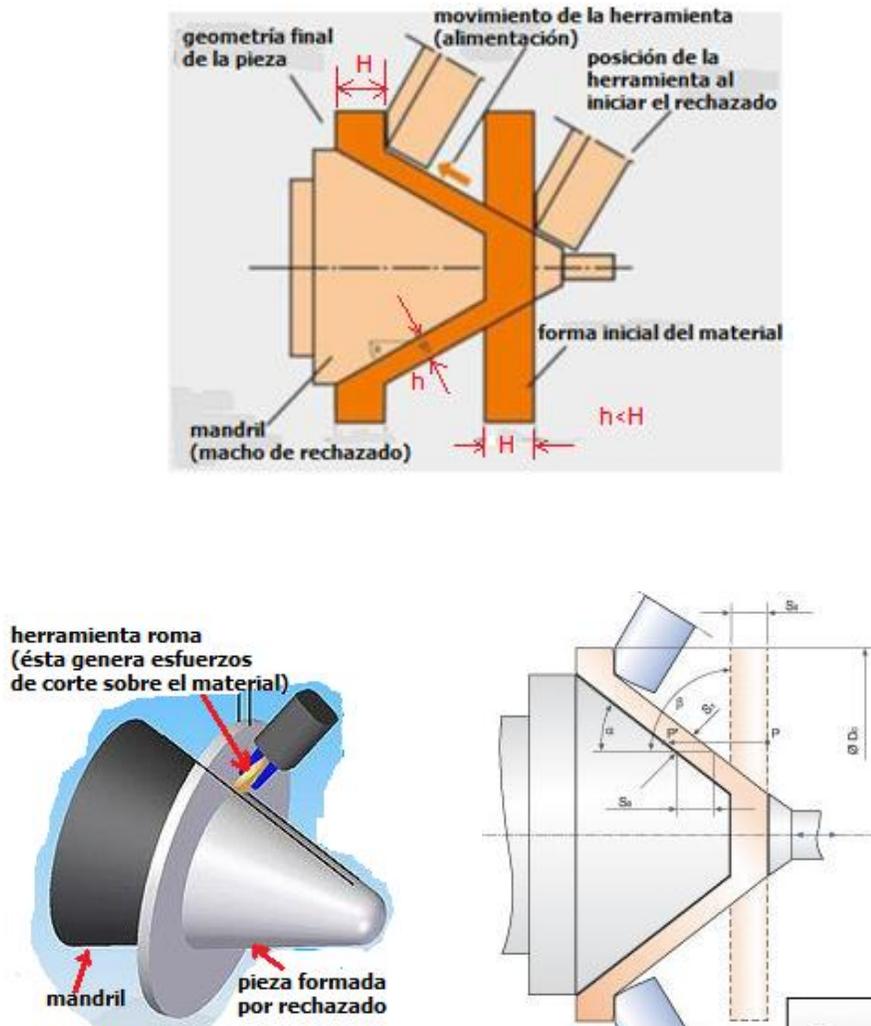


FIGURA 9.17 Rechazo por corte. En este caso existe una reducción apreciable del espesor

El rechazo permite formar superficies de revolución y, por tanto, cuerpos huecos a partir de chapa metálica, pudiéndose aplicar tanto a ferrosos como no ferrosos. Durante mucho tiempo se utilizó madera y bronce para la producción del mandril, se empleaba una especie de torno sencillo (figura 9.18) conocido como “torno de rechazo” para hacer rotar la pieza de lámina mientras esta era empujada contra el mandril por la herramienta. En la actualidad, el proceso se realiza mediante pistones hidráulicos pudiendo todo el sistema programarse para obtener cuerpos de revolución más complejos (máquinas CNC, figura 9.15).

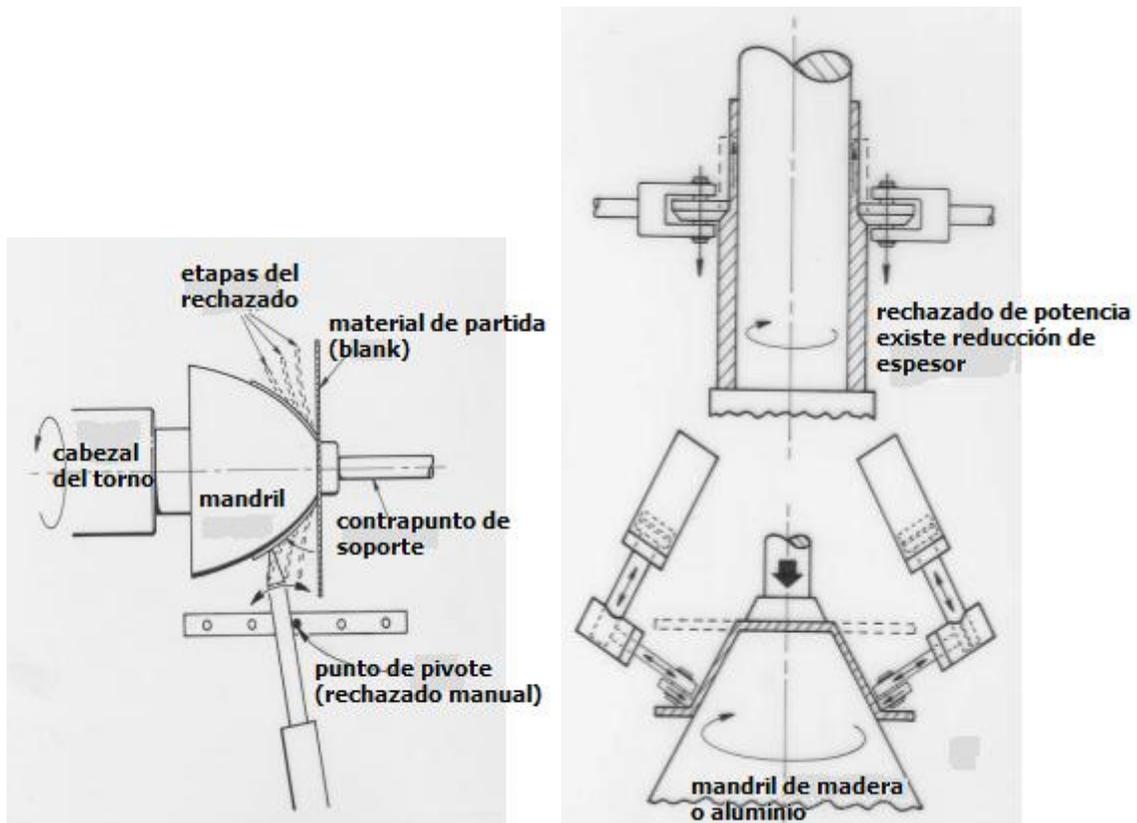


FIGURA 9.18 Descripción esquemática del proceso de rechazado; lado derecho manual, lado izquierdo de potencia, en la vista superior se aprecia una reducción sensible de espesor, mientras que en la inferior el espesor prácticamente se mantiene

9.3 FORMADO POR COMPRESIÓN

Existen diversos métodos de formado por compresión. Varios de ellos son característicos del formado en frío, mientras que otros son propiamente continuación de métodos que ya han sido vistos previamente, como forja y laminación y la extrusión (por impacto).

Operaciones de forja

CALIBRADO. Es la forma más simple de forja en frío (figura 9.19), que consiste en una ligera operación de compresión de una pieza forjada con lo que se obtienen tolerancias cerradas y buenos acabados.



FIGURA 9.19 Diversas piezas producidas por forja en frío

SUAJEADO. Este término se usa para denominar operaciones de forja; con frecuencia se refiere al caso de aplicar cargas de compresión y permite que el material se deforme libremente perpendicular a la fuerza aplicada.

El suajeado rotatorio (figura 9.20). Esta operación consiste en reducir el diámetro sobre parte del largo de una varilla, barra o tubo. El suajeado rotatorio se hace en un par de dados cónicos. Los dados se abren y cierran con rapidez, en tanto que la pieza de trabajo se gira y es alimentada a lo largo. Las quijadas se insertan en la ranura de la flecha, al girar se provoca el desplazamiento debido a los rodillos que se encuentran alrededor, y se produce la deformación. La pieza de trabajo puede alimentarse a las quijadas en forma mecánica o a mano. Otra forma de suajeado puede ser empujando un tubo dentro de un buje, en tanto que uno de ellos gira. Puede usarse un anillo de bolas en una jaula en lugar de un buje. Los tubos pueden suajearse en un mandril para soportar o para producir una forma interna o un árbol ranurado.

CABECEADO EN FRÍO O RECALCADO. El formado de cabezas de pernos, remaches, tornillos y otras piezas similares hechas en una máquina de cabeceado en frío es otra forma de estampado. La barra del material previamente calibrado es alimentada por rodillos enderezadores hasta un tope, y entonces se corta y se transporta a uno de los cuatro tipos de dados cabeceadores. En la manufactura de clavos, la cabeza se forma antes del corte de alambre.



FIGURA 9.20 En la imagen de la izquierda se muestra esquemáticamente la operación de una suajeadora rotatoria, en la imagen del centro se presenta un niple producido por suajeado; mientras que en la de la derecha se observa un equipo hidráulico para suajeado

Se dispone de máquinas productoras de tornillos que los terminan completamente, antes de abandonar la máquina. Las operaciones consisten en cortar una barra sobredimensionada, extruir el cuerpo, cabecearlo, recortarlo, aguzarlo y laminarle la rosca. Todas las operaciones se llevan a cabo simultáneamente, con producciones mayores a 100 piezas por minuto.

ACUÑADO. Se trata de una operación de forja en frío (figura 9.21), la cual se caracteriza por su reducida deformación, restringida a la producción de detalles finos en la superficie de la pieza sin que exista flujo lateral; el ejemplo más sencillo es el grabado de las monedas. Para lograr la formación de los detalles, las presiones se pueden elevar en forma significativa (se alcanza hasta del orden de 1400 MPa). El material utilizado para el acuñado (cospel) primero es troquelado a partir de hojas metálicas de un espesor aproximadamente igual al de las monedas a producir, estas hojas a su vez provienen de un proceso de laminado en frío.



FIGURA 9.21 La aplicación más usual del acuñado es la producción de monedas

REPUJADO. Es una operación de deformación por compresión la cual no demanda las altas presiones inherentes al acuñado. El punzón es usualmente con relieve, de tal forma que solo toca la parte de la lámina que está siendo trabajada. Este proceso se emplea en la producción de medallones y elementos decorativos y, en general, en grabado sobre lámina delgada. Se considera que el espesor del material no varía con la deformación. Una variante del proceso es el grabado o repujado rotatorio.

REMACHADO Y ESTACADO. En realidad, ambos métodos se pueden agrupar dentro de las operaciones de ensamble. El remachado (figura 9.22) se refiere a la formación de la cabeza de un remache sólido o a la formación de un reborde para el caso de uno que fuera hueco. El estacado tiene similar finalidad de la del remachado, en este caso el elemento que se va a ensamblar se recalca en uno de sus extremos, de tal manera que la deformación produce el ensamble de los elementos.

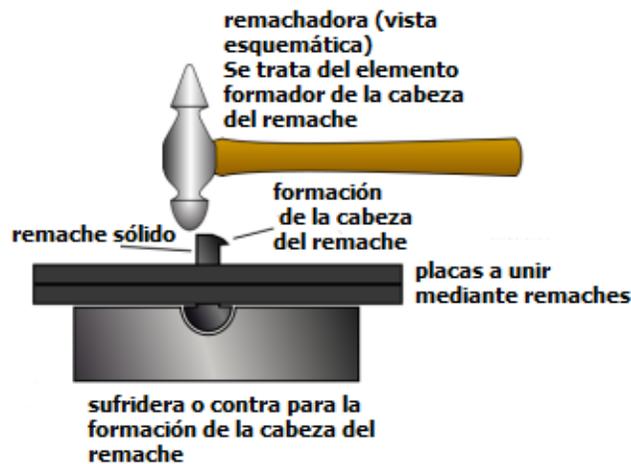
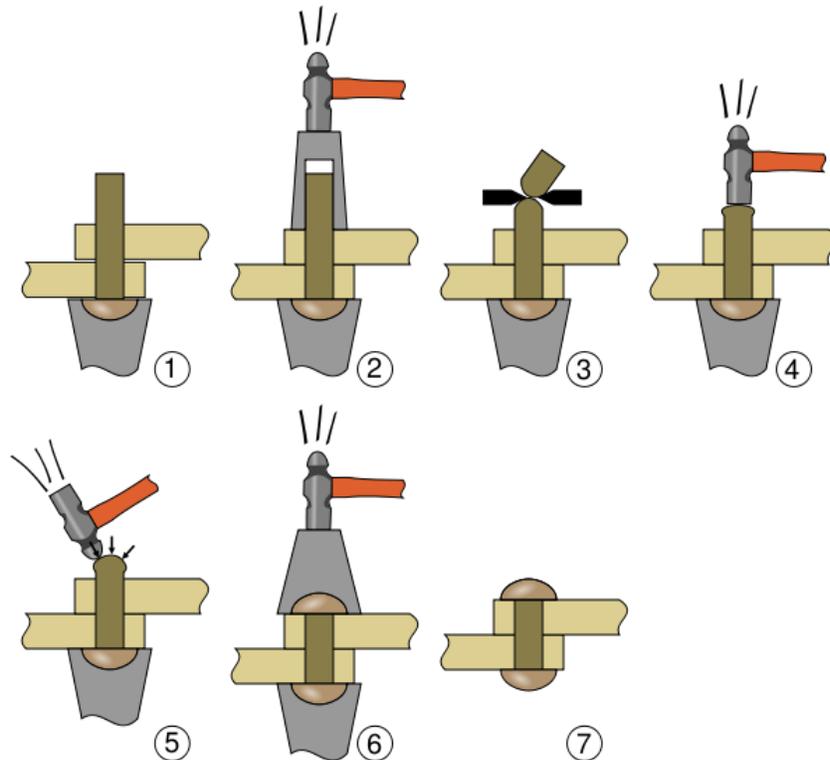


FIGURA 9.22 Operaciones de remachado

9.4 OPERACIONES DE FORMADO POR DOBLEZ

Formado por rodillos

En este proceso, el formado de la cinta se obtiene al hacerla pasar a través de una serie de parejas de rodillos que la forman progresivamente (figuras 9.23, 9.24 y 9.25), para al final ser soldada por resistencia. El proceso es continuo, con velocidades de hasta 100 m/min. El número de estaciones de rodillos depende de la geometría del perfil que se va a formar.

El equipo está constituido tanto por rodillos que trabajan en eje horizontal como vertical. También cuenta con rodillos guía y enderezadores al final del proceso. Este es un proceso de alta producción, ya que solamente así se justifica el alto costo del herramienta.



FIGURA 9.23 Formado por rodillos de perfiles tubulares

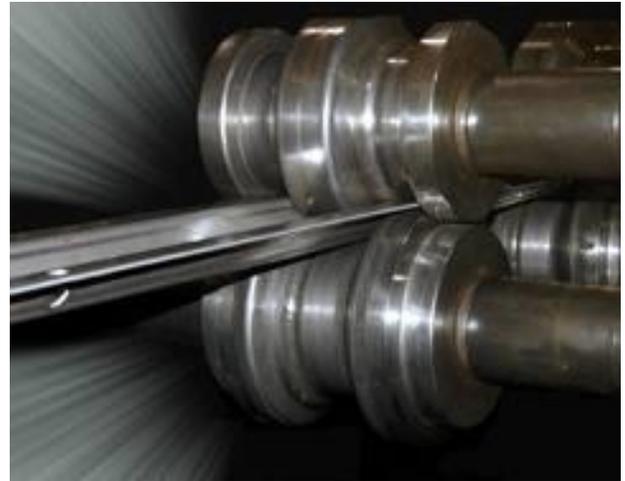
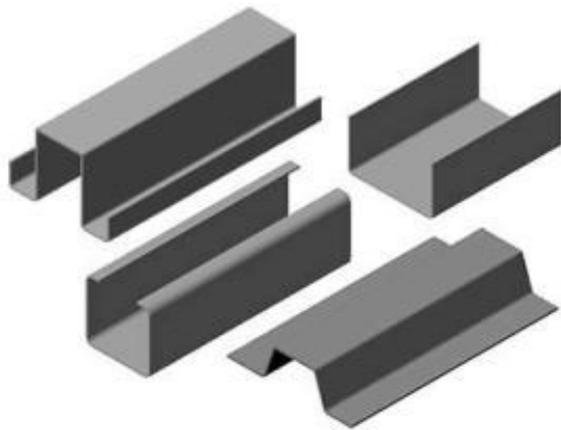


FIGURA 9.24 En la imagen de la izquierda se muestran diferentes perfiles producidos por rodillos, a la derecha se muestra un perfil al salir de una pareja de rodillos



FIGURA 9.25 El formado con rodillos permite la producción de láminas acanaladas (izquierda). A la derecha se observa la secuencia de deformación de un tren de rodillos

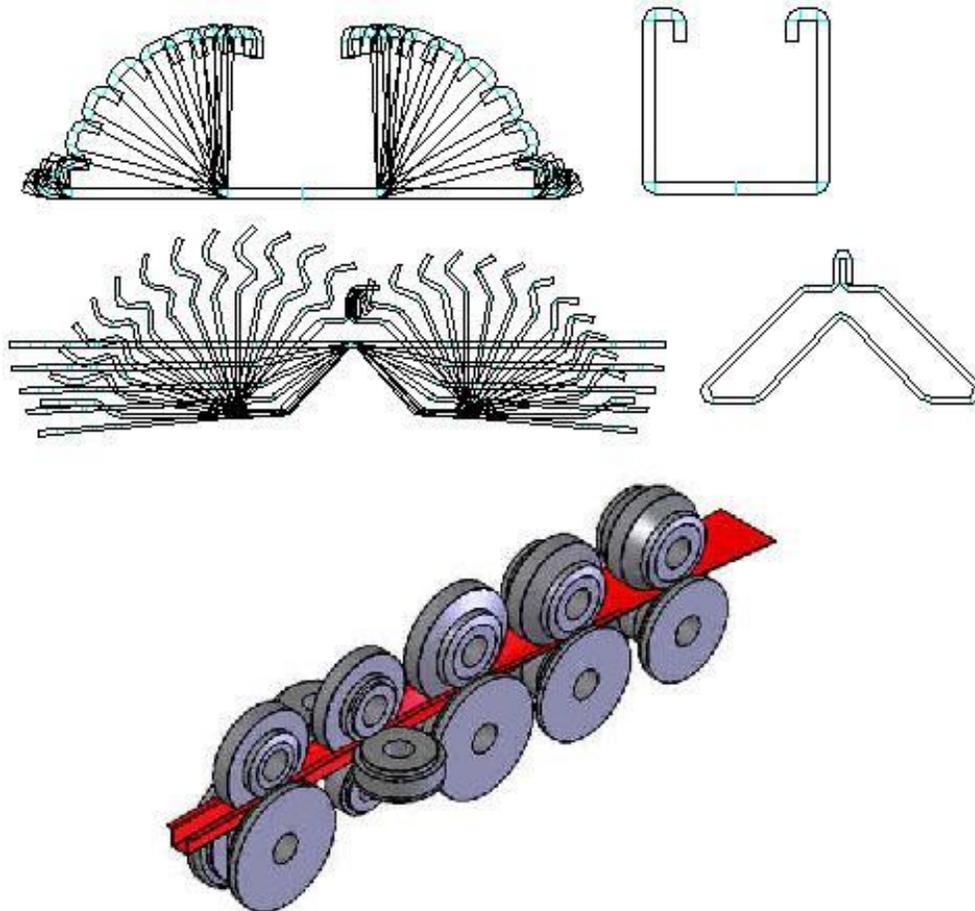


FIGURA 9.26 Secuencia de doblado de dos perfiles y tren formador

ROLADO. Se trata de otro método de formado de hojas o cinta de metal. En esta operación el metal se curva para obtener piezas cilíndricas. La máquina está formada por tres rodillos del mismo diámetro, dos se mantienen en posición fija y el otro se puede desplazar axialmente para ajustar el radio de curvatura de la hoja. Es evidente que a mayor distancia entre los planos que contienen los ejes de rotación de los rodillos, se incrementa el diámetro del elemento. Aunque no es usual la operación también se puede efectuar con solo dos rodillos, de los cuales el inferior está revestido de una gruesa capa de hule, en este caso se define el radio de curvatura por la presión ejercida por el rodillo superior.

Existen roladoras de muy diversos tipos: las accionadas manualmente, que se pueden emplear para hojas desde calibre 16, hasta máquinas accionadas mecánicamente que pueden rolar placas de más de 25 mm de espesor (figura 9.27).

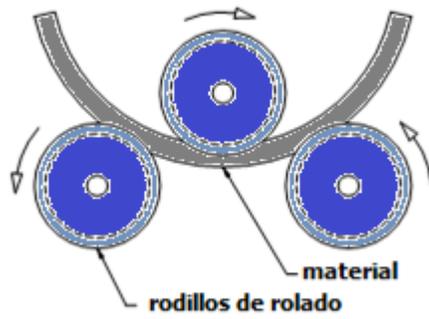


FIGURA 9.27 En la imagen de la izquierda se muestra esquemáticamente el proceso de relado de chapa metálica; a la derecha se presenta una rodadora mecánica para placa de 10 a 35 mm de espesor y hasta 4 m de ancho



FIGURA 9.28 Rodadora para lámina y rodadora para tubos de hasta 100 mm de diámetro (figura de la derecha)



FIGURA 9.29 Rolado de barra o perfiles [imagen izquierda Perfiles y Herrajes la Soledad, Nvo León Mex]

Existen otros métodos de formado por flexión, como puede ser mediante dobladoras manuales (figura 9.30a), las cuales se pueden utilizar para láminas de acero de hasta 4.9 mm de espesor (calibre 6). Las dobladoras de cortina operan de acuerdo con lo indicado en la figura 9.30b, estas permiten (de acuerdo con los herramientas a disposición) generar perfiles más complejos. En la actualidad existen prensas de CNC.

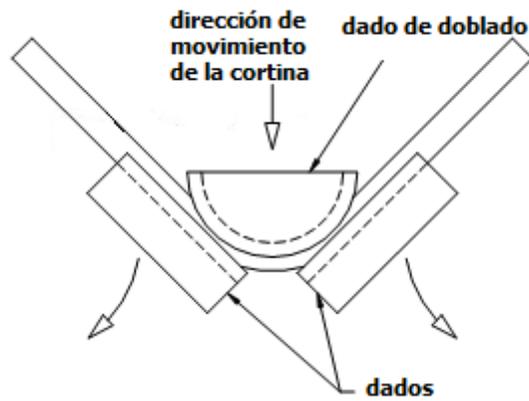
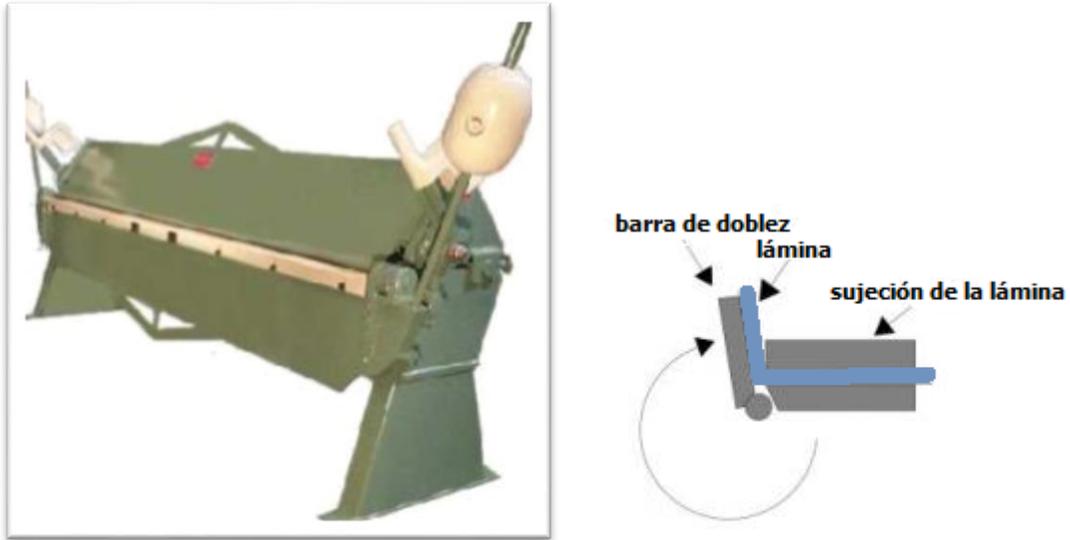


FIGURA 9.30 a) Dobladora de lámina. b) Dobladora de cortina. La máquina es CNC electro-hidráulica, puede tener hasta 12 m de longitud de la mesa y 30000 KN de capacidad de carga

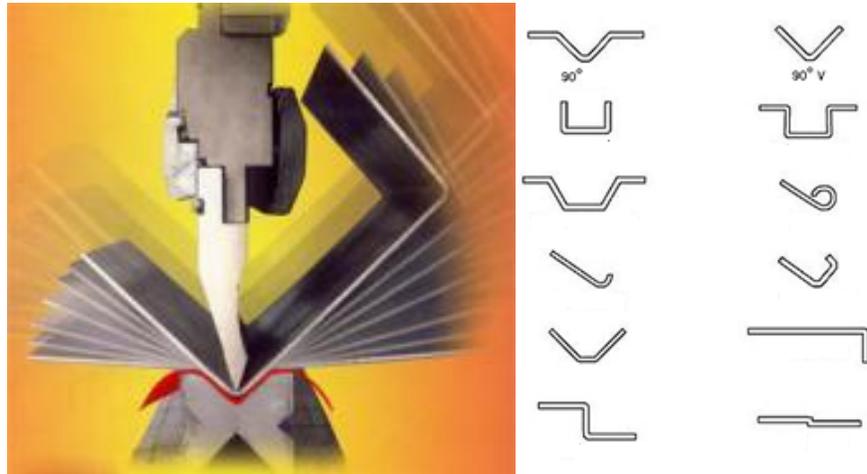


FIGURA 9.31 Ejemplos de perfiles obtenidos en la prensa de cortina

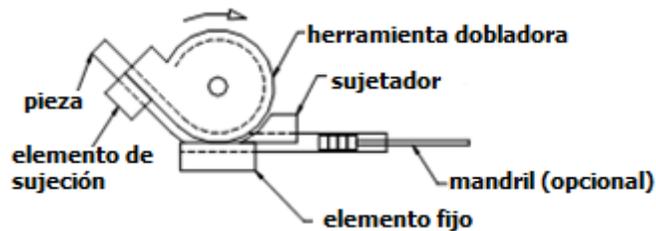


FIGURA 9.32 Descripción esquemática de una dobladora para tubo

Operaciones de doblado

Como ya ha sido mencionado, una de las operaciones más comúnmente realizadas sobre lámina metálica es su doblado (figura 9.33), para lo cual es necesario aplicar un momento flector que supere la resistencia a la deformación plástica del metal.

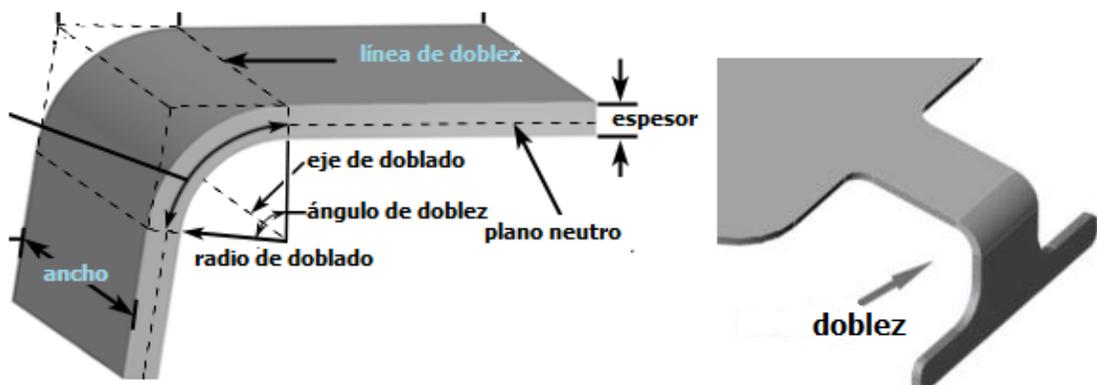


FIGURA 9.33 Descripción esquemática del proceso de doblado de cinta

El momento flector requerido para una cinta de espesor t y ancho b de un material con límite de cedencia σ_0 y radio al eje neutro r_n , está dado por:

$$M = \frac{\sigma_0 b}{12} \left(3t^2 - \left(\frac{2\sigma_0 r_n}{E} \right)^2 \right)$$

mientras que la fuerza requerida para formar una pieza como en la figura 9.33 es;

$$f_d = \frac{M}{L} (L + \text{sen } \phi)$$

donde

ϕ = Ángulo de doblez

L = aproximadamente $L = t + \frac{d}{2} + r_d$

r_d = Radio interior de doblado

E = Módulo de elasticidad

En el rolado (figura 9.33), la carga está dada por:

$$f = \sigma_0 \frac{b}{D-t} \left[t^2 - \frac{\sigma_0 (D-t)^2}{3E} \right] \text{ctg } \frac{\phi}{2}$$

D = Diámetro exterior de rolado

$\phi = 2 \text{sen}^{-1} \frac{l_r}{D+d}$

l_r = Distancia entre los rodillos inferiores

** es el diámetro de dichos rodillos

ENGARGOLADO. Este método de formado se utiliza en la fabricación de latas de chapa metálica. Consiste en la generación de dobleces en las pestañas de los botes. El engargolado se realiza (figura 9.34) mediante series de pequeños rodillos los cuales doblan y planchan las orillas de tapa y bote logrando con esto una unión sólida y hermética. En general, este método de unión se aplica a láminas de pequeño espesor (generalmente menores de un milímetro). Se trata de un proceso rápido y de bajo costo, las cargas aplicadas son función del material y espesor (por ejemplo, para acero inoxidable de 1 mm de espesor, dependiendo del tipo de engargolado, se demandan menos

de 40 ton). Si bien el mejor ejemplo de aplicación del proceso es el ensamble de latas, este puede ser aplicado simplemente como método de unión entre hojas metálicas.

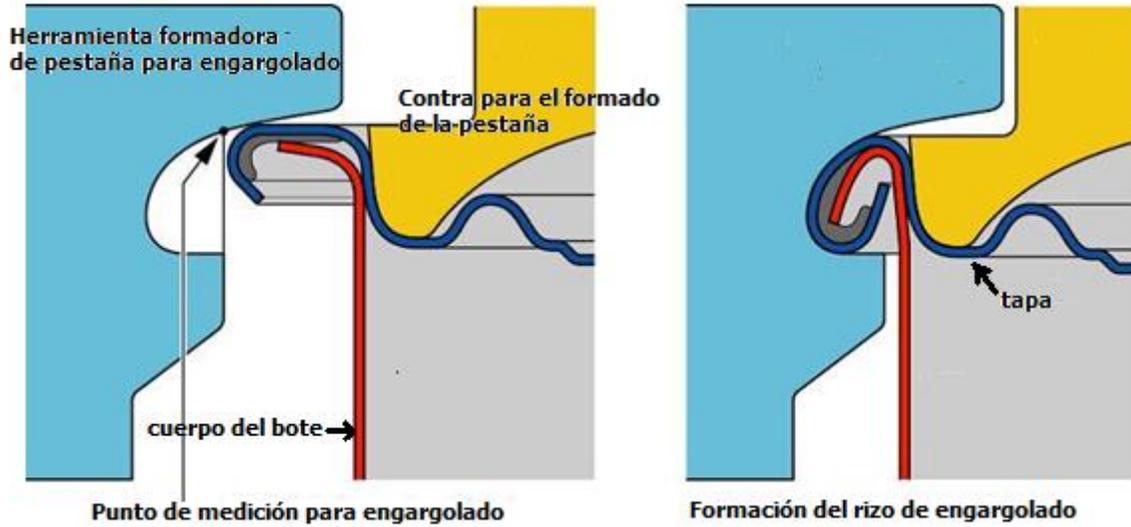


FIGURA 9.34 Etapas en la formación del engargolado para la fabricación de latas

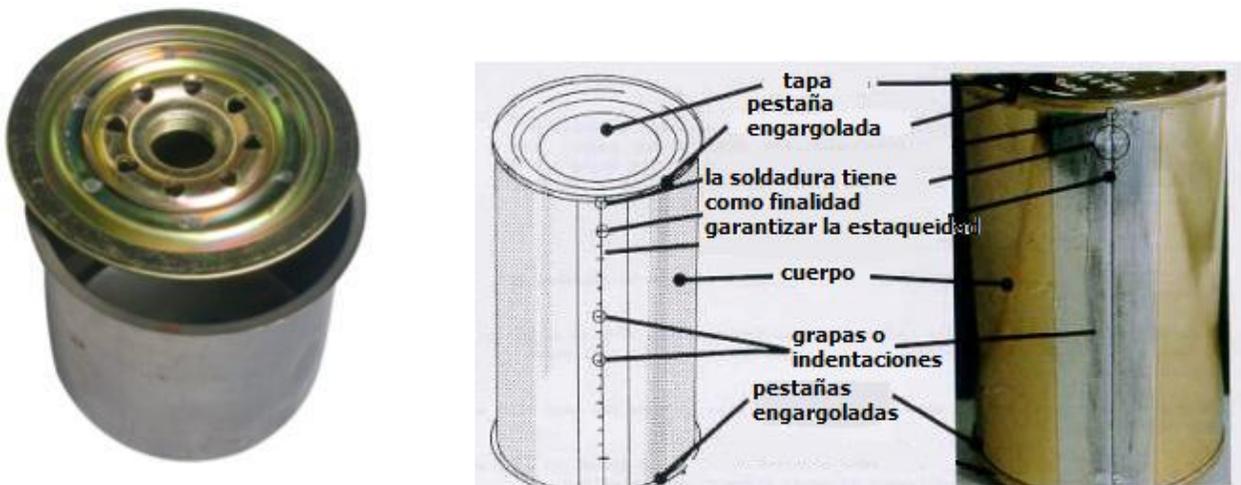


FIGURA 9.35 Ensamble de un filtro de aceite y de una lata de 3 piezas por engargolado

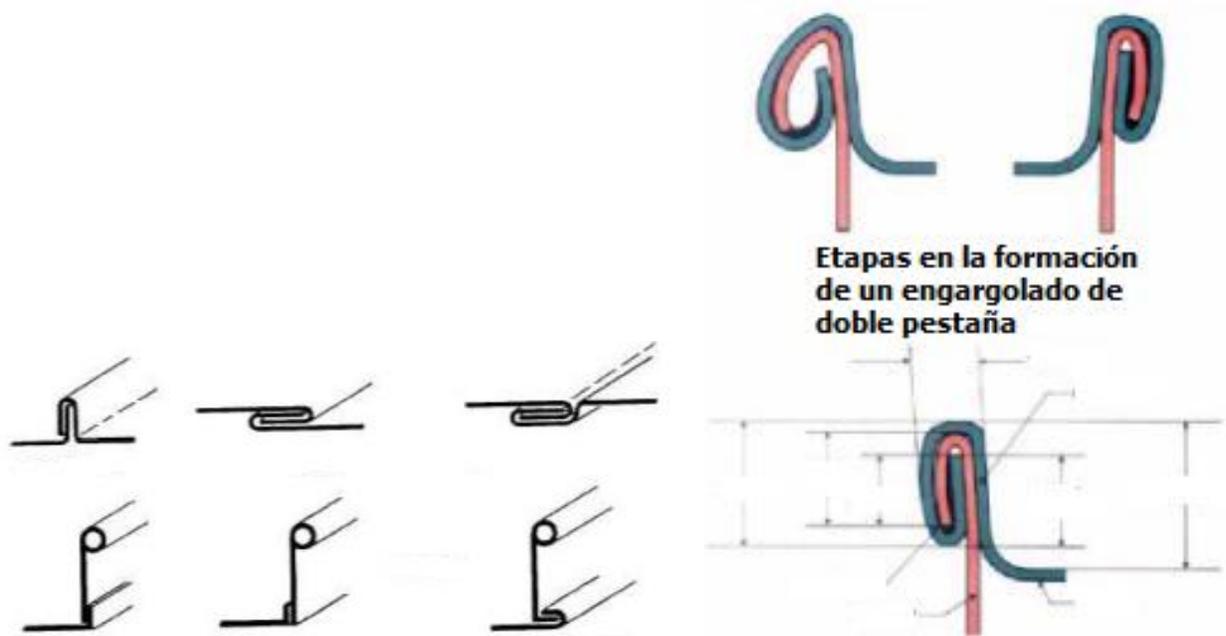


FIGURA 9.36 Diferentes tipos de engargolados



FIGURA 9.37 Diferentes equipos engargoladores para botes

9.5 OPERACIONES DE FORMADO MEDIANTE CORTE

TROQUELADO. Esta operación es una de las más comunes en el procesamiento de lámina metálica, permite en general la formación de piezas a partir de chapa o cinta metálica. Desde un punto de vista estricto, el troquelado se refiere al corte del material a partir de una cinta o sección de partida. Sin embargo, en México el término se extiende a diversas actividades que pueden acompañar al corte, esto es, doblado, embutido, grabado, marcado, corte parcial; entre otras. En particular, se distingue como troquelado al desprendimiento de un elemento útil a partir de la cinta, mientras que en el punzonado lo que se desprende es desperdicio. En una gran mayoría de las ocasiones no se lleva a efecto una sola operación, sino que para producir una pieza útil se requerirá de la combinación de troquelado, punzonado, embutido, doblado, grabado. Estos procesos pueden efectuarse con diferentes herramientas (a las cuales se denomina como troqueles). Por tanto, existen troqueles simples (figura 9.38) o en su defecto, si se realiza el proceso en forma secuencial, se denominan como troqueles progresivos (9.39a).

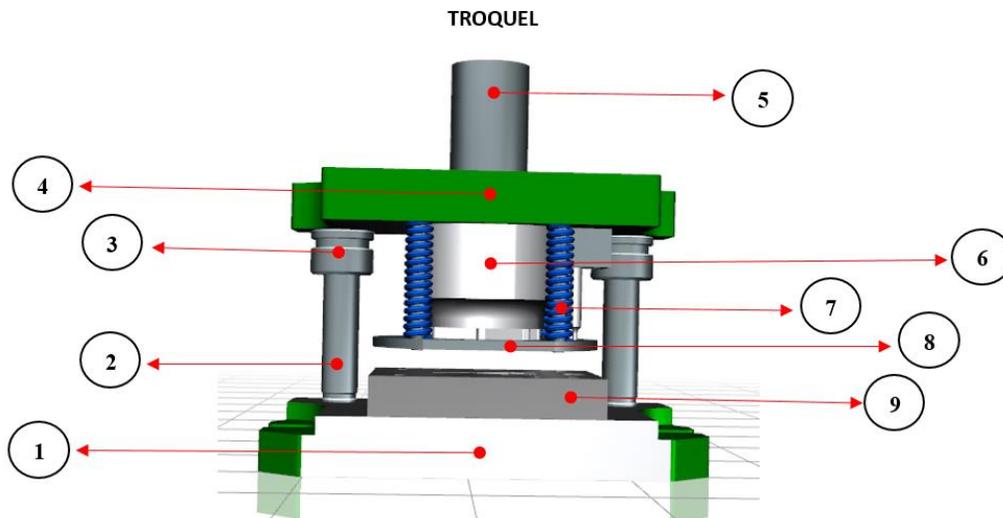


FIGURA 9.38 (a) Troquel simple: 1. Porta matriz, 2. Poste guía, 3. buje, 4. Porta punzón, 5. Espiga, 6. Punzón, 7. Resorte, 8. Pisador, 9. Matriz [Cueva, Ignacio, Udiatem, FI, UNAM, 2017]

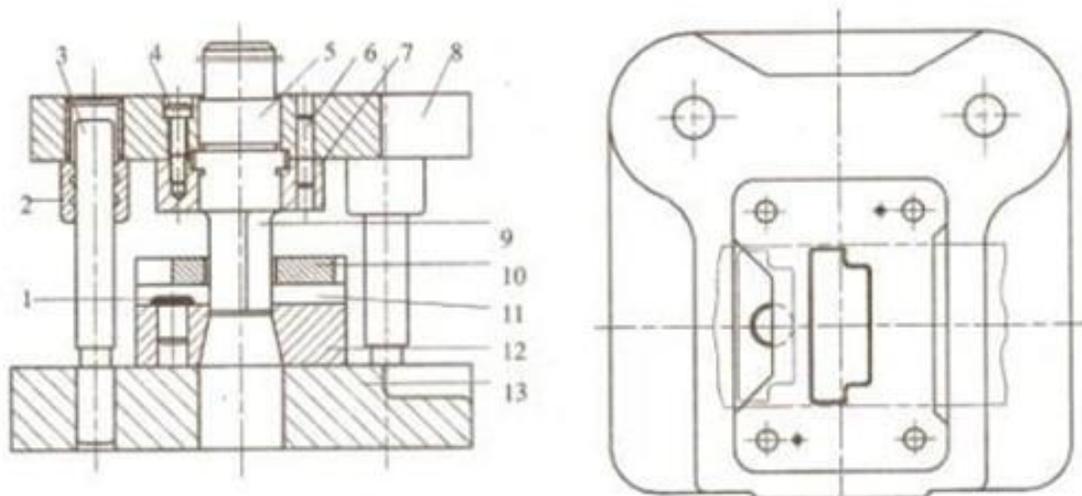


FIGURA 9.38 (b) Troquel simple: 1.Perno de freno o límite, 2. Buje guía, 3. Perno (guía), 4. Tornillos de sujeción, 5. Espiga guía, 6. Perno, 7. Placa de fijación, 8 y 13. Porta troquel, 9. Punzón, 10. Placa guía, 11. Cinta, 12.Matriz

En ocasiones, un troquel puede realizar más de una operación durante la carrera de la prensa; por ejemplo, troquelado y punzonado o troquelado y embutido, a este tipo de troqueles se les denomina como compuestos (9.39b). Su gran productividad y reducido costo la vuelven una importante alternativa en la producción de elementos terminados o semiterminados para producción en masa. En muchas de las ocasiones, la producción de una pieza requiere de diversas operaciones, las cuales se realizan en secuencia en diferentes etapas del proceso, teniendo así un troquel progresivo (figuras 9.39a, 9.40a, 9.41, 9.42). En el troquelado se logra el corte del metal sin la producción de rebabas y el desperdicio es la cinta después de cortarse.

El diseño de un troquel siempre es una operación compleja cuya solución no es única, tiene como funciones objetivo, desde luego, formar la pieza, optimar el aprovechamiento del material, reducir el costo de la herramienta, facilitar su mantenimiento y su fabricación. La primera etapa del diseño del troquel es la determinación de la secuencia de operaciones, para que, a partir de esta se definan los punzones y sus características, y con ellos, la matriz, para así conceptualizar elementos de soporte y sujeción. Resulta evidente que el uso de las modernas herramientas de CAD es un auxiliar invaluable en el momento de diseñar el troquel; sin embargo, un punto total del proceso sigue siendo la creatividad del diseñador para conceptualizar la forma en que se puede generar la pieza requerida.

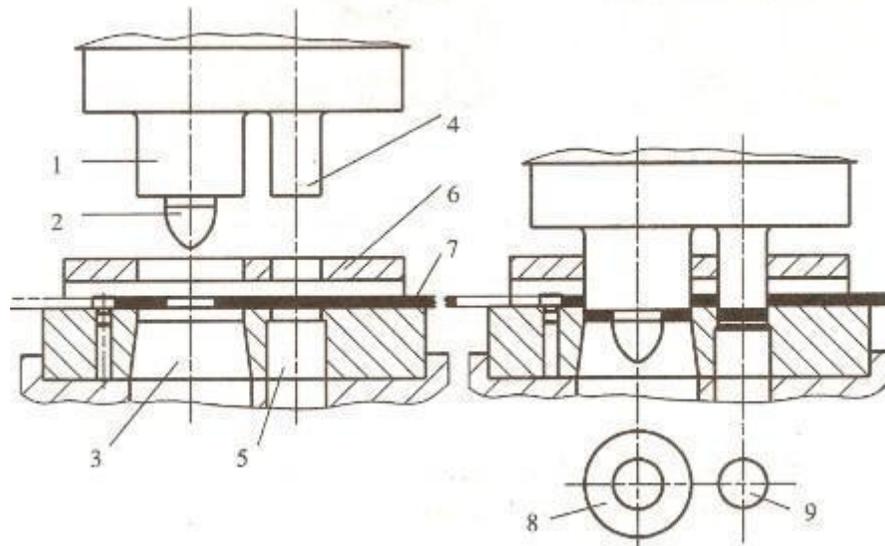


FIGURA 9.39 (a) Troquel progresivo: En este se lleva a efecto una operación de punzonado y en una segunda etapa de troquelado. El punzón de troquelar (1), cuenta con una protuberancia (2) que permite centrar la lámina, garantizando así que el troquelado sea concéntrico al punzonado. 1. Punzón de troquelado, 2. Punzón de localización, 3. Matriz de troquelado, 4. Herramienta de punzonado, 5. Matriz de punzonado, 6. Placa guía, 7. Cinta a troquelar, 8. Pieza terminada, 9. Desperdicio

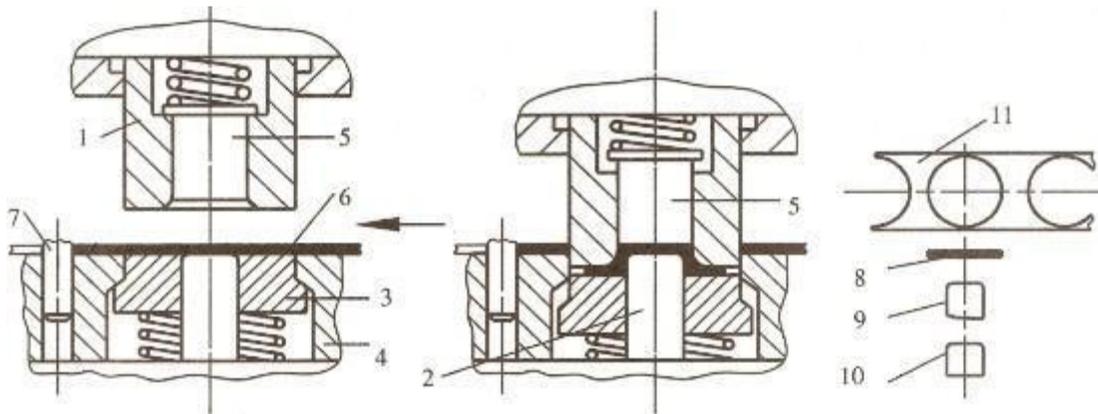


FIGURA 9.39 (b) Operación de un troquel compuesto que corta y embute: 1. Punzón de corte, 2. Punzón de embutido, 3. Placa de soporte, 4. Matriz de corte, 5. Expulsor, 6. Cinta metálica a troquelar, 7. Perno de limitación o freno, 8. Pieza cortada, 9. Pieza ya embutida, 10. Pieza final, 11. Desperdicio o calavera



FIGURA 9.40 (a) Troquel progresivo de dos etapas [Cueva, Ignacio, Udiatem, FI-UNAM, 2017]

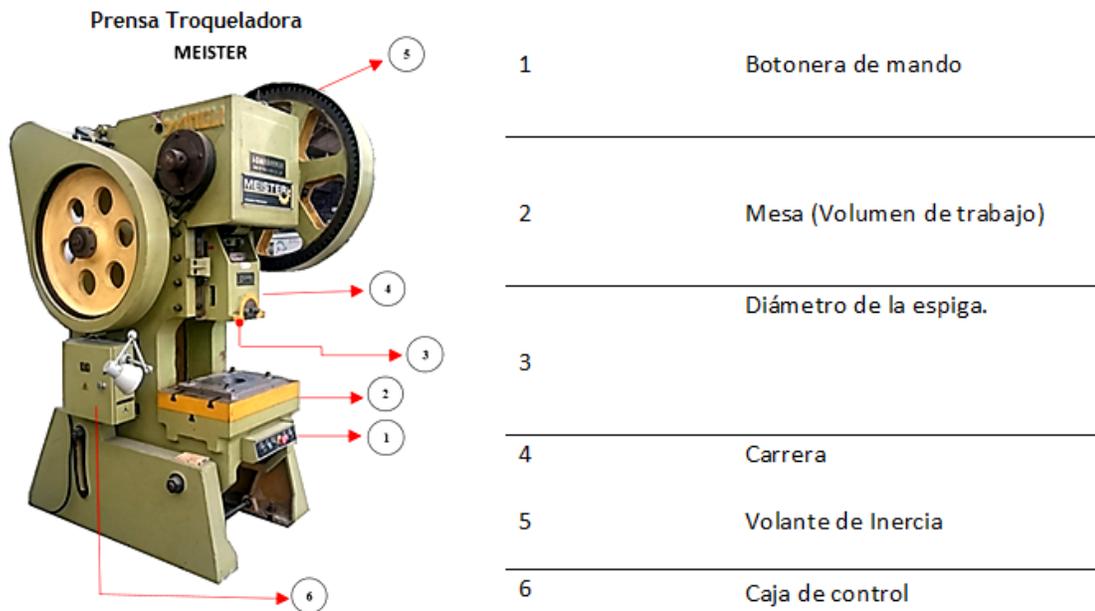


FIGURA 9.40 (b) Troqueladora instalada en los laboratorios de Ingeniería Mecánica de la FI-UNAM, capacidad 60 ton [Cueva, Ignacio, Udiatem, FI-UNAM,2017]



FIGURA 9.41 Troquel progresivo de 10 etapas para alta producción. Nótese que las guías ya no emplean bujes, sino sistemas antifricción

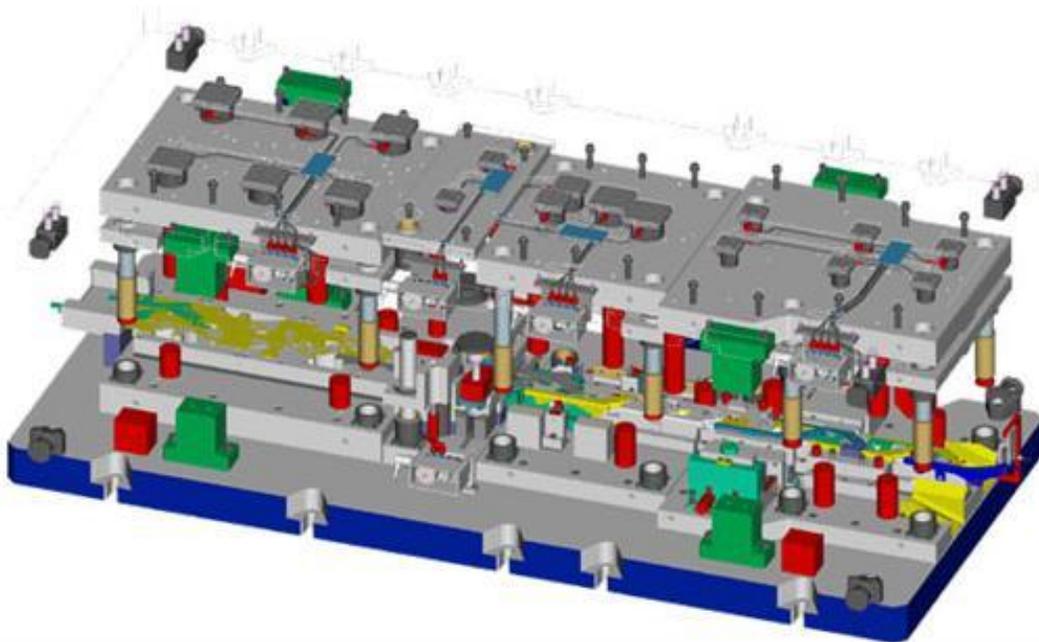
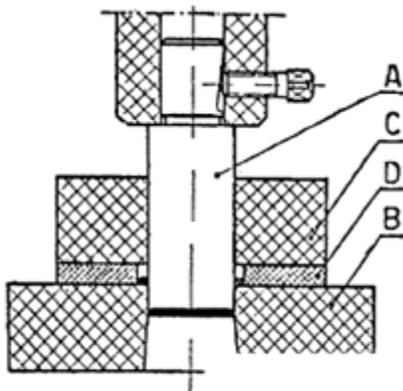


FIGURA 9.42 Dibujo de ensamble de un troquel progresivo

Existen diferencias sensibles entre los diferentes tipos de punzón, un piloto será más largo (se distinguen también por ser redondeados en su extremo) que los punzones de corte, ya que su finalidad es localizar puntos de referencia en la pieza y garantizar alineamiento y posicionamiento de la cinta. Un punzón de embutido tendrá filos redondeados para evitar el desagarramiento o corte de la cinta durante el embutido. Un punzón de troquelado o punzonado presentará filos vivos que en combinación con el filo de la matriz y una holgura h adecuada permitirá realizar el desprendimiento del material sin desgarre ni doblez (figura 9.43):

$$h = \frac{D_m - D_p}{2}$$



A) Punzón - que con su sección define el contorno a cortar

B) Matriz

C) Guía - para la carrera del punzón

D) Guía - para la cinta de lámina a trabajar.

NOTA: El filo de corte lo constituye el perímetro exterior del punzón y el perímetro interior de la matriz

FIGURA 9.43 Detalle de punzón y matriz

Para la figura 9.44, la holgura es de 0.15 mm, que dependerá del material y de su espesor y propiedades; si es adecuada se logrará un corte sin desgarres o rebabas. Esta será $h = 0.045t - 0.05t$ para metales suaves, $h = 0.06t$ para aluminio duro y acero suave, y de $h = 0.08t - 0.1t$ para metales duros, donde t es el espesor del material.

La carga de corte $f_t = \tau_m t l = 0.7 l t \sigma_m$, donde l es el perímetro de la pieza y τ_m es el cortante máximo del material y σ_m es la resistencia máxima a tracción. Considerando la fricción y las heterogeneidades, la carga de la prensa $f_p = 1.3 f_t$.

Si la operación es de troquelado, la medida se da a la matriz y la holgura se aplica al punzón mientras que si se trata de un punzonado, la holgura se aplica al definir las dimensiones de la matriz.



holguras recomendadas						
calibre	aluminio (25 KSI)		acero al carbono (50 KSI)		acero inoxidable (100 KSI)	
	espesor	holgura	espesor	holgura	espesor	holgura
20	0.032	0.006	0.036	0.008	0.038	0.008
18	0.040	0.006	0.048	0.010	0.050	0.010
16	0.051	0.008	0.060	0.012	0.063	0.016
14	0.064	0.010	0.075	0.016	0.078	0.020
12	0.081	0.012	0.105	0.022	0.109	0.028
10	0.102	0.020	0.135	0.034	0.141	0.042

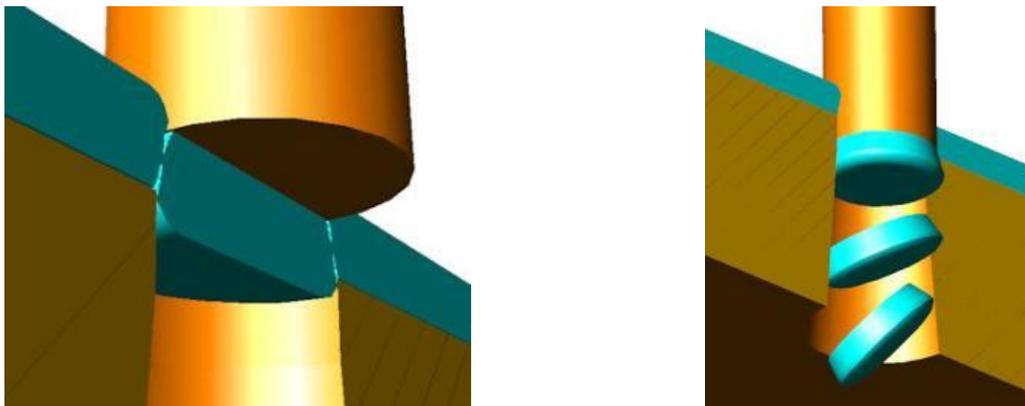


FIGURA 9.44 Holgura entre matriz y punzón

El diseño de un troquel es una operación que demanda creatividad y experiencia. Un buen diseño permitirá máximo aprovechamiento de la cinta y de la máquina (figuras 9.45a, 9.45b, 9.46, 9.48) mínimas cargas, menores demandas de mantenimiento y mayor duración de la herramienta. Partiendo de lo antes expuesto, Vukota Boljanovic [V. Boljanovic , J.R. Paquin, 2006] proponen 14 etapas para el diseño:

- Definición del aspecto de la cinta. El primer paso en el diseño es desarrollar las etapas de proceso de la pieza vistas sobre la cinta.

- Desarrollo de la matriz. Se dibujan las tres vistas de la matriz en conjunto con la cinta.
- Desarrollo de los punzones. Los punzones de troquelado son dibujados por encima de la matriz.
- Desarrollo de los punzones de punzonado. Se procede ahora a su dibujo en su posición de operación.
- Se procede a dibujar la placa de sujeción de los punzones.
- Diseño de los pilotos. Se dibujan los pernos piloto.
- Se dibujan espaciadores y guías.
- Se dibujan los pernos de límite.
- Se dibujan los pernos de freno o parada.
- Se dibujan los separadores.
- Se dibujan los elementos de sujeción (tornillos, pernos, etc.) de ensamble del troquel.
- Se selecciona el portatroquel y se dibuja el ensamble de los diferentes elementos en este.
- Se procede a elaborar el dibujo de fabricación ya con sus dimensiones.
- Se listan los materiales requeridos (con sus especificaciones) para la construcción del troquel.

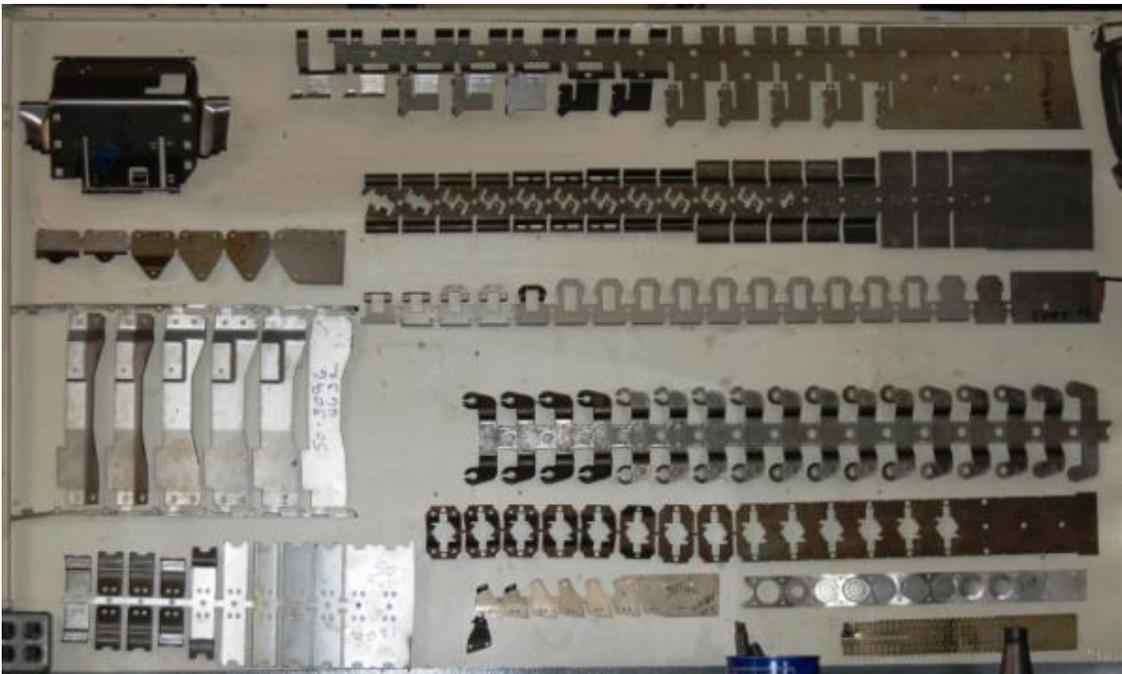


FIGURA 9.45 (a) Diferentes cintas en donde se observan las variadas etapas del proceso que se pueden tener en un troquel progresivo

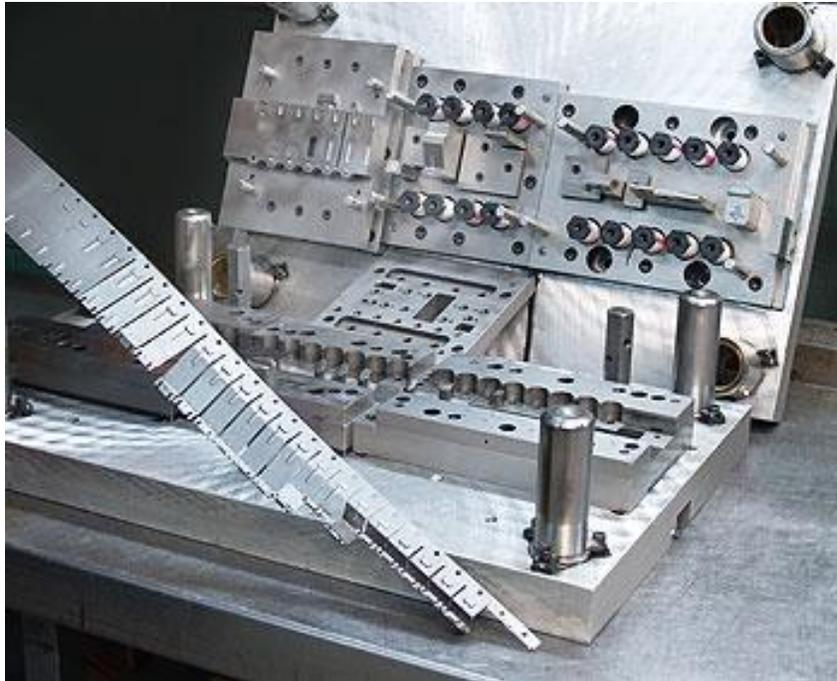


FIGURA 9.45 (b) Troquel progresivo abierto. Se puede observar que para facilitar su maquinado, este se estructuró en 3 secciones, las cuales son montadas al final en el portatroquel. Del lado izquierdo se observa una cinta en que se muestran las diferentes etapas del proceso

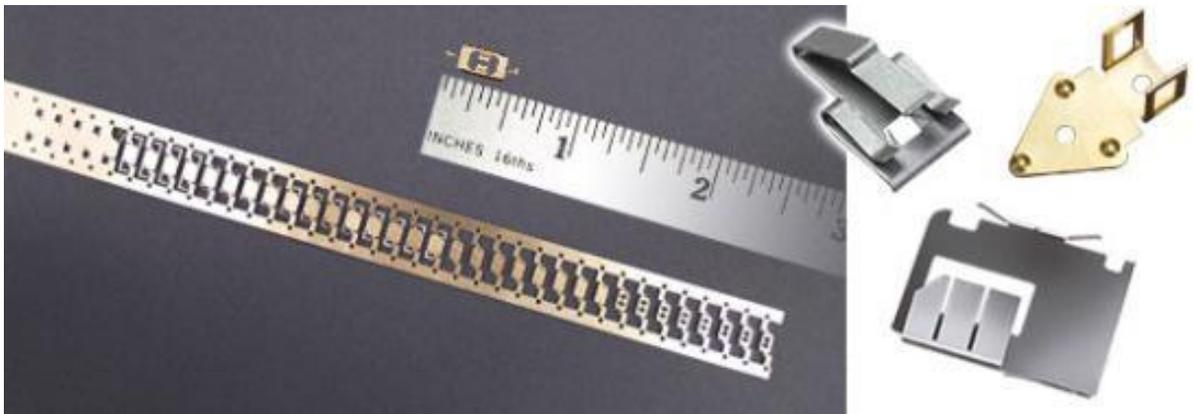


FIGURA 9.46 Cinta de troquel progresivo, en la parte de la izquierda se observa la pieza producida. Del lado derecho se presentan algunos ejemplos de piezas troqueladas. Resulta evidente la variedad de operaciones involucradas



FIGURA 9.47 Diversos ejemplos de piezas producidas a partir de cinta metálica, y procesadas en troqueles. Es claro que los troqueles llevan a efecto no solo operaciones de corte, sino que el embutido, el doblado y otros métodos son primordiales en la formación de la pieza.



FIGURA 9.48 Troquel progresivo y cinta en donde se observan las diferentes etapas del troquelado



FIGURA 9.49 Troqueladora con herramienta; vistas frontal y posterior [Cueva, Ignacio, Udiatem, FI-UNAM, 2017]

9.6 OPERACIONES DE EMBUTIDO

Como ya ha sido mencionado, el embutido es una de las operaciones con lámina más común, en esta se producen cuerpos huecos a partir de la cinta metálica. Para esto, se dispone de una matriz y de un punzón que empuja el material al interior de la matriz. Para evitar la formación de arrugas, se tiene un pisador que permite el deslizamiento del material hacia la cavidad sin generar estirado en este (figura 9.50).

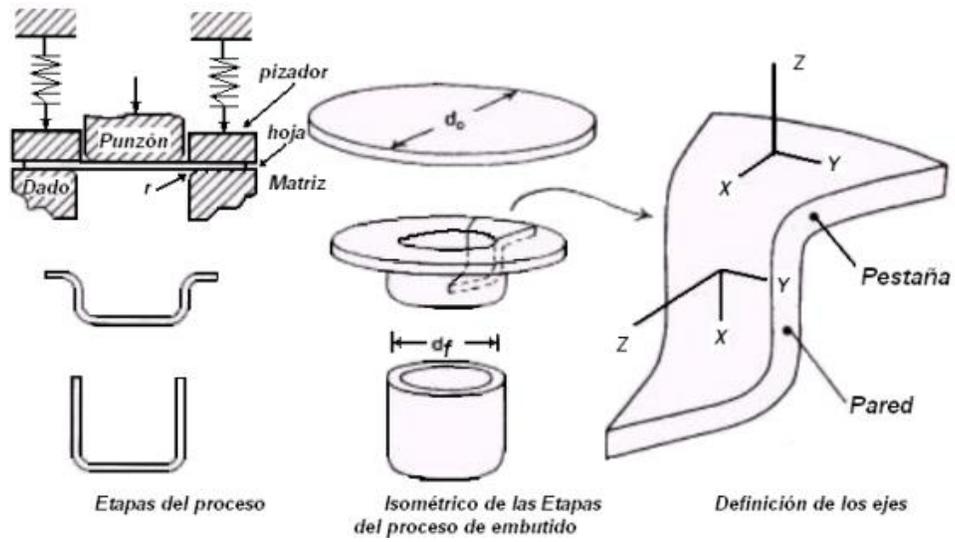


FIGURA 9.50 (a) Etapas en la operación de embutido

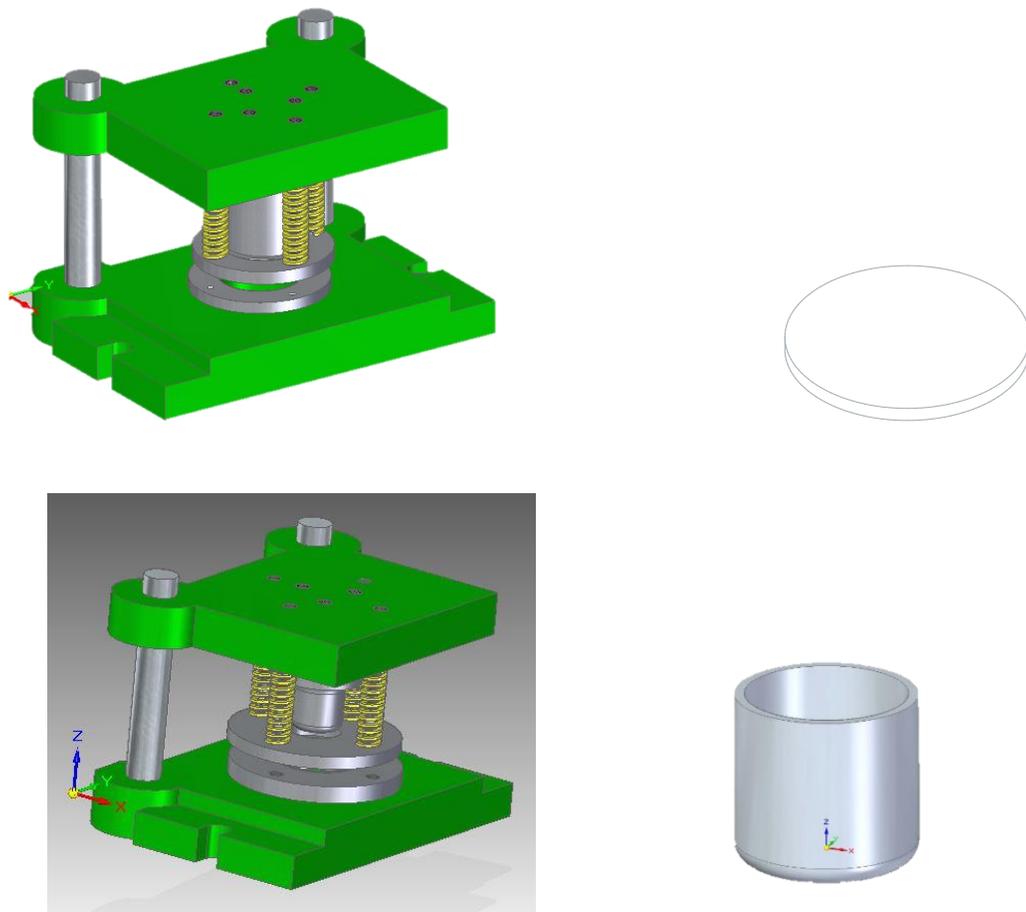


FIGURA 9.50 (b) Diferentes vistas del troquel de embutido; material de partida y producto del proceso

Para la determinación de la carga y solicitaciones a las que se encuentra sometido el material, observe el modelo de la figura 9.50. Este modelo considera un material rígido plástico sin endurecimiento y que no existe fricción del material con las herramientas.

Para evaluar el proceso (intensidad de la deformación), se define el cociente de límite de estirado $LDR = \frac{d_0}{d_f}$, el cual para un material en particular puede referir a la máxima relación de diámetro inicial a final.

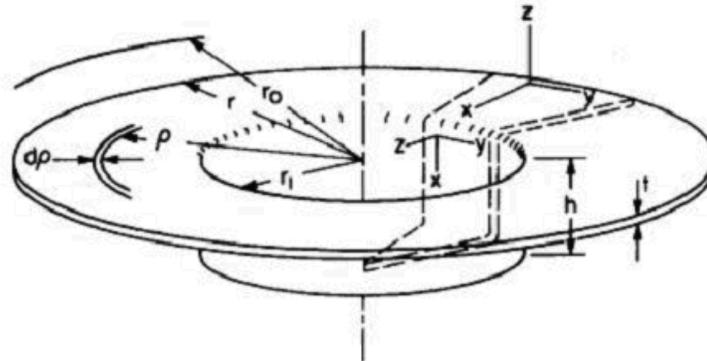


FIGURA 9.51 Análisis de la carga de embutido

Para el análisis se considera que la superficie total del material permanece inalterada, esto es, el espesor antes y después del proceso será constante.

$$\sum A_f = A_0$$

$$\pi\rho^2 + 2\pi r_f h = \pi\rho_0^2$$

$$2\pi\rho d\rho + 2\pi r_f dh = 0$$

$$d\rho = -\frac{2\pi r_f dh}{2\pi\rho}$$

$$d\rho = -\frac{r_f dh}{\rho}$$

Por su parte, $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy} \neq 0, \varepsilon_{zz} = 0$ para una deformación plástica $\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} = 0$

$$d\varepsilon_{yy} = \frac{d\rho}{\rho}$$

Como el eje z corresponde con el espesor y se considera que sobre este no hay cambio:

$$d\varepsilon_{zz} = 0$$

$$d\varepsilon_{xx} + d\varepsilon_{yy} = 0$$

$$d\varepsilon_{xx} = -d\varepsilon_{yy}$$

La circunferencia es $2\pi\rho$, por lo tanto,

$$d\varepsilon_y = \frac{d\rho}{\rho}$$

y como $d\varepsilon_x = -d\varepsilon_y = \frac{r_f dh}{\rho^2}$

Donde r_f es el radio del punzón, por otra parte,

$$\int dW = \int \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}$$

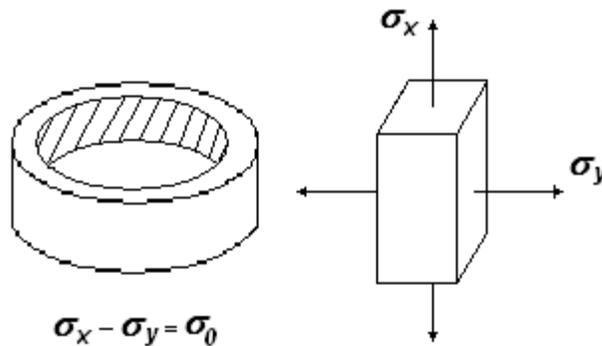
Considerando que $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ representan valores principales

$$W = \sigma_x r_f \frac{dh}{\rho^2} dV - \sigma_y r_f \frac{dh}{\rho^2} + \sigma_z \varepsilon_z$$

ya que $\varepsilon_z = 0$

$$dW = ((\sigma_x - \sigma_y) r_f \frac{dh}{\rho^2}) dV$$

Considerando criterio de fluencia

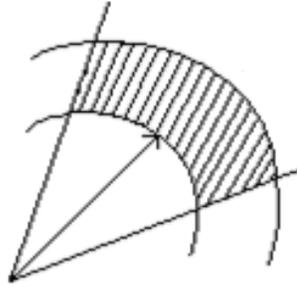


$$dW = \sigma_0 dV r_f \frac{dh}{\rho^2}$$

Lo cual se puede presentar como:

$$\frac{\partial W}{\partial h} = \sigma_0 \frac{r_f}{\rho^2} \Rightarrow \int_V \sigma_0 \frac{r_f}{\rho^2} dV = \int_0^{2\pi} \int_{r_f}^{r_0} \frac{\sigma_0 r_f t \rho d\alpha d\rho}{\rho^2}$$

$$dV = t \rho d\rho d\alpha$$



$$dW = f dh$$

$$\Rightarrow \frac{\partial W}{\partial h} = f$$

$$\therefore \frac{\partial W}{\partial h} = 2\pi \sigma_0 r_f t \operatorname{Ln} \frac{r_0}{r_f}$$

De todo lo expuesto, se tiene que la carga de embutido está dada por:

$$f_{emb} = \sigma_0 2\pi r_f t \operatorname{Ln} \frac{r_0}{r_f}$$

$$A_{emb} = 2\pi r_f t$$

A partir de lo anterior, se puede definir el esfuerzo de embutido por:

$$\sigma_{emb} = \frac{f_{emb}}{A_{emb}} = \sigma_0 \operatorname{Ln} \frac{r_0}{r_f}$$

Para que no se presente adelgazamiento

$$\sigma_{emb} \leq \sigma_0$$

La deformabilidad se define como el límite de embutido (*LDR*), el cual representa al cociente máximo de deformación

$$LDR = \frac{\phi_0}{\phi_f}$$

$$\sigma_{emb} = \sigma_0 \text{Ln} \frac{\phi_0}{\phi_f} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_y \text{Ln} \frac{\phi_0}{\phi_f} \Rightarrow \sigma_0 \geq \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_y \text{Ln} \frac{\phi_0}{\phi_f}$$

Considerando la condición de igualdad

$$\sigma_0 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_y \text{Ln} \frac{\phi_0}{\phi_f}$$

$$\frac{\sqrt{3}}{2} = \text{Ln} \left(\frac{\phi_0}{\phi_f} \right)$$

$$\frac{\phi_0}{\phi_f} = \exp \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \right]$$

$$\frac{\phi_0}{\phi_f} = 2.38$$

Aunque en la práctica el valor de la deformabilidad límite se restringe a:

$$LDR \approx 2.1 \text{ a } 2.2$$

Esto debido a la fricción y flexión que se presentan durante el proceso, otros autores [Vukota Boljanovic, 2004] indican que la fuerza de embutido se puede determinar como

$$f_{emb} = \sigma_1 2\pi r_f t$$

$$\sigma_1 = e^{\frac{\mu\pi}{2}} \left[1.1\sigma_0 \text{Ln} \frac{r_0}{\bar{r}_f} + \frac{2\mu f_p}{\pi \bar{r}_f t} \right] + \sigma_0 \frac{t}{t+2r_e}$$

donde

μ = Fricción entre material y herramienta

\bar{r}_f = Radio medio de la pieza embutida

f_p = Fuerza aplicada por el pisador

r_e = Radio de la esquina (borde) del punzón

En términos generales, el coeficiente de fricción cuando se lubrican las herramientas está entre 0.06 y 0.16 (acero, aluminio); mientras que, en superficies sin lubricación, este puede alcanzar de 0.18 a 0.35 (acero, aluminio).



FIGURA 9.52 Diversas vistas del troquel de embutido montado en la máquina, la herramienta y la pieza producida

DEFECTOS Y PROBLEMAS EN EL EMBUTIDO. Durante el embutido interactúan una serie de factores tales como la fricción, la carga del pisador, propiedades del material (resistencia, formabilidad, anisotropía, etcétera) que pueden dar como resultado la obtención de una pieza sana o defectuosa.

HOLGURA. Si la pieza se fractura durante la operación, esto se puede deber a un radio de herramientas (dado y matriz) demasiado pequeño o a que la holgura está por debajo de lo recomendado; todo esto se traduce en un estirado del material y su posterior desgarramiento.

PRESIÓN DEL PISADOR. Si la presión aplicada es muy elevada o el coeficiente de fricción se incrementa sensiblemente se puede dar lugar a la fractura de la lámina durante su embutido. La presión del pisador se puede calcular como

$$p_p = 0.25 \left[\left(\frac{r_0}{r_f} - 1 \right)^3 + \frac{r_{fi}}{200t} \right] \sigma_m$$

donde

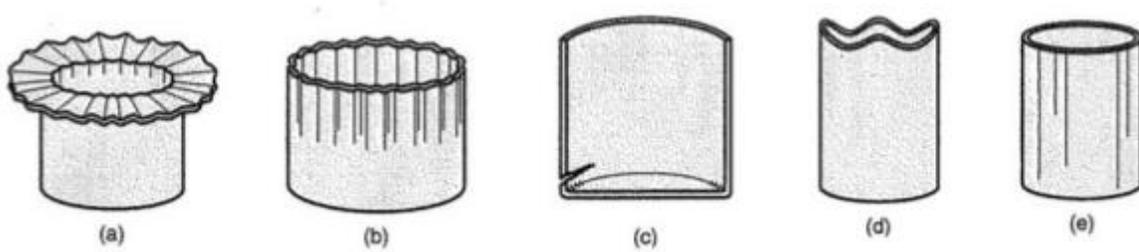
r_{fi} – Radio interior de la pieza embutida

La carga del pisador es

$$f_p = \frac{\pi}{4} \left[(2r_0)^2 - (2r_{fi} + 2r_e)^2 \right] p_p$$

RADIOS DE LAS HERRAMIENTAS. El radio del borde del punzón al igual que el de la matriz son muy importantes, ya que si son muy pequeños se puede producir fracturas al deslizar el material sobre estos. Asimismo se pueden producir marcas o rallones durante la operación. Si la presión del pisador es muy pequeña o si el radio del borde de las herramientas es muy grande, se puede dar lugar a la aparición de arrugas y, por consecuencia, marcas en la pieza embutida.

LUBRICACIÓN. Como ya ha sido mencionado, la lubricación afecta tanto la capacidad para obtener una pieza bien embutida, como también puede ser causa de incrementos en la carga, presencia de marcas longitudinales y fractura del material; en cada caso se debe de revisar el lubricante más adecuado para el material [acero-aceites minerales, aluminio-aceites grasos sulfurados, parafinas, aceites minerales, aceros inoxidable-aceites de maíz, grafito, entre otros].



a) Presencia de arrugas en la pestaña, b) Presencia de arrugas en la pared, c) Fractura, d) Presencia de orejas (anisotropía), e) Marcas longitudinales (rallas, falta de lubricación)

FIGURA 9.52 Defectos en piezas embutidas

OPERACIÓN DE GRABADO. Es muy común que las piezas requieran de algún grabado. Para esto, es necesario garantizar la deformación superficial del material y la carga necesaria se puede aproximar si se considera un proceso de indentación. Analizando como tal el proceso, se llega a determinar (considerando material rígido-plástico sin endurecimiento y deformación plana) que para el caso de que no exista fricción, la ecuación

$$\frac{\bar{P}_{ind}}{2k} = 2.886$$

Mientras que para el caso de fricción sin deslizamiento

$$\frac{\bar{P}_{ind}}{2k} = 3.175$$

donde k representa al cortante crítico.

Lo antes expuesto indica que la presión necesaria para el grabado superficial de la lámina es del orden de tres veces el esfuerzo de cedencia del material.

En páginas anteriores se mencionó al acuñado, este es un proceso de grabado por efecto de la deformación plástica que sufre el metal al ser sometido a una carga de compresión que genera esfuerzos superiores al de cedencia, lo que se traduce en un endurecimiento superficial, conservando el resto del material su tenacidad y propiedades, si bien se le relaciona con el grabado de las monedas y medallas, en general, este proceso permite producir piezas con tolerancias muy precisas y excelentes acabados, donde la presión requerida para la deformación es del orden de $3\sigma_0$.

CAPÍTULO 10

MÉTODOS DE UNIÓN Y ENSAMBLE

10.1 CONCEPTOS GENERALES

La necesidad de unir o ensamblar partes, a fin de obtener conjuntos o dispositivos que integren maquinaria o equipos utilizados en la vida diaria y en la industria, ha dado lugar al desarrollo de una gran variedad de métodos de unión. La unión de los metales tiene sus antecedentes al inicio de la Edad del Bronce, ya Herodoto [484 a 425 a. C.] escribe en el siglo V antes de Cristo que Glaucos de Chios había inventado la soldadura del hierro. Si bien las técnicas se fueron mejorando a través del tiempo, la unión mediante presión y temperatura permanece como el único proceso, y es hasta inicios del siglo XIX de nuestra era cuando la soldadura extiende sus posibilidades desarrollándose a la par de la propia Revolución Industrial (figura 10.1).

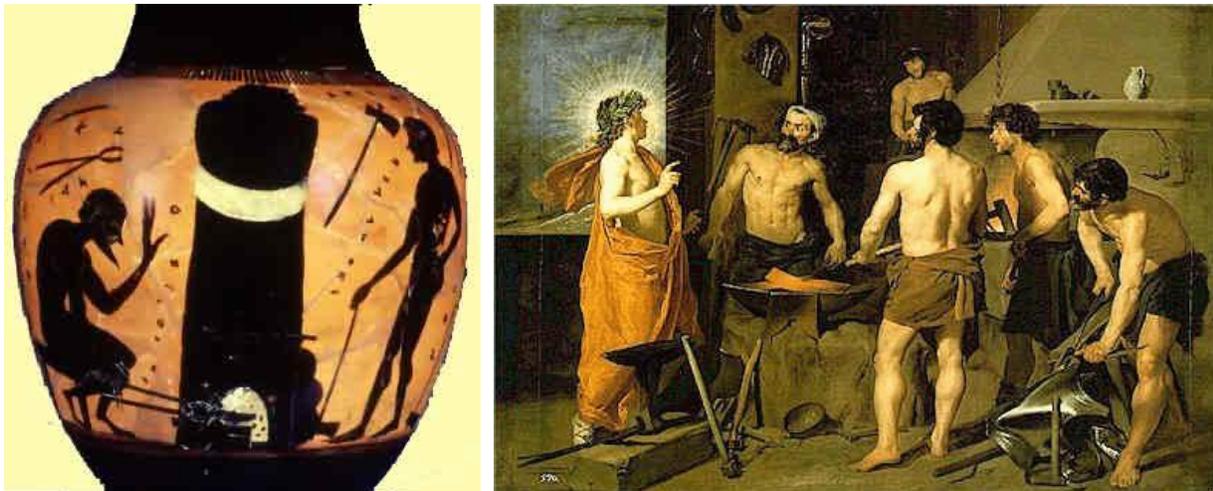


FIGURA 10.1 Pieza de arcilla en donde se muestra a un herrero de la antigua Grecia. Mientras el herrero prepara una pieza de hierro para soldarla, su aprendiz atiza el fuego. [Fechado hacia el 530 a. C.]. Derecha, La forja de Vulcano [Diego Velázquez, 1630, Museo del Prado, Madrid]

Es un error que al hacer referencia a métodos de unión solo se mencione a los utilizados para los metales, ya que miles de años antes, en plena Edad de Piedra, el hombre prehistórico aprendió a utilizar adhesivos provenientes de vegetales y animales, los cuales le permitieron, por ejemplo, unir piedra con madera para producir sus herramientas prehistóricas. Existen estudios que demuestran que 200,000 años a. C. ya se empleaban las resinas vegetales como pegamentos y que para el año 6000 a. C. se comenzaron a utilizar pegamentos naturales modificados. Hasta nuestros días, las ventajas de los pegamentos siguen vigentes, esto es, la posibilidad de unir materiales de naturaleza diferente, menor peso, resistencia a vibraciones, y muchas otras.

Como ya ha sido comentado, la forja de herrero se mantuvo como procedimiento único para la unión de los metales (particularmente del hierro) hasta fines del siglo XIX, en donde para 1882 se patenta, por parte del inventor ruso Nikolai Benardos, el primer procedimiento de unión mediante el calentamiento por acción de un arco eléctrico (soldadura de arco de carbón) procedimiento que, si bien no tiene éxito industrial, sí marca el rumbo en el desarrollo de nuevos métodos de unión. En este método, el arco se generaba entre un electrodo de carbón no consumible y la pieza de trabajo, este procedimiento se puede considerar como el antecedente de la soldadura TIG (electrodo de tungsteno y gas inerte). Para 1890, Nikolai Slavyanov y C. L. Coffin proponen el uso de electrodos metálicos, y para 1900, A. P. Strohmenger desarrolla el primer electrodo revestido, el cual permite un arco más estable y fácil de controlar. En todos los procesos anteriormente enumerados se usaba corriente directa, y los equipos de corriente alterna (CA) se comenzaron a utilizar hasta después de la primera guerra mundial (C. J. Holslag).

Por su parte, la soldadura por resistencia eléctrica fue desarrollada por Elihu Thomps, quien, para 1885, obtuvo las primeras patentes para el proceso. Si bien el acetileno se conocía desde principios del siglo XIX [Edmund Davy, 1836], su aplicación industrial tuvo que esperar al desarrollo del soplete o antorcha para que permitiera su adecuada combustión (1900), de esta forma se convirtió en uno de los métodos más empleados durante la primera mitad del siglo XX, debido a su bajo costo, facilidad de empleo y portabilidad. Para la segunda mitad del siglo, este método fue sustituido por la soldadura de arco con electrodo revestido [FCAW]. La Segunda Guerra Mundial es la que actúa como catalizador para el desarrollo y la mejora de nuevos métodos, situación que se vuelve imperiosa ante la necesidad de producir con mayor rapidez y más bajo costo, logrando así el desarrollo actual.

Los métodos de unión o ensamble, por sus características, se pueden clasificar en:

- a) Permanentes
- b) Desmontables

El primer grupo se caracteriza porque una vez realizada la unión, las piezas no podrán ser separadas a menos que se destruyan tanto el elemento de ensamble y, en ocasiones, las partes unidas; las segundas se pueden desarmar y ser reensambladas sin causar deterioro en las piezas ni en los elementos de unión (figuras 10.2 a 10.5).

Las juntas permanentes se realizan por cualquiera de los métodos siguientes:

- a) Soldadura
- b) Remaches
- c) Adhesivos
- d) Uniones a presión o por interferencia

Las juntas desmontables se realizan mediante:

- a) Elementos roscados (tornillos, tuercas)
- b) Chavetas
- c) Cuñas
- d) Arandelas
- e) Pasadores



(a)



(b)

FIGURA 10.2 a) Soldadura de una estructura submarina, b) El uso de adhesivos permite la unión de materiales diferentes. Ensamble de una tubería de PVC con la instalación hidráulica realizada en tubo de acero galvanizado

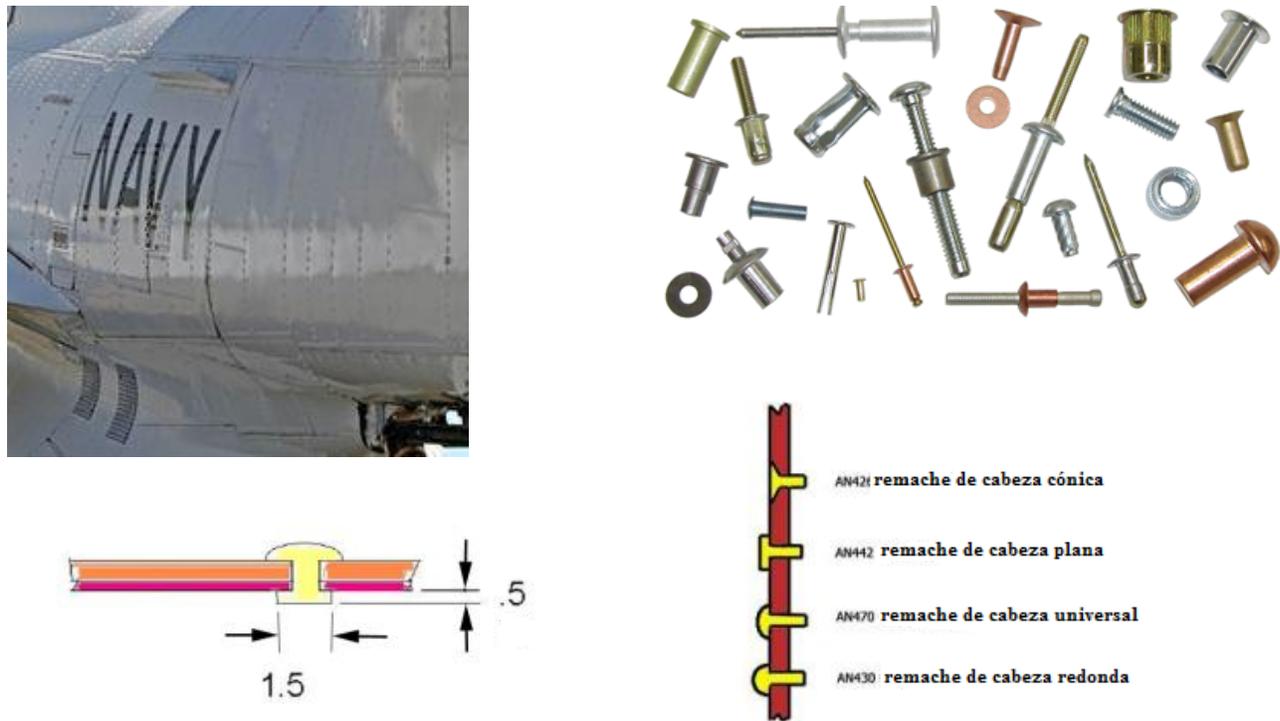


FIGURA 10.3 Las uniones mediante remaches permiten ensamblar materiales de diferente naturaleza, elementos delgados, además de no causar distorsión por efecto del calentamiento. Entre sus desventajas está su mayor costo al requerir operaciones adicionales como es la generación del barreno, además de que las uniones deben ser a traslape



FIGURA 10.4 Si bien los pegamentos son los elementos de unión más antiguos, en la actualidad presentan una máxima sofisticación, ya que lo mismo se pueden utilizar en el ensamble de un avión que para utensilios de la vida diaria, como en zapatos o en equipo electrónico (imagen tomada de InChemPhenoxy Resin)



FIGURA 10.5 Las uniones roscadas son fundamentales en la construcción de cualquier dispositivo. Existe una gran variedad de estas, ya que se pueden emplear diversos materiales [acero, aceros inoxidable, latón, etc.], así como variadas aplicaciones, para madera, para lámina, para maquinaria; de cabeza hexagonal, allen, estrella, etc. (Zhejiang Screw Manufacture Co., Ltd)

10.2 UNIONES MEDIANTE SOLDADURA

Este tipo de métodos son los más comúnmente utilizados para la unión de metales. Se puede clasificar de acuerdo con la forma de calentamiento utilizada y también con el estado que alcanza el material durante su proceso de unión en:

- a) Por el medio de calentamiento
 - Por resistencia
 - Por arco eléctrico
 - Por fricción
 - Con gas
 - Reacción química
 - Otros medios (haz de electrones, láser)

- b) Por el estado del material de base durante el proceso de unión
- En estado sólido
 - Por fusión del material de base (puede o no existir material de aporte)
 - Por fusión del material de aporte (no existe fusión del material de base)

Resulta evidente que un mismo tipo de método puede ser clasificado en diferentes áreas de acuerdo con sus características, por ejemplo, todo los procesos en donde el calentamiento es por resistencia son en estado sólido (en estos se puede alcanzar la fusión en forma localizada en el punto donde están en contacto las dos piezas a unir, sin embargo, no existe evidencia visible de la fusión, ya que si esta se extiende, el material, por efecto de la presión, se perforará), los de arco eléctrico involucran fusión del material de base, pudiendo existir o no material de aporte. Por otra parte, cuando el calentamiento es por gas puede existir fusión del material de base o no, así como también puede o no haber material de aporte.

10.3 SOLDADURA POR RESISTENCIA ELÉCTRICA

En los procesos de soldadura por resistencia eléctrica la coalescencia es producida por el calor generado por efecto de la resistencia al paso de una corriente eléctrica que se presenta en los materiales a unir, así como en la interfase de estos (figura 10.6); situación a la que se suma la aplicación de presión. Debido a que todas las formas de soldadura por resistencia utilizan presión, es posible obtener la coalescencia a temperaturas más bajas que las usadas en soldadura de arco o gas. En consecuencia, en todos los procesos de soldadura por resistencia, con excepción de la soldadura por percusión no hay fusión del metal cuando se realiza correctamente. Además, la aplicación de presión produce una acción de forjado, mejorando la estructura del grano. En virtud de que la temperatura requerida puede obtenerse en una fracción de segundo, las soldaduras por resistencia son muy rápidas y económicas, por lo que tienen amplia aplicación en la producción masiva, por ejemplo, en la unión de carrocerías en la industria automotriz (figura 10.7).

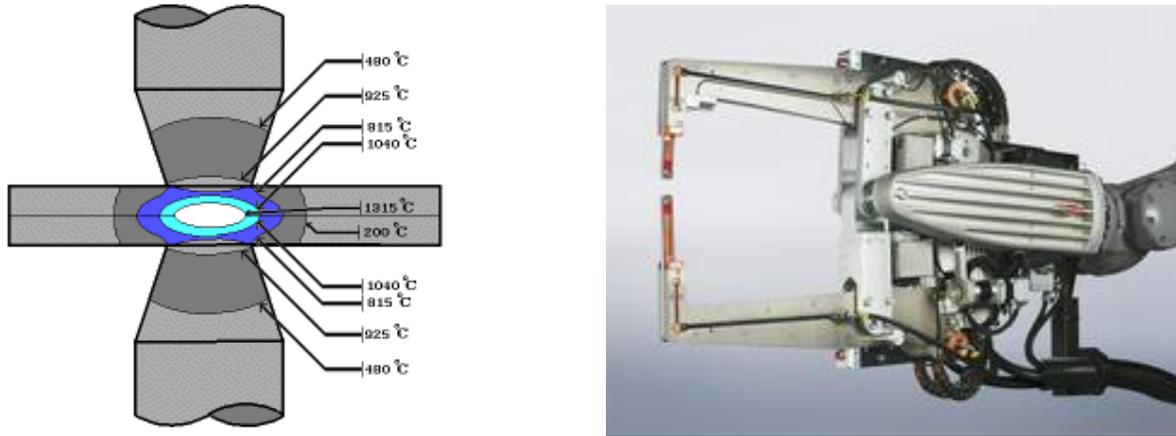


FIGURA 10.6 Perfil de temperaturas durante la soldadura de dos láminas de acero, resulta evidente que la temperatura máxima no alcanza a fundir el material. A la derecha se observa una punteadora portátil montada sobre un robot



FIGURA 10.7 Punteado por resistencia eléctrica de una parte automotriz

El calor para la soldadura por resistencia se obtiene por el paso de la corriente eléctrica a través de la pieza a soldar, en la mayoría de los trabajos se usa corriente alterna (CA), por lo tanto la pieza constituye una parte del circuito eléctrico.

El calor generado en la soldadura puede ser expresado por la relación $Q = RI^2t$ donde Q es el calor generado, R la resistencia del circuito, I la intensidad de corriente y t el tiempo de aplicación de la corriente.

La resistencia total del circuito está formada de tres partes:

- a) la resistencia de las piezas de trabajo
- b) la resistencia de contacto entre los electrodos y el trabajo
- c) la resistencia entre las superficies de contacto de las piezas a unir.

Para que el máximo de temperatura se produzca en el punto de soldadura, es conveniente que la resistencia electrodo-material e interna sea menor que la debida al contacto entre las dos piezas. Dado que los electrodos normalmente son de cobre la condición anterior representa la dificultad para poder puntear láminas de cobre o aluminio.

Para mantener baja su temperatura los electrodos son enfriados con agua. Cuando se sueldan materiales de diferente espesor o conductividad, pueden llevarse simultáneamente a la temperatura de soldadura, usando un electrodo de mayor conductividad sobre el material más delgado.

El control de la presión en este proceso es muy importante, debido a que afecta la resistencia de contacto, permite soldar a temperaturas más bajas y produce la acción de forjado.

Si la presión es muy baja, se aumenta la resistencia de contacto y provoca la quemadura de las superficies y la picadura de los electrodos. Si fuera muy alta, se ocasiona que se genere metal fundido el cual puede proyectarse de las superficies de unión o que la pieza se marque con los electrodos. La práctica recomendada es aplicar presión moderada antes y durante el paso de corriente para asegurar una buena resistencia de contacto y luego aumentar considerablemente la presión para completar la coalescencia y forjar la soldadura.

En la soldadura por resistencia se cuida de mantener la presión y las condiciones de la superficie uniformes para regular la temperatura de soldadura, controlando la magnitud y duración de la corriente de soldadura.

Soldadura por puntos

La soldadura por puntos es el tipo más simple y más usado de las soldaduras por resistencia. Se usan electrodos de cobre con puntas de área reducida, lo que resulta en soldaduras generalmente redondas con diámetros que van de dos a doce mm, figura 10.8.

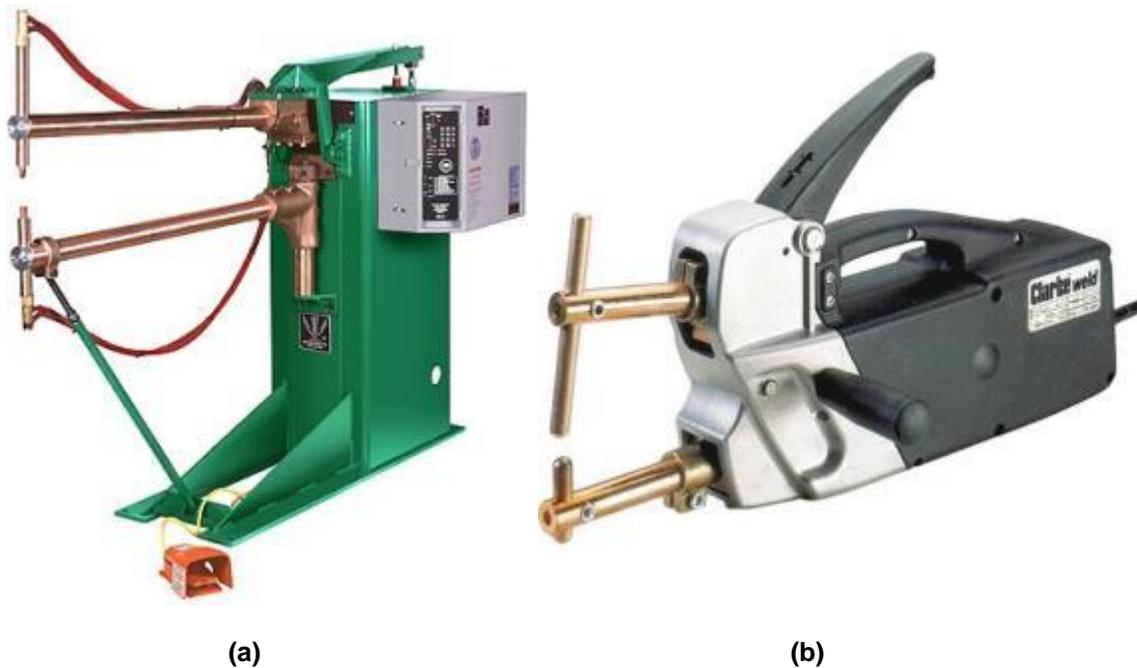


FIGURA 10.8 Máquinas punteadoras: **a)** Estacionaria, **b)** Portátil

El ciclo de soldadura se inicia cuando los electrodos ejerciendo presión, se ponen en contacto con el metal antes de aplicar la corriente y por un período conocido como tiempo de presión. Ahora se cierra el circuito a través de los materiales a unir, ya que provoca que estos eleven rápidamente su temperatura, los electrodos presionan a las láminas y juntas se completa la soldadura, este período es de 3 a 30 ciclos y se conoce como tiempo de soldadura. Enseguida, y con la presión aún aplicada, se desconecta la corriente por un período que se llama tiempo de

sujeción durante el cual el metal recupera su resistencia mecánica al enfriarse. Finalmente, se quita la presión y la pieza se retira de la máquina o se mueve para soldar otro punto; este es el tiempo de salida. Todos los tiempos se miden en función de ciclos de corriente y, generalmente, varían de 3 a 60 (1 ciclo = 1/60 s).

Las máquinas de soldadura por puntos se fabrican en 2 tipos generales: máquinas de estacionarias y portátiles.

En cuanto al accionamiento, esto puede ser por brazo oscilante y lineal, figura 10.9. En el tipo de brazo oscilante, el electrodo inferior es estático y el superior, móvil. El movimiento del brazo oscilante se realiza alrededor de un pivote y puede ser controlado por un pedal con resorte por un cilindro neumático o por un motor eléctrico.

Las máquinas operadas por pedal se emplean para trabajos de pequeño volumen o livianos, mientras que las máquinas con cilindro neumático se usan para producción en serie.

Se dispone de máquinas de brazo oscilante con alturas de garganta de 30 a 170 cm y potencia de transformador de 10 - 50 kVA.

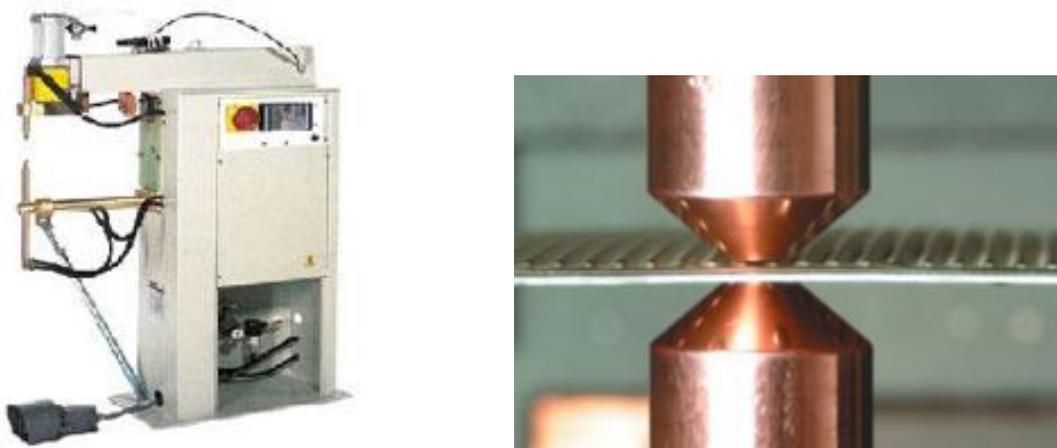


FIGURA 10.9 Máquina punteadora con brazo oscilante. Derecha, detalle de los electrodos

En las soldadoras por puntos de tipo de presión, el movimiento del electrodo superior es comandado mediante un cilindro neumático o hidráulico, las cuales se emplean para trabajos pesados o de alta producción.

Las máquinas del tipo de presión se fabrican en una gran variedad de tamaños con capacidades hasta de 500 kVA, donde es común una altura de garganta de 1.50 m. Existen soldadoras de punto tipo prensas que realizan varias soldaduras en una sola operación. En las plantas automotrices se emplea este tipo de soldadura, para lo cual se dispone usualmente de varios robots que realizan la soldadura de la carrocería.

Las máquinas portátiles tienen su aplicación cuando las piezas a soldar son demasiado grandes para ser llevadas a las máquinas estacionarias. Las máquinas portátiles se construyen en una amplia variedad de diseños, según la ubicación de las soldaduras.

Los sistemas portátiles se conectan a la fuente de alimentación y a la unidad de control mediante cables eléctricos flexibles y mangueras de agua para enfriamiento. Este tipo de equipos es ampliamente usado en la producción en masa de vagones ferroviarios, automóviles y, en general, piezas formadas por la unión de láminas o placas relativamente delgadas. Velocidades de producción de hasta 300 soldaduras por minuto son comunes con estos equipos.

El límite práctico del espesor que puede ser soldado por puntos, por el proceso común, es de aproximadamente 3 mm si cada pieza tiene el mismo espesor. Piezas delgadas pueden ser soldadas a placas con espesores mayores de 3 mm. Se han logrado soldar placas de acero de 12 mm de espesor, sustituyéndose así a las juntas remachadas.

El número de materiales y combinaciones que pueden ser soldadas por puntos es muy grande, sin embargo, este método encuentra su principal aplicación en la unión de chapa de acero de bajo carbono.

Soldadura de costura

La soldadura de costura consiste en una serie de soldaduras de punto sobrepuestas, que de este modo forman una soldadura continua, figura 10.10.

Los electrodos para la soldadura de costura son generalmente dos discos que giran. Cuando el material pasa entre los electrodos se conecta y desconecta la corriente de soldadura, de modo que forme soldaduras elípticas individuales que se sobreponen.

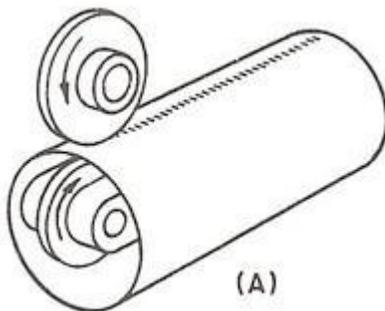
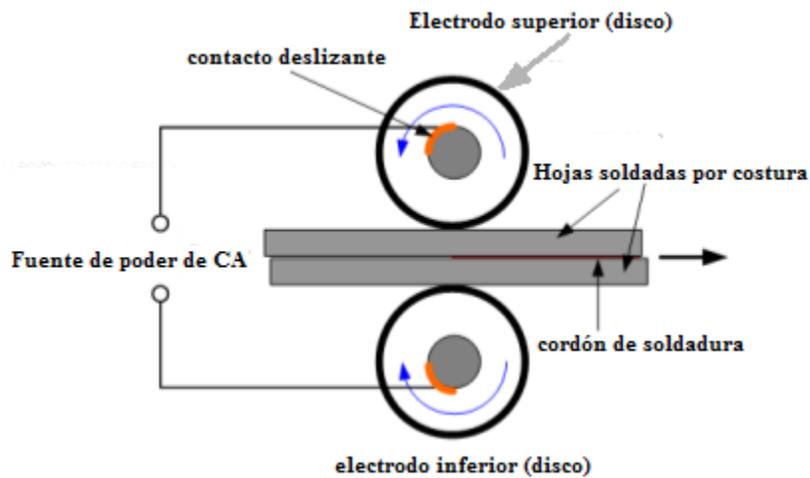
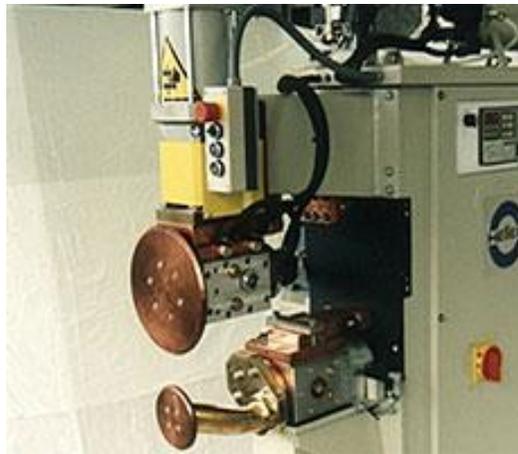


FIGURA 10.10 Soldadura de costura. En este caso se dispone de dos electrodos en forma de disco los cuales generan una sucesión de puntos

La duración de las soldaduras y el movimiento de la pieza deben ajustarse de manera que las piezas no se calienten demasiado. Con frecuencia se usa enfriamiento exterior para evitar recalentamientos.

Pueden usarse formas especiales de electrodos recortados para poder hacer soldaduras de costura en una gran variedad de productos.

La soldadura de costura se usa fundamentalmente para la producción de tanques herméticos para líquidos o recipientes de presión, tales como tanques de gasolina, silenciadores de automóvil, etc.

Soldadura de proyección o de salientes

La soldadura de proyección o de salientes es similar a la soldadura por puntos (figura 10.11). Las soldaduras de proyección se producen en puntos localizados en las piezas de trabajo, mantenidas bajo presión entre electrodos adecuados. Las láminas metálicas que se van a soldar pasan primero por una prensa punzonadora que efectúa pequeños resaltes o botones en el metal, cuyos diámetros en la cara son iguales al espesor de la lámina y que se elevan sobre la superficie alrededor del 60% del espesor de la lámina. Tales resaltes o surcos se hacen en las zonas donde se desea soldar.

Este proceso se usa también para soldar alambres cruzados y para partes en que los surcos se producen por mecanizado. Una de las ventajas de esta forma de soldadura es que se efectúan simultáneamente un gran número de soldaduras.

El límite para el número de soldaduras, es la capacidad que tenga la prensa para distribuir uniformemente la corriente y la presión sobre las piezas.

Los resultados son generalmente uniformes y la apariencia de la soldadura es mejor que la de la soldadura por puntos. La vida de los electrodos es larga, puesto que solo se usan superficies planas por lo que requieren un mínimo mantenimiento.

La secuencia de las operaciones es idéntica a la de la soldadura por puntos, la corriente es ligeramente menor pero, debido a que se hacen soldaduras múltiples, debe disponerse de mayor capacidad de corriente y de presión. Solo se recomiendan máquinas del tipo de prensa para este proceso. Es posible unir los mismos metales que mediante soldadura por puntos.

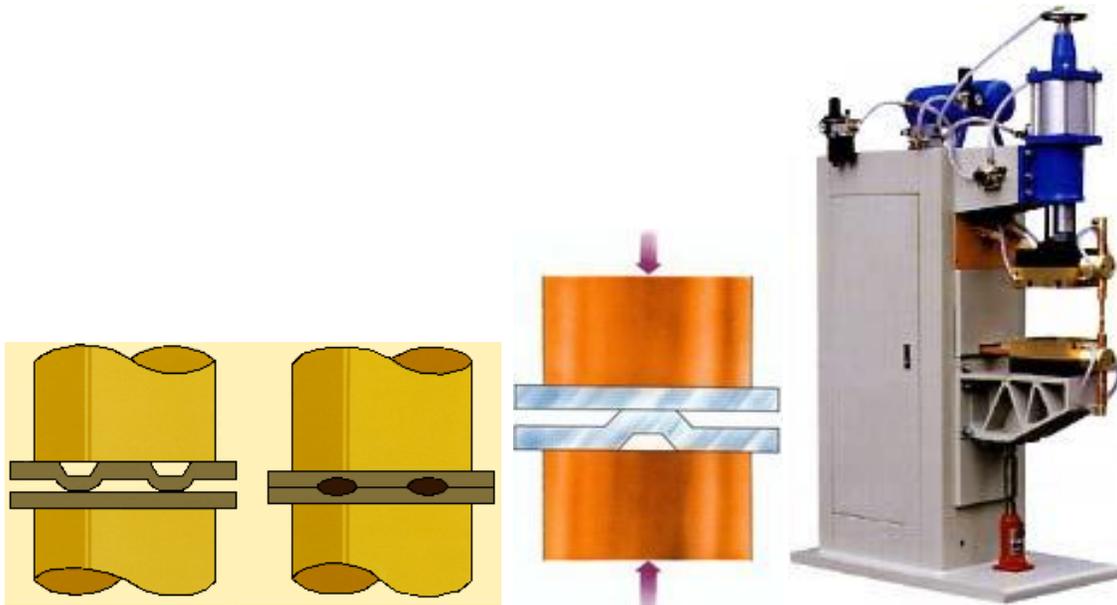


FIGURA 10.11 Soldadura por proyección. En este caso, a las piezas por unir se les forma un pequeño resalte a saliente que será aquella zona en donde se formen los puntos de unión

Soldadura por percusión

Las partes a soldar se sujetan en la máquina y se mantienen separadas, contra pesados resortes de compresión por un mecanismo de sujeción. Un elevado voltaje se aplica al obtener la energía acumulada en un capacitor, generando un arco que se extingue cuando las piezas hacen contacto. El calentamiento y la fuerza de impacto promueven el recalado de los materiales y su unión.

Al disminuir la distancia entre las piezas a menos de 1 mm, se produce la descarga del capacitor estableciéndose un arco eléctrico. Debido a que las partes chocan rápidamente, el arco que se establece se extingue, disipando de 200 a 300 kW en menos de 0.001 s.

El arco es suficiente para calentar las superficies de las piezas a la temperatura de soldadura, y la fuerza de percusión ejercida sobre las piezas completa la unión. Dado que la duración del arco es tan corta, la fusión queda confinada a las superficies que se sueldan, penetrando en la pieza solo algunas centésimas de milímetro, figura 10.12.

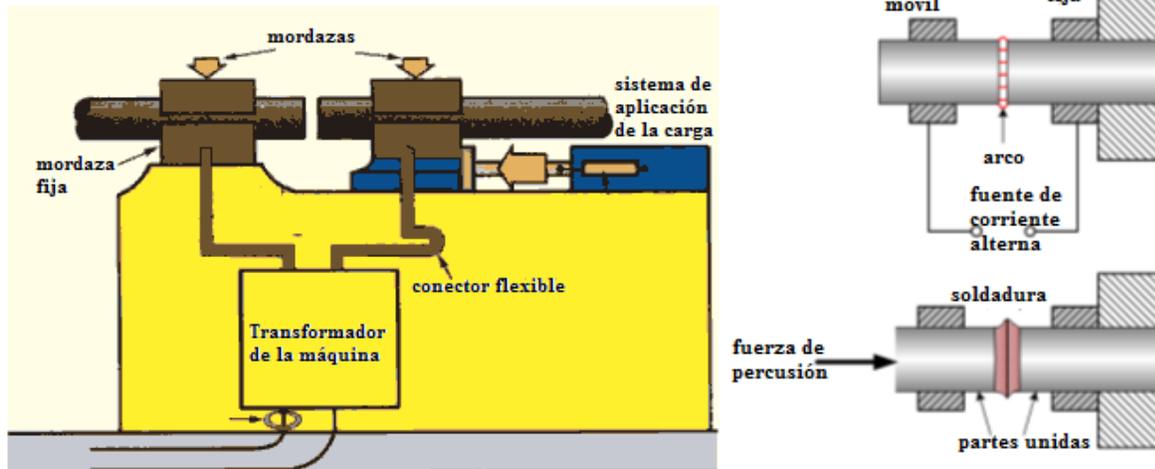


FIGURA 10.12 Descripción esquemática de la soldadura por percusión

Ventajas y limitaciones de las soldaduras por resistencia

Los distintos procesos de soldadura por resistencia presentan una diversidad de ventajas que los hacen particularmente adecuados para la producción en masa.

1. La soldadura es muy rápida.
2. El equipo es semiautomático pudiendo automatizar los diferentes procesos sin mayor inconveniente.
3. Es económico ya que no requiere material de aporte.
4. No se requieren operadores especializados.
5. Metales diferentes pueden unirse.
6. Se logran soldaduras confiables y reproducibles.

Principales desventajas

1. Alto costo inicial del equipo.
2. Limitaciones en cuanto al tipo de uniones que pueden hacerse.
3. Para algunos materiales se requiere una preparación previa

Estas limitaciones se pueden obviar cuando se trata de grandes volúmenes de producción.

10.4 SOLDADURA FALSA

Con este nombre se conocen las soldaduras efectuadas antiguamente con aleaciones de PbSn, mientras que en la actualidad se emplea Sn libre de Pb y de Cd, así como también aleaciones de cobre (CuSn, CuNi, CuZn). Es por demás evidente que la resistencia de la unión puede variar de manera significativa al pasar de metales blandos como el estaño a las aleaciones de cobre (generalmente, CuZn40); por tal motivo se clasifican estas uniones en:

1. Soldaduras blandas
2. Soldadura fuerte

Dadas las restricciones que existen con relación al uso de plomo en general, las soldaduras blandas en la actualidad, se realizan con base a estaño y aleaciones de este.

Este tipo de uniones se efectúan mediante aleaciones cuyo punto de fusión es inferior al de los metales por unir. Las soldaduras blandas emplean materiales de aporte con temperaturas de fusión menor a 425 °C, por su parte, las soldaduras fuertes utilizan materiales que pueden requerir temperaturas de fusión superiores a los 900 °C. Durante la operación fluye el material de aporte entre las piezas calientes a unir que se conservan en estado sólido, el metal líquido se difunde con base a sus propiedades de capilaridad, las cuales se afectan negativamente cuando las superficies presentan grasas, aceites, polvo y, en general, suciedad evitando el mojado de las superficies a unir. La holgura entre las superficies debe ser la mínima necesaria para que el material fluya a través de estas por fenómenos de capilaridad, garantizando así la mayor resistencia de la unión. En términos generales se logra una mejor unión para pequeñas holguras (menores a 0.1 mm). De acuerdo con la holgura existente entre las piezas por unir, la resistencia de la soldadura puede variar entre la del material de aporte y la de base.

El proceso es muy adecuado cuando se trata de materiales delgados o cuando solo se requiere garantizar continuidad o estanqueidad.

Los requisitos de una unión de este tipo dependerán de la aplicación que va a tener la pieza soldada. Por ejemplo, en el caso de la soldadura blanda:

- a. Estanquidad en el caso de recipientes (botes y latas de conservas), tuberías, radiadores automotrices de Cu-latón
- b. Continuidad eléctrica. En el caso de cables y conectores.
- c. Resistencia a la corrosión, por ejemplo, en tuberías y latas.

- d. Igualdad de color con las piezas por unir (objetos de tipo decorativo).
- e. Rapidez y facilidad de ejecución (costo).
- f. Mínimo calentamiento.
- g. Se pueden deformar fácilmente.

Durante mucho tiempo, la principal soldadura blanda la representó el eutéctico de PbSn; el plomo puro funde a 327 °C y el estaño a 232 °C, la aleación de 65% de estaño y 35% de plomo es un eutéctico y funde a 182 °C, y se emplea sobre todo en la unión de componentes eléctricos y electrónicos. Un porcentaje mayor de estaño en el material de aporte le da mayor dureza y resistencia. Como ya fue comentado, a la fecha se comercializan soldaduras bajas en Pb para cumplir con criterios ambientales.

Considerando el material de aporte, las soldaduras blandas se clasifican en 3 grupos:

Grupo A. Soldaduras plomo-estaño y estaño-plomo con diferentes contenidos de antimonio y Pb, se emplean para estañados y trabajos en lámparas. Para equipo eléctrico y electrónico se empleaba como material de aporte la 63Sn37Pb, con una temperatura de fusión de 183 °C.

Grupo B. Soldaduras estaño-plomo con adición de cobre y plata. Contienen 60% de Sn, hasta 0.3% Cu y el resto Pb. Se emplea en la construcción de aparatos eléctricos.

Grupo C. Soldaduras especiales de SnCu₃ y SnAg

A la fecha la EPA y la FDA de EUA (agencia para la protección del ambiente y la administración para los alimentos y medicinas) han prohibido la presencia de plomo en la soldadura de las latas para alimentos; por su parte, en México es vigente la norma NOM-002-SSA1-1993. "SALUD AMBIENTAL. BIENES Y SERVICIOS. ENVASES METALICOS PARA ALIMENTOS Y BEBIDAS. ESPECIFICACIONES DE LA COSTURA. REQUISITOS SANITARIOS", la cual indica que es inaceptable la presencia de plomo en la soldadura utilizada en la fabricación de envases para alimentos, todo lo anterior es producto de los efectos tóxicos de este. Es por eso que a la fecha las latas de tres piezas se producen por soldadura eléctrica con hilo de cobre.

Las soldaduras blandas se suministran en forma de lingotes, cintas, láminas o barra, en forma de alambre macizo o hueco con alma de fundente y en forma de polvo.

Existen soldaduras blandas especiales que contienen Cadmio o Bismuto cuyos puntos de fusión varían de 60 a 160 °C.

Los fundentes empleados en las soldaduras blandas son fundamentales para lograr la unión de los materiales, estos promueven que el material de aporte moje las superficies a ensamblar, en general permiten eliminar las grasas y depósitos de corrosión; asimismo, evitan la contaminación durante el proceso de soldadura. Se encuentran en forma de pasta, polvos, gel y líquidos. Como fundentes se emplean boratos, ácido bórico, fluoruros, agua acidulada (se prepara disolviendo en agua Cloruro de Zinc, o bien con ácido clorhídrico diluido, al cual se le añaden recortes de Zn; en esta reacción se desprende hidrógeno por lo que es necesario tener precaución). Estos se emplean para soldar acero, latón, estaño y cobre.

TABLA 10.1 Diferentes aleaciones utilizadas como material de aporte para soldadura fuerte y blanda. Aleaciones AgCuZnCd

Tipo	COMPOSICION %				DIN 8513	AFNOR A81362	APLICACIONES
	Ag	Cu	Zn	Otros			
AgCu15Zn17Cd18	50	15	17	18 Cd	L-Ag 50 Cd	-	Para soldar plata, cobre, aleaciones de cobre, acero, acero inoxidable, níquel, aleaciones de níquel, tungsteno.
AgCu16Zn17Cd22	45	16	17	22 Cd	L-Ag 45 Cd	45A1	
AgCu19Zn21Cd20	40	19	21	20 Cd	L-Ag 40 Cd	40A1	
AgCu22Zn24Cd20	34	22	24	20 Cd	L-Ag 34 Cd	35A1	
AgCu28Zn21Cd21	30	28	21	21 Cd	L-Ag 30 Cd	30A1	
AgCu40Zn25Cd15	20	40	25	15 Cd	L-Ag 20 Cd	20A2	
AgCu38Zn24Cd18	19	38	24,5	18 Cd	---	---	
AgCu50Zn31Cd7	12	50	31	7 Cd	L-Ag 12 Cd	-	

Aleaciones AgCuZn

	Ag	Cu	Zn	Otros	DIN 8513	AFNOR A81362	
AgCu30Zn26	44	30	26	-	L-Ag 44	44 A1	Para soldar plata, cobre, aleaciones de cobre, acero, acero inoxidable, níquel, aleaciones de níquel, tungsteno.
AgCu41Zn34	25	41	34	-	L-Ag 25	25A1	
AgCu44Zn36	20	44	35.8	Si	L-Ag 20	20A1	
AgCu48Zn40	12	48	40	-	L-Ag 12	-	
AgCu22Zn17	56	22	17	5 Sn	L-Ag 55 Sn	-	
AgCu27Zn25Sn3	45	27	25	3 Sn	L-Ag 45 Sn	-	
AgCu36Zn27Sn3	34	36	27	3 Sn	L-Ag 34 Sn	-	
AgCu36Zn32Sn2	30	36	32	2 Sn	L-Ag 30 Sn	-	

TABLA 10.1 Diferentes aleaciones utilizadas como material de aporte para soldadura fuerte y blanda. Aleaciones AgCuZnCd (continuación)**Aleaciones CuPAg**

Tipo	COMPOSICION %				NORMAS		APLICACIONES
	Ag	Cu	Zn	Otros	DIN 8513	AFNOR A81362	
CuAg15P5	15	80	-	5 P	L-Ag 15 P	05 B1	Cobre y aleaciones de cobre. Para soldar cobre con cobre no es necesario usar fundente.
CuAg56P	5	89	-	6 P	L-Ag 5 P	06 B2	
CuAg2P6	2	91.5	-	6.5 P	L-Ag 2 P	06 B1	
CuP8	-	92	-	8 P	L-Cu P 8	08 B1	
CuP7	-	93	-	7 P	L-Cu P 7	07 B1	
CuP6	-	94	-	6 P	L-Cu P 6	-	

Latones

Tipo	COMPOSICION %				NORMAS		APLICACIONES
	Ag	Cu	Zn	Otros	DIN 8513	AFNOR A81362	
CuZn40	-	60	39.7	Si	L-Cu Zn 40	60 C1	Para soldar hierro, acero, cobre, aleaciones de cobre.
CuZn40Sn	-	59	40.0	Si, Sn, Mn	L-Cu Zn 39 Sn	-	
CuZn40Ni3	-	57	39.6	3 Ni, Si	-	-	

Aleaciones de estaño

ALEACION	COMPOSICIÓN		INTERVALO de fusión (°C)	NORMA DIN 1707	DENSIDAD gr./cc	COND.ELECT m/ mm ²
	Sn	Cu				
SnCu3	97	3	-	-	-	-
Sn-Ag 3,5%	96.5	3.5	221	---	7.3	7.5
Sn-Ag 6%	94	6	221-240	L-SnAg5	7.3	8.1
Sn-Ag 8%	92	8	-	-	-	-

Entre el metal líquido y la superficie de los metales sólidos se producen, en condiciones favorables, aleaciones de estos elementos, las cuales presentan mejores propiedades mecánicas que el material de aporte. Si la soldadura y los metales a unir tienden a alearse, basta que uno de los metales sea líquido. La resistencia de la capa de la junta aleada es más elevada que la del metal de aporte. Las uniones con pequeño espesor de soldadura tienen mayor resistencia. Cuando el espesor de la soldadura es pequeño y las condiciones de unión son favorables, se alea todo el metal de la falsa soldadura con el material de las piezas unidas (véase la figura 10.13).

El pequeño espesor de separación entre las piezas (0.03 - 0.02 mm) favorece el flujo de la soldadura por capilaridad.

Para lograr una buena unión, se requiere que:

- a) Las partes a soldar estén libres de grasa y óxidos. Durante la operación de unión hay que evitar la formación de una nueva capa óxido, lo cual se consigue empleando fundentes.
- b) La capa de material de aporte debe ser tan delgada como sea posible, para esto es necesario que las piezas y el material de unión presenten en la zona a soldar la temperatura de trabajo, entendiéndose por tal, la mínima de la superficie de la pieza a la cual la soldadura moja, fluye y se alea.

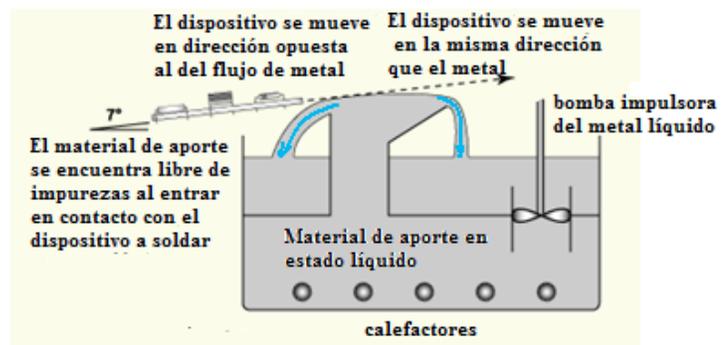
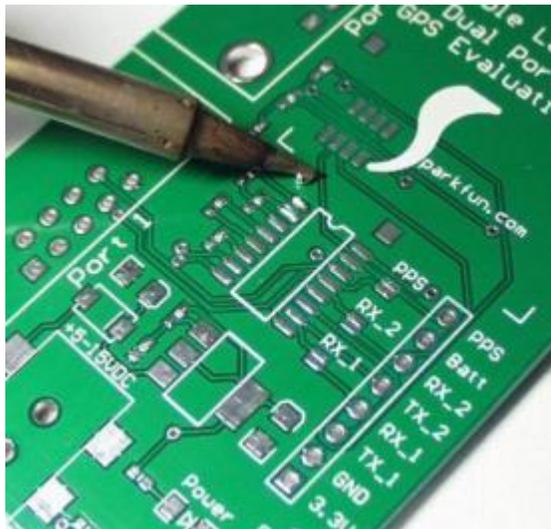


FIGURA 10.13 Ejemplos de aplicación de soldadura blanda. En la parte inferior se muestra una máquina para soldadura por ola y su principio de operación

El proceso de soldadura se realiza en 3 etapas:

1. **MOJADO** (humectación). Después de haber alcanzado la temperatura de trabajo y de haber actuado el fundente, este es empujado por el metal fundido y comienza a mojar la superficie de la pieza (se establece contacto íntimo entre soldadura y pieza).
2. **FLUJO**. El metal de soldadura en estado líquido expulsa al fundente de la holgura existente entre las piezas a soldar y la llena.
3. **ALEACIÓN**. El metal que fluye penetra en las zonas marginales de las piezas a soldar a lo largo de los límites de los granos y se alea con ellos. La profundidad de penetración es pequeña. Por encima de la temperatura de trabajo máxima, se vaporizan componentes de aleación del metal de aporte, se presenta crecimiento de grano y se reduce la eficiencia del fundente, así como la resistencia de la parte soldada.

Soldaduras fuertes o duras

Las temperaturas de trabajo de estas soldaduras están por arriba de los 450 °C y se emplean cuando se requiere una unión resistente o cuando los metales a unir no se prestan para usar soldaduras blandas (metales preciosos). La costura de soldadura fuerte debe poderse doblar o curvar y ser maleable y en ocasiones tener el mismo color de las partes a unir. Los metales empleados para soldaduras fuertes (tabla 10.1) se clasifican según su composición, su aplicación y su temperatura de trabajo.

Para la unión de materiales ferrosos se emplea Cu y sus aleaciones, asimismo, estos se aplican a piezas de Ni y Cu. Las adiciones de Zn, Sn y P determinan las temperaturas de trabajo de las soldaduras, las cuales varían de 710 a 1100 °C. El material de aporte se suministra en forma de alambres y barras principalmente.

Cobre exento de oxígeno, con temperatura de trabajo mayor a 1100 °C.

Latón CuZn40. Sus temperaturas de trabajo son del orden de 1000 °C. Se pueden utilizar para unir laminas o tubos delgados de aceros, así como para aleaciones de Cu y de Ni.

Aleaciones con un mínimo del 20% de plata.

Aleaciones de plata-cobre-cadmio. Sus temperaturas de trabajo son del orden de los 600 a 650 °C, se pueden utilizar en para soldar acero, fundición maleable y cobre.

10.5 PROCESOS DE SOLDADURA POR FUSIÓN

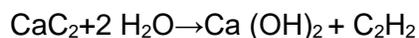
Clasificar a los procesos de soldadura en función de la presencia de metal fundido no representa una forma clara de poder distinguirlos ya que en estos procesos se presenta fusión del material de aporte, de existir este, pudiendo o no presentarse fusión del material de base, por consecuencia se ponen en una misma clase la falsa soldadura y los procesos de soldadura de arco. Ahora bien, para la falsa soldadura se pueden utilizar sistemas de calentamiento con gas. Se clasifican en función de la fuente de calor utilizada. Resulta por demás evidente que los procesos de falsa soldadura (fuerte y blanda) caen en esta clasificación así como todos los métodos por arco eléctrico y donde el calentamiento es por gas (acetileno y oxígeno; gas LP y oxígeno); por consecuencia de todo lo antes mencionado se presentaran algunos procesos organizados estos en función de su método de calentamiento.

Soldadura con gas

La soldadura con gas abarca todos los procesos donde se usan gases combinados para obtener una fuente de calor. Los más usados son el acetileno, el gas natural o gas L.P. y el MAPP (denominación comercial de Petromont, anteriormente perteneciente a DOW, se trata de una mezcla estabilizada de metilacetileno y propadieno); todos estos combinados con oxígeno. La soldadura oxihidrógeno fue el primer proceso que se desarrolló comercialmente. La máxima temperatura obtenida en este proceso es de 1680°C. El gas natural o gas licuado de petróleo (Gas LP) se usa eventualmente como sustituto del acetileno, dado su menor costo y facilidad de obtención, como desventaja se tiene sobre todo una menor temperatura de flama. Si bien el procedimiento es idéntico a la soldadura y corte con oxiacetileno, se tiene que en el caso de utilizar gas LP la cámara de combustión del soplete es diferente ya que la relación gas combustible-oxígeno va a modificarse. La combinación principal y cuyo uso está más generalizado es la de acetileno y oxígeno conocida como soldadura oxiacetilénica o soldadura autógena.

La soldadura oxiacetilénica se produce por el calentamiento con una llama, obtenida de la combustión de oxígeno y acetileno que alcanza una temperatura de 3200 a 3500 °C, puede usarse material de aporte o no. En la mayoría de los casos, la junta se calienta hasta un estado de fusión y por regla general, no se usa presión.

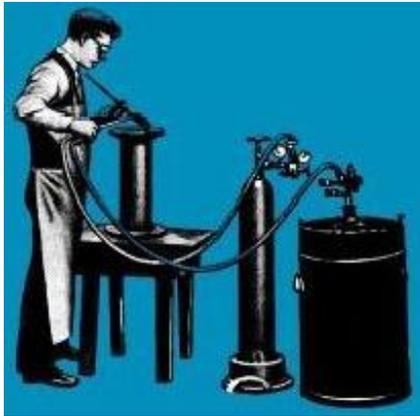
El acetileno (C_2H_2 ; HCCH) se obtenía hasta mediados del siglo XX vertiendo piedras de carburo de calcio en agua. Las burbujas de gas suben a través del agua y el carburo de calcio se convierte en hidróxido de calcio (cal apagada), esto de acuerdo con:



(carburo de calcio) + (agua) = (cal apagada) + (gas acetileno)

Reacción que fue descubierta por Friedrich Wöhler en 1862, actualmente este se produce a través de la combustión parcial del metano o por la fractura de cadenas de hidrocarburos. El acetileno es el gas combustible de uso común que alcanza la temperatura de combustión más elevada y el tercero en cuanto a flamas químicas naturales siendo solo superado por el cianógeno (4500 °C) y el dicianoacetileno (5000 °C). El calentamiento con flama de acetileno fue uno de los procesos de soldadura más utilizados hasta mediados del siglo XX cuando los procesos de arco tomaron el primer lugar por su versatilidad, posibilidad de aplicar para la unión de espesores mayores y la rapidez del proceso, así como por sus costos. En la actualidad, el proceso de oxisoldadura se mantiene vigente en aplicaciones artísticas (figura 10.14) y cuando se requiere unir piezas de pequeño espesor o composición diferente.

Un problema que se presentó desde el inicio del uso de la oxisoldadura, y por consecuencia del acetileno, fue la inestabilidad de este, ya que no puede almacenarse con seguridad a presiones muy superiores a 1 bar. El acetileno presenta una densidad de 1.097 kg m^{-3} y una temperatura de ebullición de 189 °K, no es especialmente tóxico, pero al ser producido por el proceso Wöhler produce compuestos organofosforados (fosfina PH_3) y organoarsénicos (arsina AsH_3) donde sobre todo este último es un gas extremadamente venenoso. Las reacciones que produce el acetileno y los compuestos que se generan durante su proceso son extremadamente flamables e inestables con reacciones fuertemente exotérmicas. El acetileno puede explotar con extrema violencia si la presión excede de 200 KPa, es por consecuencia que debe de almacenarse diluido en acetona o dimetilformamida contenida en un cilindro metálico de material poroso (Agamassan –masa AGA, esto por la empresa que lo patentó), asbesto o tierra de diatomeas. De esta forma se puede almacenar con seguridad hasta a presiones 18 bares. La masa o compuesto AGA (Agamassan) es una masa porosa absorbente empleada para que se pueda manejar en forma segura el acetileno y, por consecuencia, permite su aplicación comercial. Esta fue desarrollada y patentada por Gustaf Dalen (quien recibió el premio Nobel de Física por su desarrollo de los reguladores automáticos y acumuladores de gas).



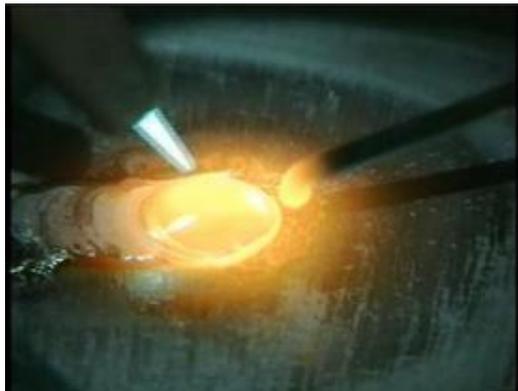
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

FIGURA 10.14 La soldadura con oxigas fue uno de los procesos principales hasta la década de 1950, actualmente, se emplea en procesos de reparación artesanías y trabajos artísticos y con cambio de soplete para operaciones de corte de aceros. En la figura (a) se muestra una imagen de este proceso a inicios del siglo XX; en (b) y (c) se presentan aplicaciones del proceso. En la figura (d) se muestra la típica flama durante la soldadura, así como su material de aporte. En (e) se muestra el proceso de corte con oxigas

En 1896, Georges Claude [1870-1960], ingeniero e inventor francés sabiendo de las explosiones que se habían generado durante el uso del acetileno encontró, en 1896, que este podía disolverse en acetona y obtener así una mezcla no explosiva. Para evitar que se formara gas en la superficie de la solución, se procedió a mantener esta mezcla en un medio poroso. Posteriormente, Dalen formó la compañía AGA, transnacional dedicada a la producción de gases industriales. En la actualidad, todo el acetileno es manejado en recipientes llenos con la masa AGA, donde la masa original consistía de asbestos cementos y carbón, la patente americana de esta menciona además la presencia de tierra de diatomeas.

Para el calentamiento necesario de la unión, se puede modificar la proporción combustible comburente de tal forma que la flama puede ser neutra, oxidante o reductora, donde la selección del tipo de este será determinada por la operación a realizar.

La llama reductora o carburante contiene exceso de acetileno, se usa para soldar monel, níquel, algunos aceros aleados, aceros al carbono y muchos de los metales no ferrosos, aunque la más usual es la neutra. La flama carburante o reductora se requiere para reducir óxidos presentes en la unión. El exceso de acetileno se quema alrededor del cono blanco central, figura 10.15.



FIGURA 10.15 Soplete (antorcha) para soldadura y para corte

La llama neutra es la que tiene mayor aplicación en procesos de soldadura y corte, y se obtiene con una proporción de 1 a 1 de acetileno y oxígeno; de esta forma, se logran temperaturas de 3300 a 3500 °C. El cono interior es regular y está perfectamente definido, figura 10.16. Durante el proceso, la boquilla se calienta lo que puede ocasionar inconvenientes, es necesario reajustar la flama para mantenerla en estado neutro. Se puede aplicar para aceros inoxidable, aluminio, hierro colado, níquel, cobre y monel entre otros.

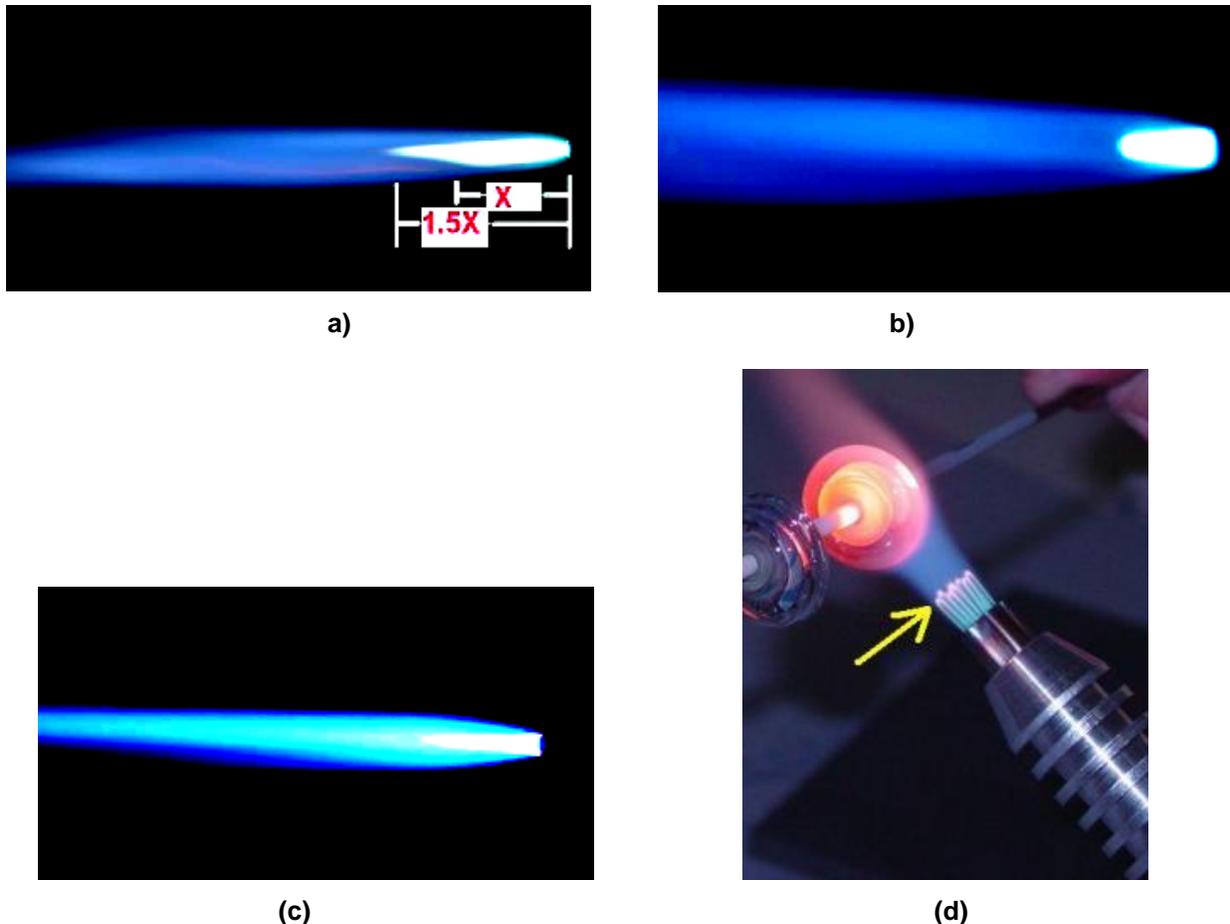


FIGURA 10.16 a) Flama carburante, cono interior no preciso; b) Flama neutra, cono interior bien definido; c) Flama oxidante, doble cono, con el interior corto, d) Flama neutra

La llama oxidante contiene exceso de oxígeno y se emplea en la soldadura de latón y bronce, siendo indeseable en otras aplicaciones. El cono secundario es muy corto debido a que se tiene muy poco acetileno, el oxígeno tiende a reaccionar con el metal, por esta razón, este tipo de flama es utilizada al unir latones para evitar la eliminación de zinc, la flama es ligeramente más caliente que la neutra, figura 10.17.



FIGURA 10.17 Soplete (antorcha) para corte con oxígeno

Gas MAPP. Se trata de otro gas combustible (actualmente ya en desuso), su nombre es una marca comercial perteneciente a PETROMONT, basado en una mezcla estabilizada de metilacetileno y propadieno. Es también utilizado con el nombre genérico de UN 1060, es un sustituto más seguro y fácil de emplear que el acetileno, sin embargo, y a pesar de conocerse hace más de 30 años no ha sustituido a este, razón por la que fue discontinuado en 2008, ya que es más económico y sencillo el empleo de gas LP (su costo es del orden de 4 veces el del gas LP). Su temperatura de flama es cercana a los 2950 °C, en este aspecto presenta ventaja con relación al gas LP, ya que este alcanza temperaturas de flama de tan solo 2000 °C. El MAPP tiene la ventaja sobre el acetileno al no requerir disolución o métodos de transporte especial. Por sus características, no es adecuado para la soldadura de aceros al carbono debido a la alta concentración de hidrógeno en la flama, lo que puede producir fragilización en la soldadura; asimismo, es factible su uso para corte debajo del agua, situación en la que el acetileno presenta un comportamiento explosivo. Sin embargo, en esta aplicación ha sido sustituido con ventaja por el corte exotérmico debido a su mayor rapidez y seguridad. Se trata de una sustancia incolora en estado líquido y gaseoso, dada la adición de mercaptanos tiene un aroma similar al del gas natural, es tóxico en elevadas concentraciones. Su composición comercial es del orden de 48% metilacetileno, 23% propadieno, 27% propano.

10.6 MÉTODOS DE SOLDADURA MEDIANTE ARCO ELÉCTRICO

En estos métodos de soldadura, la fuente de calor es un arco eléctrico mantenido entre la pieza y un electrodo o entre dos electrodos. Inicialmente, la mayoría de las soldaduras por arco eléctrico se hicieron con corriente continua. Actualmente, tiene mayor aplicación el uso de corriente alterna, en virtud del costo del equipo.

Fue el francés Auguste de Meritens quien, en 1881, recibió la primera patente francesa para un proceso de soldadura con arco eléctrico, este utilizaba un arco de carbón para generar el arco eléctrico; por las bajas temperaturas que se alcanzaban en el proceso no pudo ser utilizado en la soldadura del acero, sino se empleó para la unión de placas de plomo, para lo que el propio de Meritens diseñó una campana extractora de los vapores de plomo altamente nocivos para la salud. En 1881, Nicolai Bernardos patentó un método para soldar a través del calentamiento generado entre una varilla de carbón y la pieza, el proceso permitió unir piezas de acero, lo que demostró su amplio potencial, razón por la que Nicolai Slavyanov propuso en 1888 el uso de electrodos metálicos, lo mismo que Coffin, en EUA, en 1900, con su patente US 428459 introdujo el concepto de la soldadura de arco con electrodo revestido. De inicio todos estos procesos se realizaron con CD, siendo hasta los años 1930's que el uso de CA se popularizó. Si bien desde la gran guerra europea (Primera Guerra Mundial, 1914-1918) en Gran Bretaña (en 1921 se botó el primer barco totalmente construido con soldadura en Inglaterra, el Fullagar) se utilizó para la construcción de barcos, es a partir de la segunda Guerra Mundial donde la soldadura de arco demuestra todo su potencial y es a partir de entonces y hasta nuestros días que representa el conjunto de procesos más utilizados a nivel mundial, ya que lo mismo se pueden unir metales no ferrosos que aceros; materiales de pequeño espesor y estructuras de grandes dimensiones, resultando los procesos más versátiles y económicos existentes.

La soldadura de arco presentó sus primeros inconvenientes en lo que se refiere a su estabilización, los cuales fueron pronto resueltos. El problema que, mayor recurso científico ha demandado y que sigue siendo punto fundamental para lograr una buena unión es la formación de una atmosfera protectora del metal líquido, ya que la falla de esta puede dar lugar a fragilidad y porosidad por efecto del hidrógeno y oxígeno de la atmósfera.

Todos los desarrollos antes mencionados han dado como resultado una serie de procesos industriales, entre los cuales se pueden mencionar:

- a. Soldadura de arco con electrodo revestido (SMAW).

- b. Soldadura de arco con fundente en el núcleo (FCAW).
- c. Soldadura de arco de metal y gas inerte (MIG) o también conocida como de microalambre (GMAW).
- d. Soldadura de arco con electrodo de tungsteno (TIG o GTAW).
- e. Soldadura de arco sumergido (SAW)
- f. Existen otros procesos como la soldadura de arco plasma, de hidrógeno atómico, de electroescoria, de electrogas, entre otras.

El tipo de fuente es función del proceso, ya que en algunos casos se requiere de CD, mientras que para otros es conveniente el empleo de CA. Para TIG se demanda una unidad de alta frecuencia para el encendido del arco y, en ocasiones, como señal sobrepuesta, para romper la capa de óxido como en el aluminio. En el caso del proceso SMAW, se utilizan equipos con alto voltaje de circuito abierto (80 V), el cual se reduce más de un 50% en circuito cerrado (30 V), mientras que en MIG, el voltaje permanece aproximadamente constante de circuito abierto a trabajo.

En el caso de utilizar CD, si se conecta la pieza al polo positivo y el electrodo al negativo, se dice que la polaridad es directa, en caso contrario es inversa (electrodo positivo – pieza negativa). El tipo de polaridad es función del proceso ya que la mayor parte del calentamiento se produce en el polo positivo (2/3), mientras que el resto se disipa en el negativo, es por consecuencia que en TIG donde el electrodo no es consumible es usual emplear polaridad directa, mientras que en soldadura con electrodo revestido es usual utilizar polaridad invertida.

Soldadura de arco con electrodo revestido

Desde hace más de 50 años, este es el proceso de soldadura más común pudiéndose utilizar tanto en materiales no ferrosos como en aceros, al carbono, aleados y aún inoxidable, fundiciones grises y en aleaciones de níquel. Se trata de un método económico, versátil y de fácil empleo. Como material de aporte se usan varillas recubiertas de un fundente que favorece la estabilización del arco, puede aportar material o aleantes al cordón de soldadura y forma una atmósfera protectora del metal líquido. El alambre desnudo puede ir desde 2.5 mm hasta 9.5 mm (3/32" a 3/8") de diámetro. El recubrimiento está constituido de una combinación de compuestos químicos que dependen del material y la aplicación del electrodo; entre otros se tiene rutilo (óxido de titanio), celulosa, sílice (SiO_2), óxido de zirconio, caolín (arcilla de composición aproximada $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), ferroaleaciones, carbonatos, silicato de sodio, silicato

de potasio, entre otros. Estos después de ser finamente molidos y mezclados se colocan a presión sobre la varilla de metal. Como ya se mencionó, sus funciones son:

1. Proveer una atmósfera protectora.
2. Estabilizar el arco.
3. Actuar como fundente para remover impurezas del metal base.
4. Proveer una escoria protectora para acumular impurezas, prevenir oxidación y retardar el enfriamiento del metal soldado.
5. Reducir la salpicadura de la soldadura de metal e incrementar la eficiencia de depósito.
6. Agregar elementos de aleación.
7. Determinar la penetración del arco.
8. Aportar material al cordón.

Los electrodos con revestimiento para aceros al carbono y grado maquinaria se clasifican de conformidad con la AWS (American Welding Society) sobre la base de la resistencia a la tracción del metal de soldadura depositado (60 a 120×10^3 lb/pulg²) la posición de soldadura en la cual pueden ser usados, el tipo de corriente y polaridad y el tipo de cobertura; se usa un sistema de cuatro o cinco dígitos para designarlos como se indica: **E o R** electrodo o varilla desnuda, **E60XY**; electrodo de $60,000$ lb/pulg² de resistencia, **X 1 a 3** posición de soldadura, **Y 0 a 8** ; particularidades del revestimiento y aplicación del electrodo (AWS A.5.1), por ejemplo, E6013, E9015, etc.

En general, los recubrimientos celulósicos contienen cerca de 50% de SiO₂, 10% de TiO₂, pequeñas cantidades de FeO, MgO, Na₂O y cerca de 30% de materia volátil.

Los fundentes de óxido de titanio (rútilo) contienen cerca de 30% de SiO₂, 50% de TiO₂, pequeñas cantidades de FeO, MgO, Na₂O y Al₂O₃ y cerca de 5% de materia volátil.

Las coberturas de bajo H₂ contienen cerca de 28% de TiO₂ más ZrO₂, y 25% de óxido de calcio además de óxido de magnesio. Estos evitan la asimilación de hidrógeno por parte del cordón con lo que se previene la fragilización.

Como ya se mencionó, cuando se quema el recubrimiento del electrodo se producen gases que forman una atmósfera protectora que evita la contaminación del metal fundido. Los constituyentes fundidos del recubrimiento se combinan con las impurezas del metal y las

atrapan en la escoria, formando así una escoria activa que protege al metal durante su fusión y enfriamiento del contacto con la atmósfera.

Fuentes de energía para soldadura de arco. Las fuentes de energía o plantas de soldar dependen del proceso en el que serán utilizadas. Las hay de CA, las cuales consisten únicamente de un transformador, y de CD; normalmente estas últimas consisten de sistemas de rectificación de corriente, en muy pocos casos en la actualidad se llegan a utilizar equipos con generador de CD. Para trabajo en campo, se emplean generadores accionados con motor de gasolina o de diésel.

Las máquinas de CD se fabrican en capacidades hasta de 1000 A, con voltaje a circuito abierto de 40 a 100 volts.

Durante la operación de la soldadora, el voltaje del arco está dado por:

$$V = 20 + 0.04I \quad I = \text{corriente de soldadura en amperes}$$

Las máquinas de CA no tienen partes móviles, tienen una alta eficiencia, su mantenimiento y costo inicial es muy bajo (una máquina de 250 A cuesta menos de 200 US dólares). Las soldadoras de este tipo se producen en capacidades de 150 a 1000 A, donde lo más usual es de 200 a 400 A.

Las máquinas CD tienen la ventaja de que pueden usarse con todos los tipos de electrodos, ya que el arco es más estable y no tiende a extinguirse al cambio de polaridad, bajo esta óptica los equipos de generador producen un arco más estable que los que trabajan con corriente rectificada. En el caso de emplear CA, el recubrimiento requiere de óxido de titanio (rutilo) para estabilizar el arco.

Las soldaduras de CA trabajan con voltajes ligeramente mayores, lo que aumenta el peligro de descargas sobre el soldador. A pesar de estas limitaciones, este tipo de equipos son los dominantes en la actualidad por cuestiones de costo y portabilidad, figura 10.18.



(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURA 10.18 Diferentes equipos para soldadura de arco con electrodo revestido. En la imagen inferior derecha se observa una máquina de 300 A, CD, con ciclo de trabajo de 40 %; la imagen superior derecha corresponde a una máquina de CA para trabajo ligero de 180 A, con ciclo de trabajo de 25% y electrodos de 2.4 a 3.2 mm (3/32" a 1/8"). Las dos imágenes de la izquierda corresponden con plantas de motor generador, la superior es una máquina con motor de gasolina ya montada en su remolque; la inferior es una máquina de motor generador accionada con un motor diésel turbocargado de 4 cilindros, la cual permite trabajar hasta con 750 A (20 a 750 A)

Soldadura de arco de tungsteno y gas inerte (TIG o GTAW)

Este proceso emplea un electrodo no consumible de tungsteno y de aleación de este, dada su elevada temperatura de fusión se considera que no existe depósito del electrodo; por lo que si se requiere de material de aporte, este debe de ser proporcionado a través, normalmente, de una varilla desnuda. Para formar la atmósfera protectora y facilitar el establecimiento del arco se emplea, argón, helio y mezclas de estos con nitrógeno. Se trata de un proceso costoso, que demanda mayor experiencia del soldador. Su aplicación se orienta a materiales difíciles de soldar, por ejemplo, aluminio y sus aleaciones, así como aceros inoxidables. El proceso se desarrolló ante la necesidad de unir materiales no ferrosos como las aleaciones de aluminio y magnesio, ya que estos al unirse con electrodos revestidos presentaban severos problemas de estabilización del arco y calidad del cordón (porosidad), en principio el método fue desarrollado por Rusell Meredith y V.H. Pauleka, quienes pretendían un método de soldadura que fuera aplicable al magnesio y sus aleaciones, sobre todo para aplicaciones en la industria aeronáutica. El método propuesto por estos se caracterizaba por el uso de una fuente de corriente directa donde el electrodo y el material fundido se protegían con una atmósfera de helio, por lo que el proceso fue conocido originalmente como heliearc, figura 10.19.

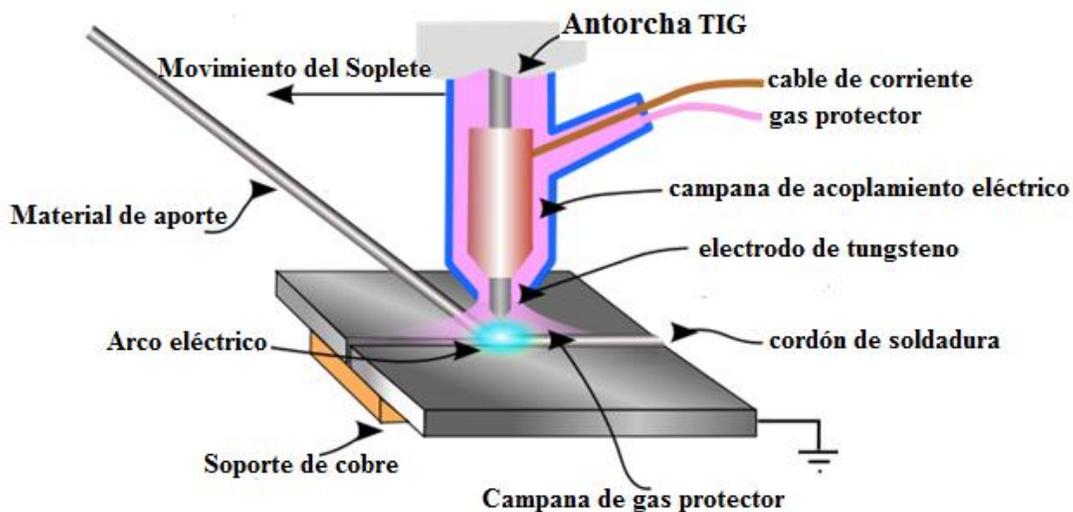


FIGURA 10.19 Descripción esquemática del proceso TIG, la antorcha (portaelectrodo) normalmente es enfriada por agua, aunque para corrientes menores a 80 A pueden ser enfriadas por aire, la pieza normalmente va conectada al positivo (polaridad directa) y el electrodo al negativo. El gas de protección circula alrededor del electrodo que se ioniza y ayuda a transferir la energía. El material de aporte se adiciona a través de una varilla, la que se funde por el calor transferido por el gas. Para encender el arco se dispone de una unidad de alta frecuencia

Para los años de la década de 1950, se propuso utilizar CO₂ como gas de proceso, dado su menor costo, sin embargo, este contamina al electrodo por lo que se canceló esta forma de trabajo. Como ya ha sido mencionado, no se puede iniciar el arco aproximando el electrodo a la pieza ya que el contacto entre estos se traduce en una contaminación del electrodo, por tal motivo, toda máquina de TIG deberá contar con una unidad de alta frecuencia, la cual se emplea al inicio del proceso para el encendido del arco o, en materiales como el aluminio, representa una señal adicional al voltaje de trabajo, la cual permite eliminar la capa de óxido que protege a metales, como el antes mencionado. Para el arranque, el electrodo deberá aproximarse a unos 3 mm, desde luego abriendo previamente la electroválvula que controla al gas de proceso. Para el proceso TIG, se puede utilizar el mismo equipo que para el electrodo revestido al cual se le añade la antorcha y el equipo de alta frecuencia, figura 10.20.

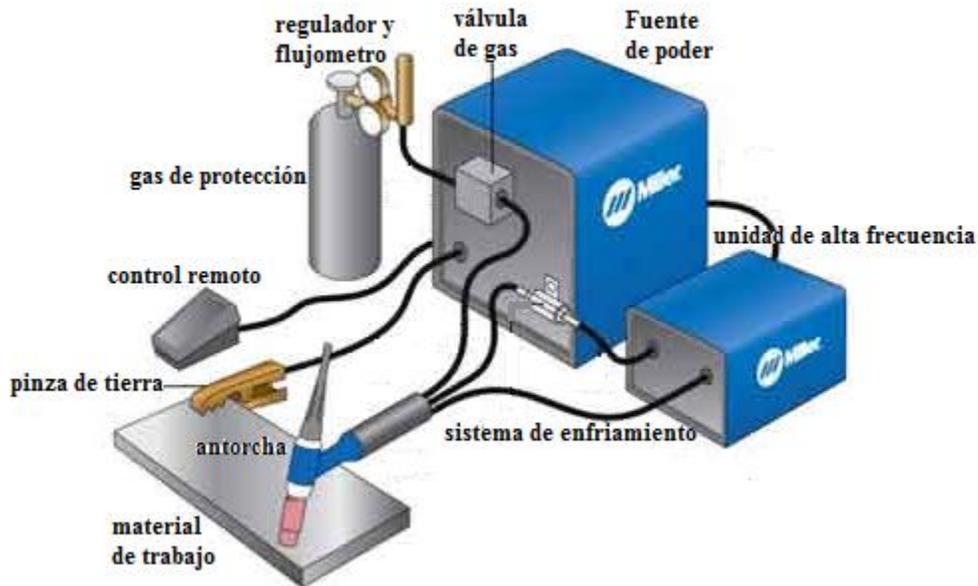


FIGURA 10.20 Descripción esquemática de un equipo para TIG

Las principales ventajas del proceso TIG son:

- a) Limpieza y calidad de la unión
- b) Menor zona afectada por el calor (el arco es intenso y concentrado)
- c) No se genera escoria
- d) No se generan humos
- e) Se controla la composición del cordón de soldadura

- f) Versatilidad, ya que puede ser utilizado en muy diversos metales y aleaciones, sobre todo en el caso de juntas delicadas
- g) Es posible automatizar

Como inconvenientes se pueden mencionar:

- a) Baja velocidad de unión
- b) Mayor costo del equipo en el caso de electrodo revestido (si bien esto es indiscutible dada la necesidad de elementos adicionales, no representa tampoco un inconveniente importante, ya que el costo de los accesorios no supera en la mayoría de los casos los 1500 US dólares).
- c) Se tiene un costo operativo mayor dada la necesidad de emplear gases de protección.
- d) Demanda mayor habilidad del operador

En la actualidad se emplea argón, helio y nitrógeno como los gases formadores de la atmósfera protectora, siendo práctica común la mezcla de estos, su selección estará determinada por el material a soldar. Bajo ninguna condición deberá emplearse bióxido de carbono en virtud de que este ataca al electrodo.

El tipo de electrodo (tungsteno o aleación de este), gas de protección (Ar, He, N₂ o mezclas de estos), tipo de alimentación CA o CD, polaridad directa o invertida, alta frecuencia para encendido o durante todo el ciclo; dependerá de la aleación a soldar, por ejemplo para aluminio y magnesio se emplea CA; para níquel, titanio y aceros se emplea CD-PD; mientras que la CD-PI se aplica cuando se requiere penetración, la polaridad directa (PD) permite mantener la forma (afilado) del electrodo.

Las variables más importantes del proceso son:

- 1) Tipo de corriente (CA/CD)
- 2) Polaridad (PD/PI)
- 3) Densidad de corriente
- 4) Voltaje
- 5) Tipo de gas y gasto volumétrico
- 6) Material del electrodo y diámetro de este
- 7) Forma de la punta del electrodo

Debido a que el electrodo de tungsteno no se consume, la longitud del arco permanece constante (lo que facilita la automatización del proceso).

En el proceso TIG, cualquier metal de aporte adicional necesario se provee por una varilla separada que sirve de relleno, como en las soldaduras por gas. Para muchas aplicaciones donde hay ajuste perfecto entre las partes a soldar no se requiere material de aporte.

Debido a que no se usa en el proceso ningún tipo de fundente, las soldaduras resultantes son muy limpias y con operadores especializados, las soldaduras son escasamente visibles, figura 10.21.



FIGURA 10.21 En la figura de la izquierda se observa el proceso de soldadura TIG de un radiador de aluminio. La figura de la derecha muestra la calidad del cordón efectuado en piezas de acero inoxidable

Soldadura de arco de metal y gas inerte (MIG)

En este proceso, el electrodo es consumible y se conoce como soldadura de microalambre. Se emplean el CO_2 , Argón o Helio (estos últimos se emplean poco a nivel industrial dado su alto costo) como gases protectores. Para este proceso, se utiliza una máquina de corriente directa y potencial constante con servoválvulas para el control del gas, así como mecanismos para el control de la alimentación del alambre y una antorcha que proporciona el material y la cobertura del gas protector, figura 10.22.

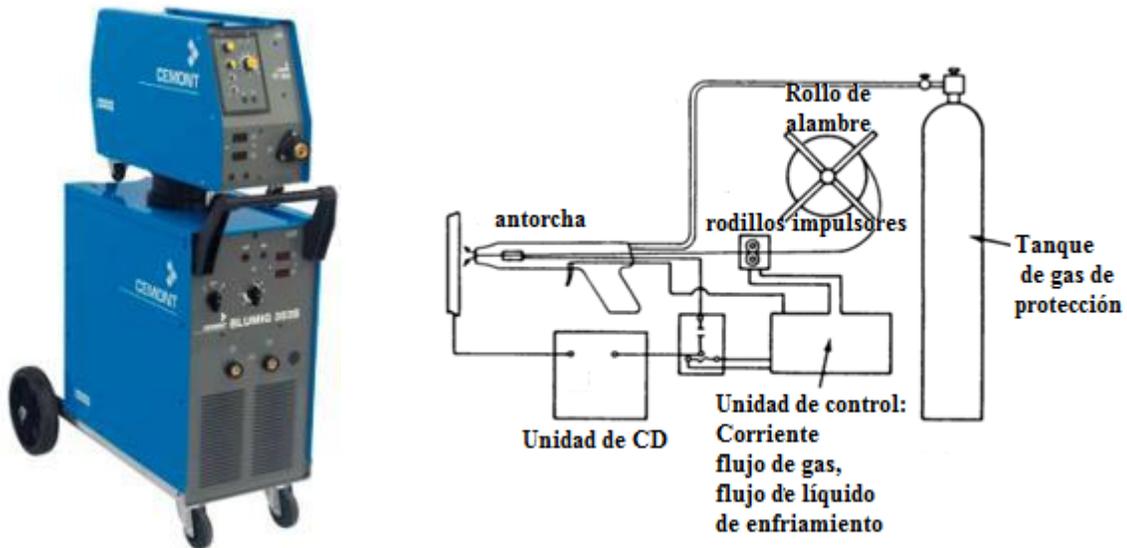


FIGURA 10.22 El equipo para microalambre con unidad de control de dosificación separada de la unidad de alimentación de corriente permite aplicar de 35 a 350 A. Se recomienda para alambre de acero de 0.6 a 1.2 mm; de acero inoxidable de 0.8 a 1.2 mm; de aluminio de 0.8 a 1.2 mm, y alimentación trifásica a 440 V. Derecha, descripción esquemática del proceso MIG

El electrodo se proporciona en forma de alambre enrollado, lo cual elimina la necesidad del cambio de varilla y se logra un incremento considerable en la velocidad de soldadura. Además, no se forman escorias que tengan que ser removidas después del enfriamiento del cordón. El material de aporte (alambre) es generalmente de la misma composición que las piezas a soldar.

Con gases como el argón o helio se puede soldar casi cualquier metal debido a la estabilidad del arco y la suavidad de depósito, así como a la temperatura que se alcanza. A causa del costo de gases como el He y el Ar, el proceso es más caro que el de soldadura de arco con electrodo revestido, sin embargo, el empleo de CO_2 , reduce sensiblemente los costos de proceso. Este método se usa fundamentalmente para soldar aceros, aluminio, aleaciones de cobre y aceros inoxidables donde se requiere una atmósfera totalmente inerte, muy buenos acabados y una elevada velocidad de depósito. En general, su aplicación es idónea cuando se demandan cordones continuos en procesos industriales, no es usual su uso en operaciones de mantenimiento u operaciones de punteo. Para aceros al carbono se usa CO_2 como gas protector, figuras 10.23 y 10.24.

El proceso con fundente en el núcleo (Flux cored arc welding-FLAW) es una variación del proceso MIG. En este caso, el alambre es sustituido por material de aporte tubular, el cual lleva en el interior fundente, esto provoca que no se requiera o se reduzca la demanda de gas de protección. La única modificación requerida en el equipo son los rodillos empujadores y la boquilla de la antorcha.



FIGURA 10.23 El depósito del material en el proceso MIG se da en una forma suave con mínimas salpicaduras y con una elevada velocidad de transferencia, obteniendo un cordón de muy alta calidad y buena penetración. A la derecha se observa una antorcha para trabajo manual

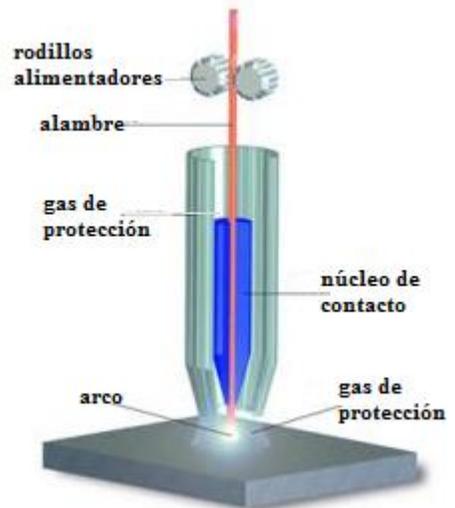


FIGURA 10.24 El proceso MIG es ideal para automatizarse. A la izquierda se observan 4 robots para soldadura soldando un chasis. La figura de la derecha muestra esquemáticamente el proceso y la forma en que el alambre es alimentado de manera continua

Soldadura con hidrógeno atómico

La soldadura con hidrógeno atómico se realiza con una antorcha (figura 10.25), en el que se mantiene un arco de CA entre dos electrodos de tungsteno. El gas hidrógeno se alimenta a través de los soportes del electrodo y, por lo tanto, es dissociado en el arco. Cuando el hidrógeno dissociado se pone en contacto con metal a soldar se combina, transfiriendo importantes cantidades de calor. La combinación del calor del arco con el calor del hidrógeno, redonda en mayores temperaturas de proceso (4000 °C) que la que se logra en fuentes de soldadura de arco comunes. El gas hidrógeno provee una atmósfera reductora alrededor de la soldadura, protegiéndola del oxígeno y el nitrógeno del aire.

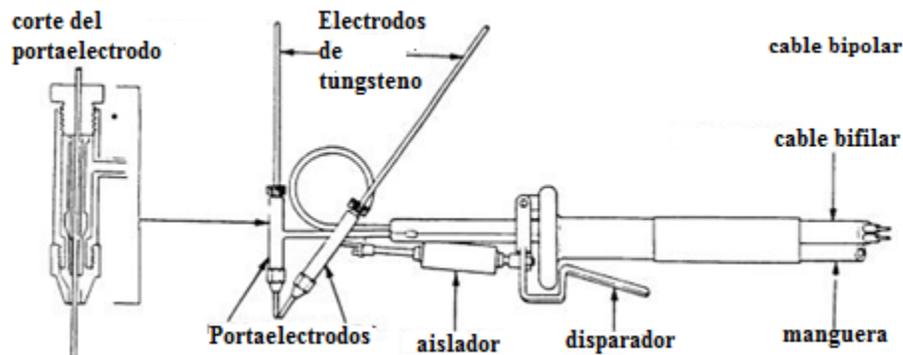


FIGURA 10.25 Soldadura de hidrógeno atómico

Este tipo de soldadura es particularmente apropiado para soldaduras de calidad en aceros de alta aleación, donde interesa conservar la composición, tanto de la soldadura como del metal base.

También se emplea para unir metales muy delgados debido a que el arco está autocontenido en el soplete y el calor de trabajo puede controlarse rápidamente. A la fecha, este tipo de proceso está prácticamente en desuso.

CORTE CON PLASMA. Al mencionar los procesos de soldadura de arco y, en particular, el método TIG es conveniente considerar una operación alterna de este tipo de sistemas que es la de corte. Las máquinas utilizadas para la soldadura de arco se pueden emplear en operaciones de corte, por ejemplo, empleando electrodos de carbón y mayores densidades de corriente; de hecho, el portaelectrodo puede ser el mismo que para la soldadura con electrodo revestido o, en su defecto, se pueden instalar portaelectrodos con alimentación de aire a presión, lo cual

permite, a la vez de ir fundiendo el material por acción del arco, evacuarlo por efecto de la corriente de aire aplicada a alta presión.

Como una variación al proceso TIG, se desarrolló el proceso de corte con plasma, en este caso se emplea un arco que se genera con una corriente de alta frecuencia y bajo voltaje (arco piloto), con lo que se inicia el arco y se ioniza el aire alrededor de la antorcha. El arco piloto es mantenido mientras que la antorcha se aproxima al material a cortar para entonces iniciar el arco plasma principal, el gas ionizado (plasma) alcanza temperaturas muy elevadas (25000 °C), lo que permite cortar cualquier aleación, aun con espesores de mucho más de 10 mm. El proceso puede ser fácilmente automatizado. Existen equipos manuales (figura 10.26), los cuales permiten cortar hasta 50 mm en acero, mientras que los CNC y los robotizados permiten hasta 150 mm, (figuras 10.27 y 10.28). Se trata de un proceso relativamente moderno ya que su uso se ha extendido a partir de la década de 1980, si bien produce cortes finos y se puede aplicar a cualquier aleación, no se logra la calidad del corte con láser, ya que existe una zona afectada por el calor. Como gas de proceso, estos equipos pueden utilizar aire comprimido, oxígeno, argón o hidrógeno. La única restricción en los materiales a cortar es que sean conductores eléctricos. Es común su aplicación para cortar acero inoxidable, aluminios, cobre y aceros al carbono. Los equipos pueden ir desde unos 100 a 1000 A.



FIGURA 10.26 Equipo manual para corte con plasma, con una capacidad de 65 A, a 100% de ciclo de trabajo (a 60% de ciclo de trabajo permite 80 A). Se debe recordar que el ciclo de trabajo es el tiempo en que el equipo puede estar en plena operación en un intervalo de 10 min

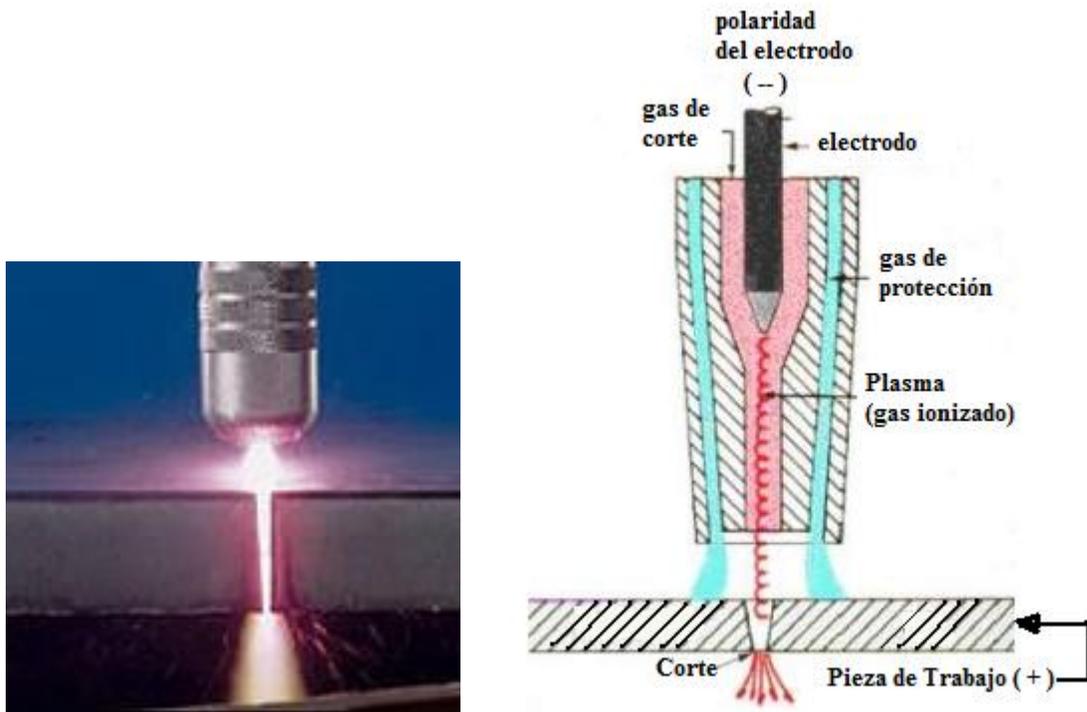


FIGURA 10.27 Operación de corte con plasma. A la derecha se presenta esquemáticamente la antorcha para corte con plasma



FIGURA 10.28 Máquina CNC para corte con plasma

Soldadura de arco sumergido

La soldadura de arco sumergido recibe este nombre en virtud de que el arco eléctrico es mantenido bajo un fundente granular (figura 10.29), no existiendo entonces evidencia del arco, esto permite el empleo de mayores densidades de corriente y, por tanto, las máximas velocidades de depósito para procesos de arco eléctrico. Para este proceso se han reportado velocidades de depósito superiores a los 40 kg/h, a la vez de una alta penetración, ya que pueden unirse placas de más de 20 mm en una sola pasada. La soldadura de arco sumergido fue el primer proceso automático de soldadura en EUA. Se otorgó la primera patente sobre este método hacia 1920 (1676985 US patent, septiembre de 1925) para la General Electric Company, posteriormente, en mayo de 1929, se otorga la US patent 1782316, cuyos derechos fueron adquiridos por Linde a principios de la década de 1930, quien desarrolló ya el proceso de forma industrial, razón por la que se da a Union Carbide-Linde el mérito de este proceso.

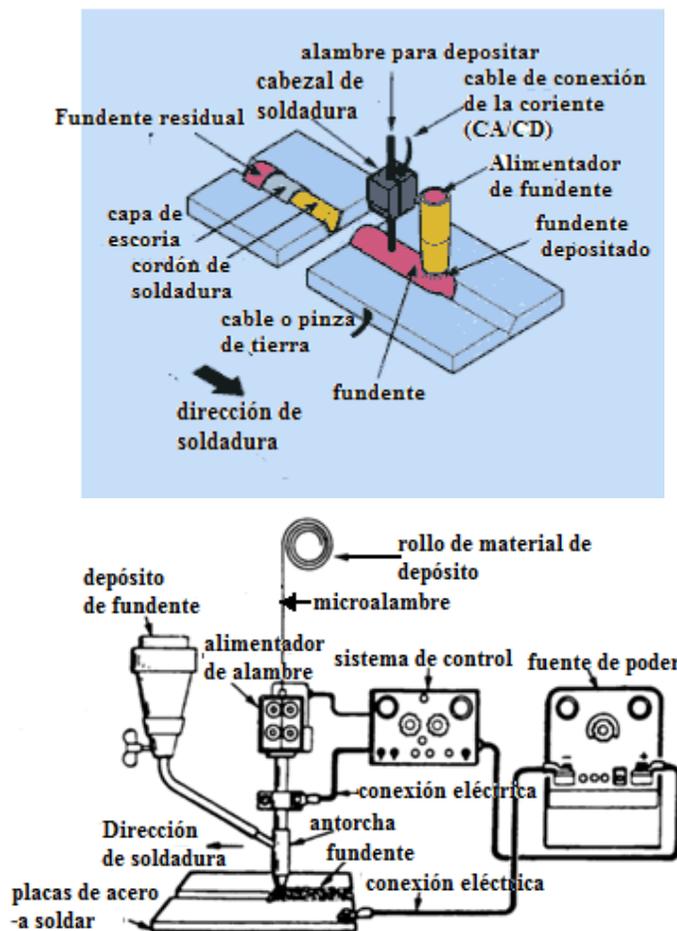


FIGURA 10.29 Descripción esquemática y en diagrama de bloques del proceso de soldadura de arco sumergido

Para este método de soldadura, se pueden emplear fuentes de potencia de CA y de CD, comúnmente de más de 600 A (en ocasiones se alcanzan hasta 2000 A). El fundente se coloca justo delante del electrodo, este se suministra en forma de alambre enrollado y revestido con cobre para asegurar un buen contacto eléctrico (figura 10.30). El arco está completamente sumergido en el fundente de manera que se proteja la soldadura (ya en la patente de 1929 se presenta esta consideración), por lo que se obtienen cordones de alta calidad.



FIGURA 10.30 Material de aporte para el proceso de soldadura de arco sumergido. El cobrizado del alambre de acero es para mejorar el contacto eléctrico y evitar la formación de herrumbre durante su almacenaje. A la derecha se observa la boquilla que suministra el fundente y su aspecto

Estos equipos cuentan con un cabezal soldador que se desplaza a lo largo de la pieza o viceversa de forma automática, (figura 10.31). Una porción del fundente se funde y solidifica en un revestimiento vidrioso que cubre la soldadura. El fundente solidificado se rompe desprendiéndose de la soldadura en el enfriamiento. El fundente sobrante, no fundido, se recupera con una aspiradora.

El proceso de arco sumergido permite grandes velocidades de unión en placas gruesas, siendo solo aplicable a posición plana y horizontal. Son comunes velocidades de 1m/min en placa de acero de 25 mm de espesor o 0.3 m/min en placa de 40 mm. Para incrementar la velocidad de depósito existen equipos con más de un cabezal soldador, esto es, en ocasiones se tienen dos o tres electrodos. Como el metal se deposita en menos pasos que en la soldadura de arco manual, se reduce la posibilidad de que quede incluida escoria o porosidades, por lo que se logran uniones de alta calidad. Como fundente se utilizan mezclas de cal, óxidos de manganeso, silicio, titanio, aluminio, zirconio, magnesio, fluoruro de calcio; de tal forma que la

combinación del material de aporte proporcionado por el alambre y los elementos aportados por el fundente generen un depósito con las propiedades mecánicas requeridas, así como una escoria que se desprende fácilmente o que se vuelve a fundir sin ser asimilada por el cordón en el caso de que se requiera más de una pasada de soldadura por efecto del espesor del material.

Los fundentes se consideran activos si estos aportan elementos al cordón. Los fundentes también se clasifican como de unión y de fusión; los primeros presentan compuestos como silicato de sodio, así como desoxidantes, lo cual los hace idóneos en operaciones sobre superficies oxidadas. Los fundentes de fusión se producen mezclando sus componentes al fundirlos y granularlos, estabilizan el arco y permiten mayores densidades de corriente.

Si bien los cabezales de soldadura con un solo electrodo son los más usados, se emplean actualmente en producción máquinas que utilizan tres electrodos, operando con corriente alterna trifásica.

El proceso de arco sumergido se usa ampliamente para grandes volúmenes de soldadura, como en la construcción de barcos o en la manufactura de tubos de acero de grandes diámetros y en la construcción de tanques, figura 10.31.



FIGURA 10.31 Operaciones de soldadura de arco sumergido

Otra modificación del proceso es el método de arco sumergido manual que consiste en un embudo o cañón que contiene el fundente movido y sostenido, manualmente. El electrodo de

alambre del cañón-embudo avanza de modo que se mantenga la longitud adecuada del arco. Es muy útil para soldaduras cortas o no alineadas cuando el tiempo requerido para organizar el equipo automático no se justifique, por lo pequeño de los cordones, figura 10.32.

En general, dada la forma de suministro del fundente, el proceso solo se puede emplear en posición plana y en horizontal.



FIGURA 10.32 Demostración de un equipo de soldadura de arco sumergido que es utilizado para la unión de tubos

Soldadura con perno

Es un proceso de soldadura de arco donde la coalescencia es producida estableciendo un arco entre el perno de metal y la pieza, hasta que se alcanza la temperatura necesaria, enseguida se presiona el perno contra la pieza con una fuerza capaz de realizar la unión. El proceso se realiza generalmente sin protección (aunque se puede usar), empleando una pistola especial y un equipo auxiliar que controla el arco, su duración y la aplicación de la presión. En este proceso se emplea corriente continua.

La base del perno se ahueca y el hueco se rellena con fundente de soldar, un casquillo de cerámica se coloca en el extremo del perno antes de que sea ubicado en la pistola de soldar. Este casquillo es una parte importante del proceso, debido a que concentra el calor del arco,

protege el metal de la atmósfera y confina el metal fundido al área de fusión y lo moldea alrededor de la base del perno. Al terminarse la soldadura el casquillo se rompe para separarlo del perno.

En cada operación el operador coloca el perno y el casquillo en el mandril de la pistola, coloca la pistola en posición sobre la pieza y aprieta el gatillo, el resto del ciclo es automático y emplea menos de un segundo. Este proceso tiene gran aplicación en la colocación de anclas sin necesidad de hacer barrenos previos.

10.7 TIPOS DE UNIONES SOLDADAS

La posición de soldadura se define como plana, horizontal, vertical y sobre cabeza, figura 10.33.

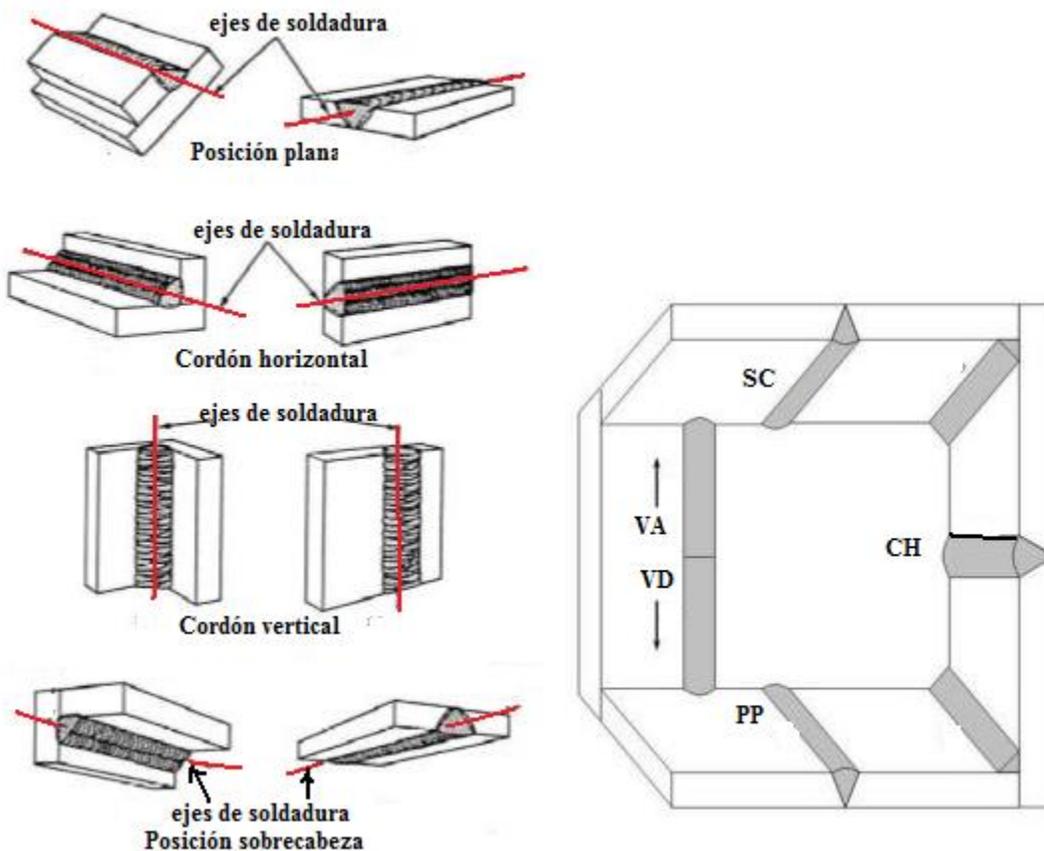


FIGURA 10.33 Posiciones de soldadura

Por otra parte, los tipos principales de uniones que se usan en los procesos de soldadura mostrados en la figura 10.34 son: a tope, de traslape, de borde, de esquina, de tapón o de espiga y en "T". Algunos de estos tipos, tales como la soldadura a tope, pueden subdividirse ya que varían en su forma, según el espesor del material.

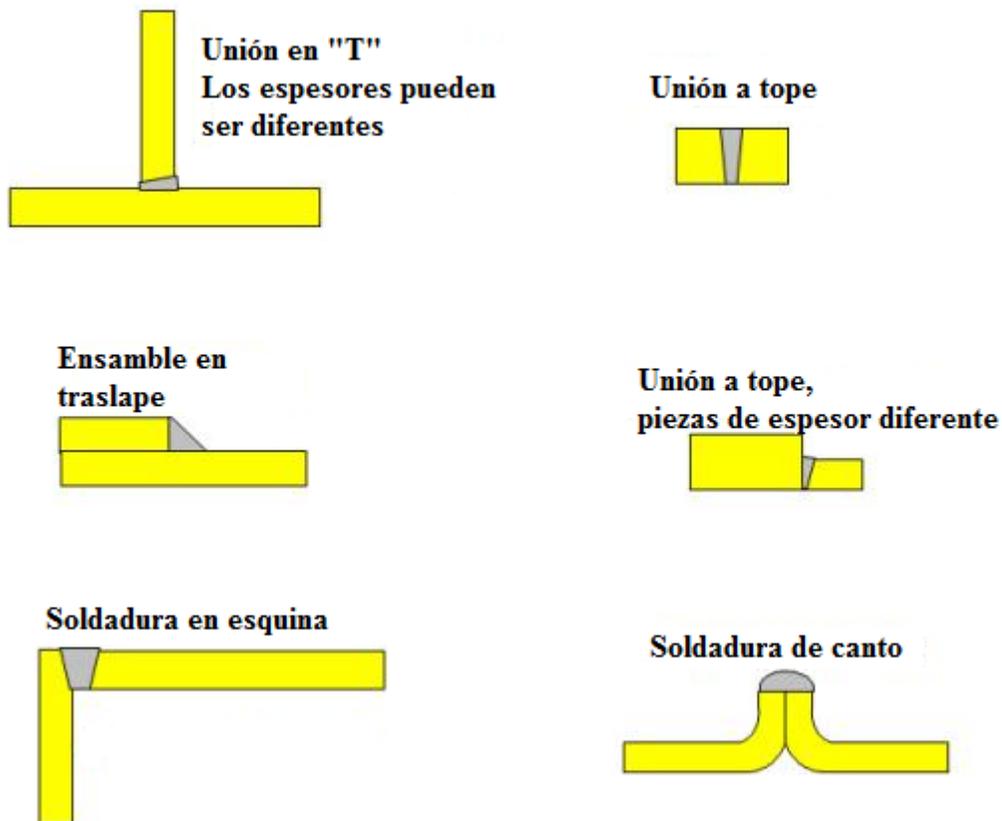


FIGURA 10.34 Tipos básicos de uniones: en T, a tope, en esquina, traslape y en borde

Las uniones para soldadura por forja (figura 10.35) difieren en la forma de preparación y no se parecen a las mostradas anteriormente. Las uniones a tope, en "T" y de traslape son los tipos más usados. Por otra parte, para favorecer la fusión a la raíz, en ocasiones se biselan los bordes de las placas, figura 10.36.

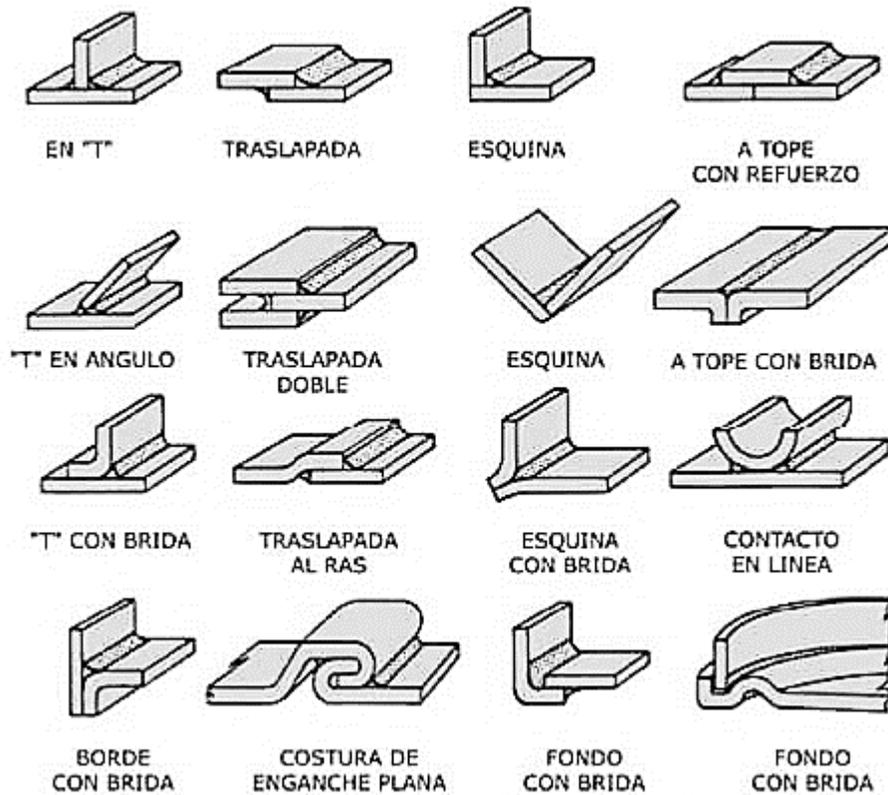


FIGURA 10.35 Tipos de uniones

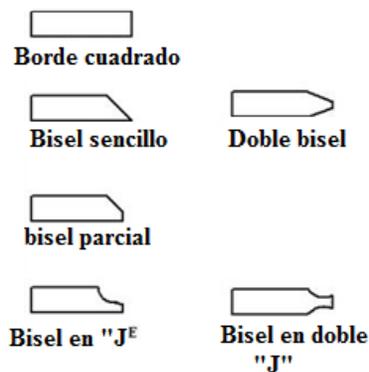


FIGURA 10.36 Tipos de filete

Simbología. Es necesaria la existencia de una simbología que permita transmitir del diseñador al fabricante la forma y condiciones como se realizará una unión soldada, es por esto que la AWS (American Welding Society) ha definido una simbología, la cual ha sido hecha propia por la ISO (figuras 10.35, 10.37, 10.38 y 10.39) que permiten de una forma sencilla y clara describir las condiciones de la unión.

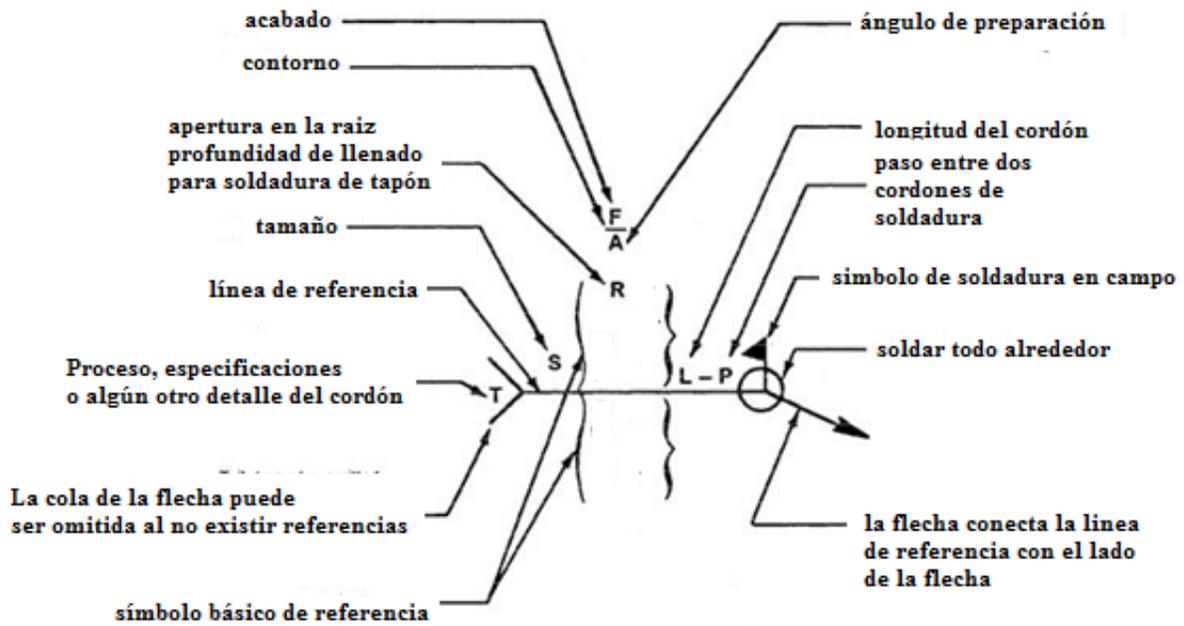


FIGURA 10.37 Simbología básica para uniones soldadas

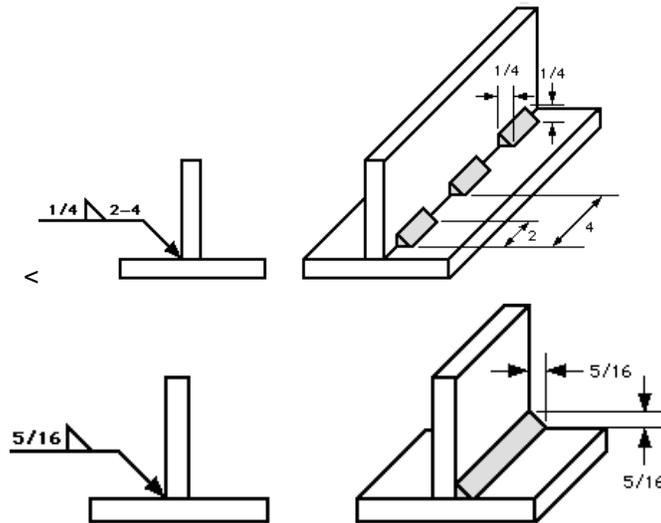


FIGURA 10.38 Se muestra el símbolo de soldadura, tal como se presentará en el dibujo y la unión que representa

Aplicación	Cordón requerido	Simbología de acuerdo a la vista		
		Transversal	lateral	plana
la flecha se encuentra al mismo lado del cordón				
El cordón está al otro lado de la flecha				
Cordón a ambos lados				
Cordón a ambos lados junta doble				
Junta a tope sin bisel				
Junta a tope Cordón por ambos lados				
Junta a tope con bisel por un solo lado				
Junta a tope con bisel en ambos lados de una pieza Cordón por ambos lados				
Junta con bisel en ambas piezas. Cordón por un solo lado				
Junta a tope con bisel en ambos lados de la piezas ambas placas. Cordón por ambos lados				
Bisel en J en el mismo lado de la flecha				
Doble bisel en J Cordón por ambos lados				
Cordón por un solo lado, bisel en U				
Bisel doble en U Cordón por ambos lados				

FIGURA 10.39 Aplicación de la simbología de soldadura en diferentes perspectivas

10.8 UNIONES REMACHADAS

Las uniones o juntas remachadas son uniones permanentes realizadas mediante remaches o roblones que se emplean en construcciones de acero, en la fabricación de vehículos de transporte, ascensores y grúas donde se requieren uniones con alta resistencia mecánica. También se emplean en la fabricación de recipientes para gases y líquidos que requieren uniones no permeables, y en la fabricación de calderas de vapor y recipientes a presión donde la resistencia y estanquidad son indispensables. Si bien se trata de juntas permanentes, tienen la ventaja de los materiales pueden separarse afectando solo a los remaches; por otra parte, permiten la unión de materiales que por condiciones metalúrgicas sería imposible unir por soldadura, asimismo, dado que en general no se requiere de calentamiento, no existirá entonces zona afectada por el calor. Por los motivos antes expuestos, son utilizados en el ensamble de aeronaves, estructuras, lo mismo en elementos de pequeño espesor que para placas superiores a 10 mm. La gran desventaja del proceso es su costo, ya que demanda de una serie de operaciones adicionales a las que se requieren para una unión por soldadura.

Es importante notar que el acelerado desarrollo de los procesos de soldadura, provocaron el desplazamiento de las juntas remachadas por uniones soldadas, básicamente por la economía de materiales y la velocidad de producción. Con todo lo anterior, las uniones remachadas continúan vigentes dada la necesidad de ensamblar piezas de materiales diferentes, imposibles de soldar entre sí, y cuando se requiere desensamblar para dar mantenimiento (como en aviones).

El remache una vez formado consta de la cabeza de asiento (cabeza del remache), el vástago y la cabeza de cierre. La cabeza de cierre se obtiene mediante recalado en frío o en caliente, de la parte que sobresale del vástago.

Tanto las formas (figura 10.40) como las medidas de los remaches están normalizadas. Se distinguen como formas fundamentales, los remaches de cabeza redonda y los avellanados, con diámetros de 1 a 10 mm para piezas pequeñas, y de 10 a 36 mm para construcciones de acero. Además, hay remaches especiales para calderas y construcciones navales.

El vástago del remache es ligeramente cónico con el objeto de que pueda introducirse fácilmente en el agujero. La medida nominal se localiza cerca de la cabeza de asiento. La forma de la cabeza se elige de acuerdo con la aplicación de la junta remachada. La cabeza de cierre

se hace por recalcado del exceso del vástago, y su forma se elegirá de acuerdo con la aplicación de la junta (figura 10.41).



FIGURA 10.40 Diferentes tipos de remaches

Fundamentalmente, el remache y los materiales a unir tienen que ser, dentro de lo posible, de la misma composición para evitar fenómenos de corrosión galvánica.

El remache, básicamente está sometido a fuerzas de corte. La separación entre remache y remache o entre el remache y el borde de la placa, debe ser cuando menos igual al espesor de la placa.

El remachado puede realizarse a mano o con máquina, empleándose martillos neumáticos, máquinas eléctricas o prensas.

Los remaches para aplicaciones especiales se fabrican de materiales altamente plásticos y sus formas obedecen a un sin número de aplicaciones específicas (figuras 10.41 y 10.42).



FIGURA 10.41 Diferentes materiales utilizados para la producción de remaches



FIGURA 10.42 La aplicación de las uniones mediante remaches es muy variada, ya que lo mismo se utiliza en el ensamble de la estructura de armas de fuego que en elementos estructurales

Los remaches también se utilizan en el ensamble de elementos no metálicos, tal es el caso de aquellos utilizados para cuero, los cuales se fabrican de cobre o aluminio, a causa de la elasticidad del cuero. Tienen una gran cabeza avellanada con $D = 2.8 d$, poca altura de cabeza y ángulo de avellanado de 140° .

Para la unión de láminas delgadas o de placas de material plástico, así como para sitios remachados en que solo se puede trabajar por un lado se emplean los remaches con mandril (figura 10.43). Estos remaches constan del auténtico remache y del mandril (clavo del remache), cuya cabeza es cónica, esférica o lisa. Con una pinza especial se tira del mandril o clavo del remache cuya cabeza ensancha a modo de cabeza de cierre, el extremo del remache que sobresale por debajo. Una acanaladura del mandril hace de punto de fractura.

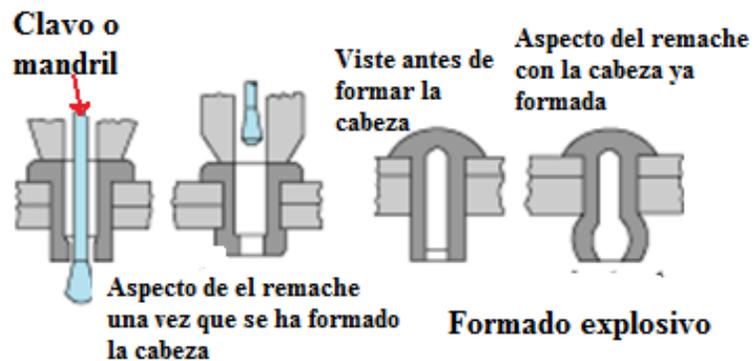


FIGURA 10.43 Aplicación de un remache con mandril (tipo pop) y de expansión (derecha)

10.9 UNIONES MEDIANTE ADHESIVOS

Aun antes de que los metales se empezaran a unir por forja, el hombre aprendió a utilizar resinas que se encontraban en la naturaleza para la unión de madera y cuero. En la actualidad, esto ha evolucionado con el desarrollo de la síntesis química, en adhesivos cuya resistencia es comparable con la obtenida mediante soldaduras, con la ventaja de su bajo peso y facilidad de aplicación. Este tipo de uniones permiten el ensamble de casi todas las piezas metálicas y no metálicas. Los principales pegamentos empleados se fabrican a partir de materiales sintéticos endurecibles y son: resina fenólica, epóxica, poliéster, poliéster-epóxido-resina y la resina de poliuretano. Las principales clases de pegamento son a base de resinas epóxicas y poliuretanos; con ellas se obtienen las uniones más resistentes. Para disminuir la fragilidad se agregan a las resinas sintéticas, materiales termoplásticos.

Los adhesivos se pueden clasificar con relación a su origen en sintéticos y naturales, aunque también se clasifican en:

1. De origen animal. Se utilizan proteínas de origen animal, por ejemplo, colágeno, por lo cual su fuente pueden ser huesos de pescado o de bovino, estos se producen normalmente por calentamiento en agua en ebullición. Existen también pegamentos de albúmina (clara de huevo), caseína (obtenidos a partir de lácteos, utilizados en el pegamento de madera).
2. Adhesivos de origen vegetal. Entre estos se puede mencionar la goma árabe, el bálsamo de Canadá, el hule natural, la metilcelulosa, resinas de urea-formadheído.

3. Pegamentos de tipo solvente; entre otros, cemento de poliestireno-butanona, diclorometano.
4. Adhesivos a base de polímeros sintéticos: Resinas epoxy, acetato de vinil-etileno (pegamento caliente), resinas de fenol-formaldeído, poliamidas, resinas poliéster, polietileno (fundido), poliuretanos, acetato de polivinilo, alcohol polivinílico, cloruro de polivinilo, emulsión de cloruro de polivinilo, pegamentos de hule, siliconas, copolímero de acrilostireno, entre otros.

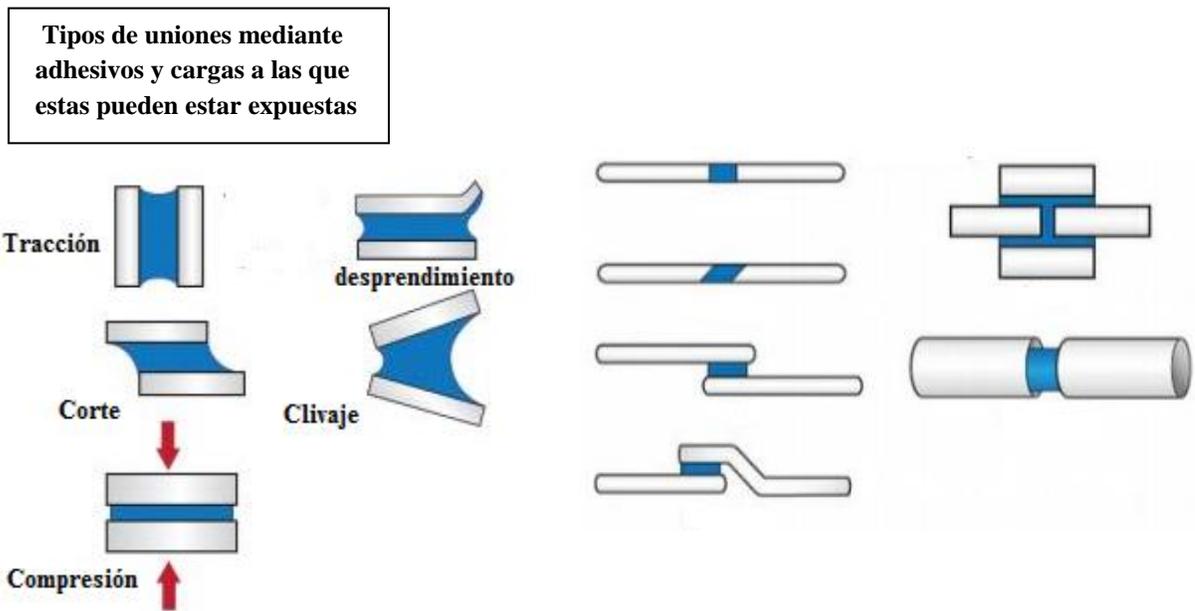
El endurecimiento de los adhesivos se produce por polimerización o evaporación de un solvente, esto a través de calentamiento o por la mezcla con un endurecedor o catalizador. La unión entre las piezas a ensamblar se produce a través de medios mecánicos donde el adhesivo se introduce en los poros o por mecanismo químico. La resistencia de la unión dependerá del adhesivo, de su mecanismo de acción y de las condiciones de aplicación; puede presentarse unión química entre el adhesivo y el sustrato, presentarse fuerzas electrostáticas, dipolos permanentes (fuerzas de Van der Waals) o difusión del pegamento en el sustrato (esto aplica en algunos casos de no metales), en general, en las uniones con adhesivos el punto más débil lo representa la capa de pagamento, por lo cual esta debe ser del mínimo espesor, figura 10.44. El proceso comprende:

1. Desengrasado de las superficies a pegar
2. Preparación del pegamento (en algunos casos mezcla)
3. Aplicación del pegamento (por capas)
4. Acoplamiento de las piezas y endurecimiento del pegamento.

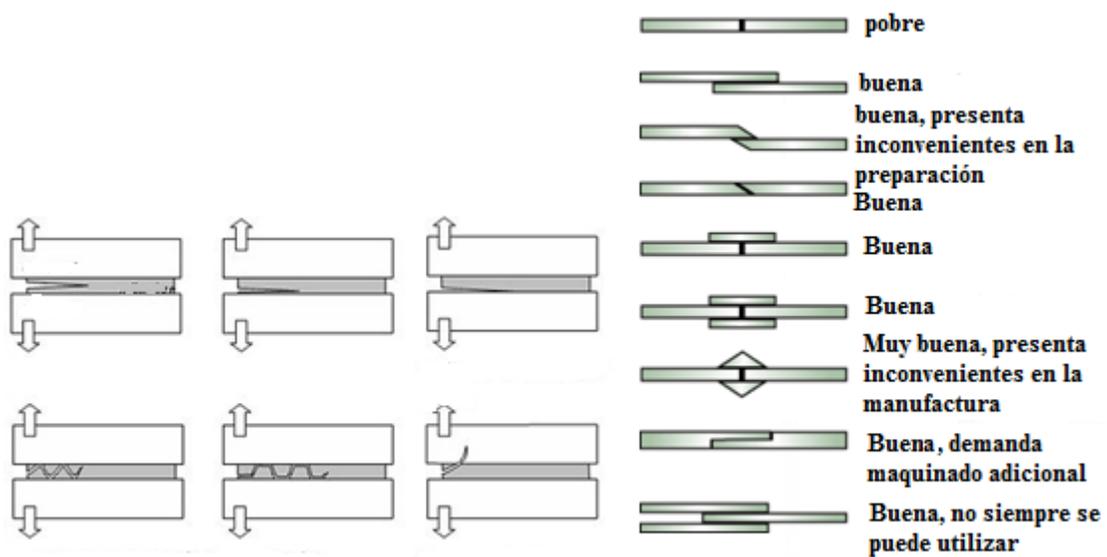
Las capas de grasa, aceite, suciedad y óxido, disminuyen la adherencia del pegamento sobre la superficie metálica, por lo que deben ser previamente eliminados. Los pegamentos a base de resinas fenólicas son más sensibles a la grasa y aceite que los de resinas epóxicas.

A veces se generan acabados con mayor rugosidad, esto mediante arenado o granallado; sin embargo, en los pegamentos de gran resistencia es suficiente con la rugosidad obtenida por el decapado previo efectuado para eliminar las capas de óxido.

En superficies lisas se adhieren muy bien a las resinas epóxicas, las de poliéster solo moderadamente y las fenólicas no se adhieren en absoluto.



(a)



(b)

FIGURA 10.44 Tipos de uniones y cargas a las que son sometidas. **(a)** Patrón de falla en uniones con adhesivo. **(b)** Tipos de unión y traslapes utilizados para incrementar el área de transmisión de carga

En los pegamentos en caliente, las piezas a unir se calientan a unos 140 °C, se esparce sobre la superficie el pegamento pulverizado y empieza a fundirse, a continuación se coloca una pieza sobre la otra y se eleva la temperatura hasta unos 200 °C; el empleo de temperaturas mayores a la ambiental reduce los tiempos necesarios para lograr la adhesión entre las superficies. Los pegamentos en frío son predominantemente líquidos o pastosos. Inmediatamente antes del uso se mezclan con el endurecedor o catalizador generalmente líquido, figura 10.45. El proceso de endurecimiento se inicia de inmediato; por esta razón la mezcla utilizada tiene que ser aplicada en intervalos de tiempo corto, ya que aunque para alcanzar la máxima resistencia se demandan varias horas, la vida útil del pegamento no supera 30 minutos.

Para que la unión pegada resulte buena, la superficie de pegamento no deberá ser demasiado pequeña y la capa no deberá ser gruesa. Las uniones mediante pegamento son resistentes al aceite, bencina y agua; además, resisten la acción de los ácidos y bases diluidas, son estables a temperatura entre -25° y 100°C. La resistencia de la unión no depende solamente de la magnitud de la superficie pegada, de la preparación de las superficies y del espesor de la capa, sino también del modo de ser solicitada la unión. La mayor resistencia se tiene cuando la unión trabaja al esfuerzo cortante.



FIGURA 10.45 A la izquierda se observa la presentación de diferentes resinas para pegado en caliente. La figura de la derecha muestra diferentes resinas epoxy para uso en frío con diferentes tiempos de endurecimiento. Se trata de resina y catalizador

La capa de pegamento actúa normalmente como aislante eléctrico (lo cual puede ser ventaja o desventaja, según el caso), por tal motivo, existen pegamentos con acción aislante disminuida que contienen polvos metálicos hasta un 80%.

Una de las mayores desventajas del uso de adhesivos la representa su falta de estabilidad y por consecuencia su vida útil, ya que el ozono, la radiación ultravioleta y otros factores afectan la polimerización de la resina disminuyendo su resistencia con el paso del tiempo; sin embargo, se han adicionado estabilizadores que garantizan en la actualidad una mayor vida de almacén del producto y una extensa vida de servicio.

Todo lo antes expuesto indica permite concluir que cada vez será más común el empleo de adhesivos en uniones de ingeniería.

10.10 UNIONES POR INTERFERENCIA

Este tipo de uniones (figura 10.46) se realizan aprovechando las propiedades de contracción o dilatación de los metales al disminuir o elevar su temperatura. Dado que, generalmente, se realizan con la idea de no desmontarlas nunca, es la razón por la cual se consideran dentro del grupo de uniones permanentes.

En este tipo de uniones existe siempre antes del acoplamiento de las piezas una sobremedida. De la magnitud de dicha interferencia (sobremedida) dependerá la fuerza de unión.

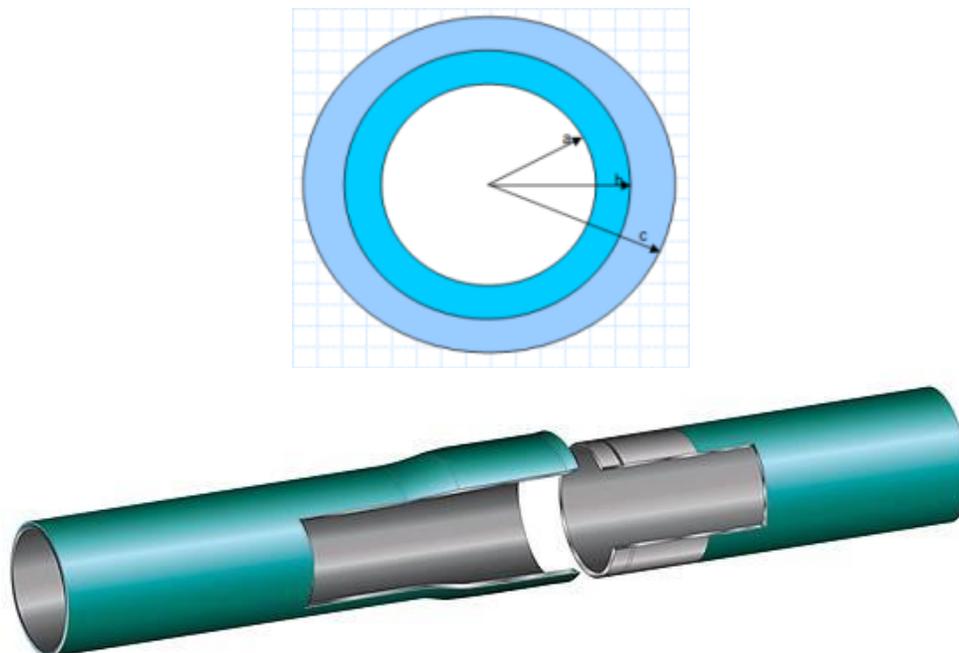


FIGURA 10.46 Unión por interferencia. Se produce al calentar el elemento externo el cual se dilató, con estas condiciones las dos piezas se ensamblan, de tal forma que al enfriarse el elemento exterior, este se cierra sobre el interior generando una fuerza de apriete

En este tipo de uniones se distinguen dos formas de ajuste, el ajuste prensado longitudinal y el ajuste prensado transversal, se presentan ambos casos.

El ajuste prensado longitudinal mediante la compresión en frío entre árbol y taladro en dirección axial, es decir, a lo largo de las generatrices rectilíneas.

El ajuste prensado transversal se tiene cuando se introduce el árbol en el agujero sin ejercer carga. La fuerza de adherencia se obtiene, en este caso, ya sea por contracción de la pieza exterior calentada antes de proceder al acoplamiento, o bien, por la dilatación de la pieza interior enfriada previamente a su introducción en el agujero (ajuste por dilatación). En el caso de gran sobremedida, puede calentarse la pieza exterior y enfriar la interior.

10.11 UNIONES DESMONTABLES

Se trata en este caso de ensambles que pueden ser montados y desmontados (en teoría) tantas veces como se requiera sin causar daño a los elementos sujetos y a los de sujeción. De estas uniones, las más usuales son las roscadas. Si bien todas operan con el mismo principio, se tienen muy diversos tipos de rosca, así como de elementos (tornillos, birlos, tuercas), empleados para la unión.

Elementos roscados

El empleo de uniones roscadas (tornillo-tuerca) es el procedimiento más empleado en la construcción de máquinas para obtener uniones que puedan fijarse y desmontarse. Para esto pueden estar dotadas las piezas de sendos agujeros pasantes y unirse mediante tornillos y tuercas, o puede también una de las partes a unir llevar rosca interior en la cual se enrosca el tornillo.

Clases de tornillos. Existe una enorme variedad de tornillos atendiendo a su aplicación específica, resistencia, tipo de rosca, etc., que se irán detallando durante el desarrollo del presente tema (figuras 10.47 y 10.48).

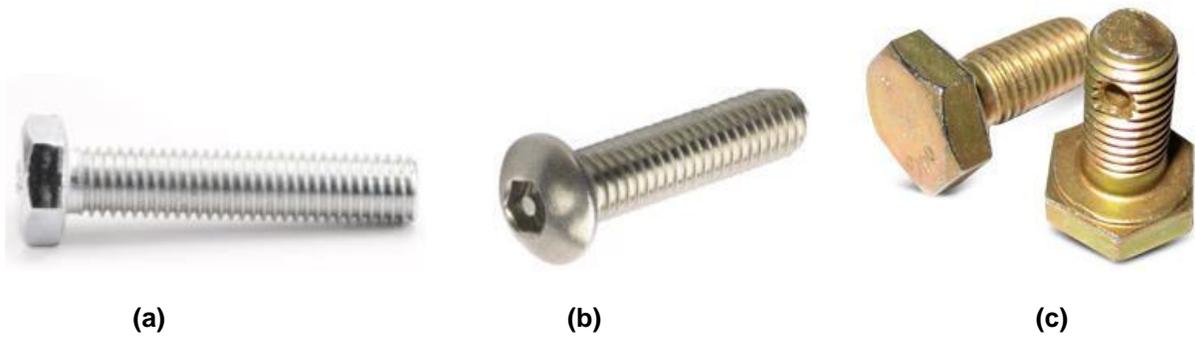


FIGURA 10.47 (a) Tornillo de cabeza hexagonal. (b) Tornillo de seguridad para máquina cavidad interior en cabeza de tipo allen. (c) Tornillo de seguridad con cabeza hexagonal, obsérvese la presencia de un barreno en el cual se coloca un pasador



FIGURA 10.48 Pernos roscados (birlos). En este caso se identifican por su longitud, diámetro, rosca y acabado (galvanizado, pavonado, cromatizado, etc.). En la figura inferior se presentan dos pernos roscados con un acabado superficial de galvanizado (recubiertos con Zn)

Tipos de tornillos

En cuanto a la forma de fabricación de los tornillos se distinguen básicamente dos métodos de procesamiento (en cuanto a la forma de generar la cuerda): tornillos maquinados y tornillos laminados. Lo más usual es que las cuerdas se formen por laminado, tornillos muy pequeños o muy grandes en bajos volúmenes de producción es factible utilizar cuerdas maquinadas. Los primeros se fabrican en tornos automáticos y CNC, a partir de barras de sección circular y los segundos por deformación en frío, figura 10.49.



FIGURA 10.49 Diversos tipos de tornillos con cavidad hexagonal para llave allen. Los de la izquierda son de seguridad

Tornillos con cabeza hexagonal. Estos pueden ser parcial o totalmente roscados, son los más comunes en la construcción de maquinaria. La resistencia del tornillo se indica en función del número de marcas de alto relieve en la cabeza; se emplean con tuerca y normalmente roldana en el caso de agujeros pasantes, o sin tuerca cuando la rosca hembra está tallada en una de las piezas que se trata de unir, figura 10.50.

Los tornillos cilíndricos con hexágono interior (tornillos Allen) son apropiados para uniones en que la cabeza debe ir embutida o que por su colocación no puede usarse llave de boca (española o estriada).

En los tornillos de cabeza cuadrada es más difícil que salte la llave que en los hexagonales. Los tornillos cuadrados largos y con tuerca se les denomina tornillos para andamiajes.

Los tornillos avellanados con nervio prisionero, también conocidos como tornillos para arado, tienen la ventaja de que el nervio evita que se dé vuelta el tornillo al apretarlo.

Los tornillos redondos planos, conocidos como tornillos para cerrajería, se emplean como tornillos pasantes para madera, el cuadro que llevan bajo la cabeza evita que al apretar la tuerca gire también el tornillo.

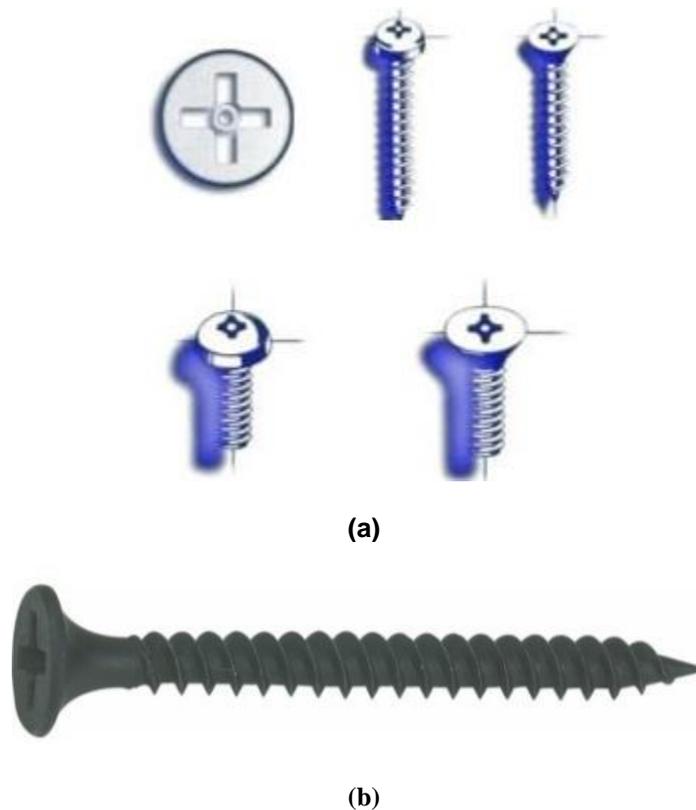


FIGURA 10.50 (a) Diversos tipos de tornillos con ranura en cruz (Phillips)
(b) Tornillos autorroscante (pija) con ranura en cruz

Los espárragos son pernos roscados, se emplean en lugar de los tornillos con cabeza, cuando las uniones han de soltarse frecuentemente. La longitud de la parte que se atornilla depende del material de la pieza en que se atornilla. Para el acero es igual al diámetro del tornillo, para fundiciones de hierro es de $1.25 d$ y para metales ligeros es igual al doble del diámetro.

Para evitar que se aflojen las tuercas se utilizan dos, las cuales van fuertemente apretadas una contra la otra, lo que elimina la posibilidad de giro de estas. Cuando se atornillan espárragos grandes bien ajustados (motores de combustión interna), hay que prever que pueda salir el aire del agujero de la rosca, para lo cual se dispone en la rosca una pequeña estría longitudinal.

Tornillos ajustados. Se emplean cuando el vástago del tornillo debe ajustar exactamente en el agujero para evitar el corrimiento de las piezas a unir, este tipo de unión absorbe grandes esfuerzos cortantes. El vástago es algo más grueso que el diámetro exterior de la rosca, se confecciona, según el campo de tolerancia K6. Los agujeros de las piezas que se van a unir son escariados, según el campo de tolerancia H7.

El vástago reducido del tornillo es sometido a cargas de tracción que sobrecargarían los filetes de la rosca. Para garantizar un buen ajuste entre los elementos unidos mediante uniones roscadas, el apriete debe estar definido y se debe ajustar mediante un torquímetro, con esto se evita el aflojamiento de la junta y la sobrecarga de la unión. La carga aplicada (fuerza tensora previa) produce una deformación elástica del cuerpo del tornillo (alargamiento del tornillo y una compresión de las piezas atornilladas), una carga excesiva puede producir el barrido de las cuerdas.

Tornillos de cabeza ranurada. Se aprietan mediante un destornillador, para no deteriorar la ranura del tornillo, el destornillador deberá tener la anchura y espesor correctos, debe ser plano y no se afilará en forma de cuña.

Los tornillos con cabeza ranurada en cruz (Phillips), permiten ser apretados de modo seguro y fuerte con un destornillador de cruz. Los tornillos con ranura sencilla o en cruz pueden tener la rosca hasta la cabeza o bien, estar dotados de un vástago.

Prisioneros. Son tornillos sin cabeza y roscados en toda su longitud, también conocidos como opresores, que tienen en un extremo una ranura sencilla o entrada hexagonal (Allen) para atornillarse, el otro extremo termina en punta, en espiga o en forma de filo anular, este extremo está generalmente templado.

Tornillos para madera. Conocidos como tira fondos, se fabrican con cabeza ranurada cuando son pequeños y con cabeza cuadrada o hexagonal cuando son grandes.

Tornillos de alto roscado o de corte. Están endurecidos por cementación; tallan por sí mismos la rosca hembra al atornillarse en el agujero del núcleo. Para facilitar la iniciación del tallado van provistos de una entrada y ranuras para la salida de la viruta. Estos tornillos se fabrican para toda clase de materiales hasta una resistencia de 60 kg/mm². Antes de atornillarse deben sumergirse en aceite.

Tornillos para lámina (pijas). Se emplean para la unión de láminas hasta de dos mm de espesor. Tienen una rosca semejante a la de los tornillos para madera. Estos tornillos forman la rosca hembra al ser atornillados. El agujero en la lámina debe ser igual al del núcleo de la rosca del tornillo. Se fabrican con cabeza ranurada sencilla o en cruz y con cabeza hexagonal.

Cuando se unen piezas de metal ligero, material sintético, madera, etc., las roscas interiores se rompen con facilidad, por lo que se hace necesario el uso de bujes roscados, los cuales tallan o recalcan la rosca hembra por sí mismos al atornillarse. Este sistema es de gran utilidad en reparaciones.

Pernos de anclaje. Los pernos de anclaje sirven para fijar las máquinas a sus bases de sustentación.

Tuercas

Las tuercas, elementos complementarios de las uniones atornilladas, se fabrican en una gran variedad de formas atendiendo a su aplicación. Las tuercas hexagonales tienen una altura de 0.8d a 0.5d. Las tuercas cuadradas se hacen con las mismas dimensiones que las hexagonales. Las tuercas de corona, almenadas o de castillo, tienen 6 o 10 ranuras, se emplean cuando han de ser aseguradas con pasadores de aletas (chavetas).

Las tuercas de caperuza o de mariposa, protegen el extremo del tornillo contra deterioros y dan un aspecto decorativo. Las tuercas de mariposa y las tuercas moleteadas, tienen un diseño que permite el apriete manual sin ninguna llave auxiliar.

Las tuercas de racor o tuercas de unión se emplean frecuentemente para uniones roscadas de tubos que no pueden realizarse mediante manguitos.

Los tornillos y tuercas se fabrican partiendo de barras redondas o hexagonales con resistencias de 300 a 400 MPa para los normales y de 1000 a 1200 MPA para los de alta resistencia, figuras 10.51 y 10.52.

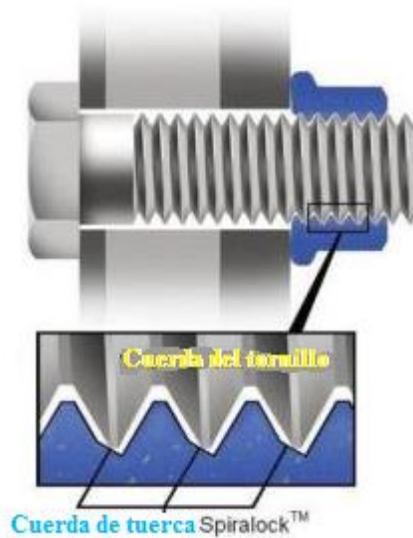


FIGURA 10.51 Descripción esquemática de ensamble tuerca-tornillo



FIGURA 10.52 (a) Diferentes tipos de tuercas hexagonales. (b) Tuercas de castillo, de collar y con arandela. Se observan dos arandelas (roldanas) de presión. (c) Tuerca cuadrada. (d) Tuerca de mariposa o con aletas

Dispositivos de seguridad para los tornillos

Los dispositivos de seguridad se emplean en uniones atornilladas donde es imperativo evitar que la junta se afloje, por los peligros que pudiera representar.

En uniones de poca importancia y débil sollicitación es común asegurarlas mediante golpes de punto, selladores líquidos que endurecen al cabo de corto tiempo. El empleo de selladores es usual en aparatos delicados que pueden desajustarse, para evitar así la manipulación de personal no autorizado y conocer cuando esto se presente para efectos de garantía.

Las arandelas o roldanas aumentan la superficie de contacto, mejoran el asiento de la tuerca y disminuyen el peligro de desgaste de la pieza al apretar y aflojar, incrementando la seguridad en cuanto a la permanencia del ajuste, figura 10.53.

La falta de paralelismo entre las superficies de asiento se compensa mediante arandelas en cuña o esféricas. Esto es frecuentemente necesario en perfiles laminados y piezas de fundición, ahorrándose con ello la, a veces costosa, operación de rebajar las piezas para conseguir superficies de apoyo, figura 10.54.

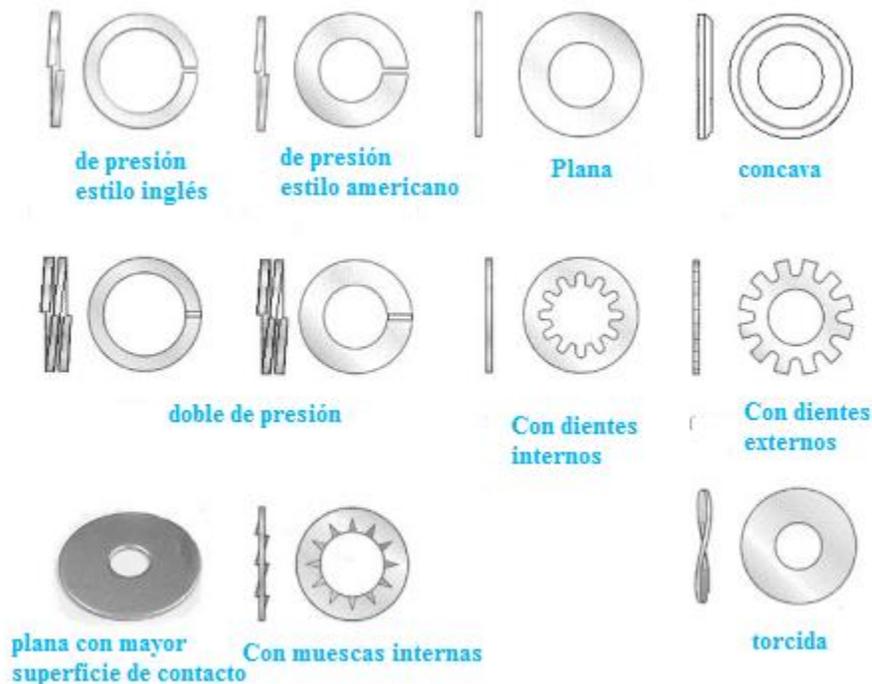


FIGURA 10.53 Diferentes tipos de roldanas (de presión, plana, doble, de estrella o con dientes, aserrada, etcétera)



FIGURA 10.54 Izquierda roldanas planas, derecha con aserrado externo

Llaves para tornillos y tuercas

El apretado de tornillos y tuercas tiene que ser realizado con ciertas precauciones. Para atornillar tapas y bridas, hay que apretar los tornillos o tuercas en cruz y en varias pasadas. La longitud de palanca de cada llave está calculada de tal forma que produzca un apriete normal y no se presente ninguna sobrecarga en el tornillo. Si se alarga la llave mediante un tubo, el tornillo resultará cargado en exceso y frecuentemente se inutilizará por fractura o falla de las roscas.

Deben emplearse únicamente llaves que ajusten bien, el uso de llaves desgastadas, deformadas o que no corresponden a la medida se traduce en deterioro de las cabezas de los tornillos o las tuercas; mal apriete, inconvenientes para aflojar la unión y destrucción de tornillo y tuerca, además pueden producirse accidentes por resbalamiento de las llaves.

Existen llaves ajustables, denominadas llaves inglesas que pueden emplearse para cualquier medida. Cuando se requieren aprietes muy precisos es necesario el uso de torquímetros o llaves dinamométricas.

Calidad de los tornillos

Dado el elevado número de aplicaciones de los tornillos, estos se fabrican de una gran variedad de materiales, sin embargo, los que tienen un uso más intensivo son los de acero.

Entre los aceros que más comúnmente se usan para pernos y tornillos figuran los AISI 1013, 1018, 1038, 1041, 1054, 1340, 4037, 4140, 4150, 50B40, 8635, 3735, 4340, entre otros. Sin

embargo, el proceso particular de cada fabricante se puede adaptar más fácilmente a un acero que a otro.

El cálculo de los pernos suele hacerse basándose en una carga de prueba o esfuerzo de prueba. En general, una carga de prueba es la acordada por el comprador y el fabricante para que se cumplan los requisitos necesarios.

Para pernos y tornillos, el esfuerzo de prueba en las especificaciones SAE suele ser aproximadamente el correspondiente a la resistencia de fluencia σ_0 .

Las especificaciones ASTM y SAE se pueden satisfacer con muchos aceros normalizados; por ejemplo, el SAE 1045 QT (templado y revenido) puede fácilmente llenar las exigencias del SAE grado 5.

Uniones con pasadores

Son uniones de tipo desmontable que según su uso pueden ser: de ajuste, de sujeción y de seguridad.

Los pernos de ajuste tienen la misión de llevar exactamente a su posición las piezas a unir, facilitan el montaje y evitan desplazamientos laterales. En caso de uniones atornilladas fijan la exacta situación de las piezas y las aseguran en caso de golpes o choques.

Los pernos de sujeción constituyen en muchas uniones el único medio de sujeción, se emplean para transmitir pequeñas cargas, son más baratas que los tornillos y forman, por lo general, uniones permanentes. También se usan como seguros que evitan el desensamble de las piezas, en la fabricación de automóviles se substituyen por el pasador de aletas (chaveta).

Las clavijas de seguridad por rotura evitan sobrecargas en las piezas delicadas o de alto valor, fallando por cizalladura al producirse la sobrecarga, con lo cual la unión resulta interrumpida. Después de eliminar la causa de la sobrecarga se coloca una nueva clavija.

Las clavijas atendiendo a su forma se clasifican en: clavijas cilíndricas cónicas, entalladas y manguitos de sujeción. La elección del tipo de clavija a usar depende en primer lugar de su aplicación y del costo de fabricación.

Chavetas y cuñas

Las chavetas y las cuñas se emplean para unir flechas o ejes, a poleas, coples o ruedas dentadas, en México, en ocasiones se usan como sinónimo el término chaveta con el de cuña. Tienen la misión de evitar la rotación del mamelón sobre el eje y, además, evitar el desplazamiento axial.

Las chavetas normalizadas tienen una conicidad de 1:100, la cual produce, entre las piezas que une, un esfuerzo de compresión en dirección radial que es lo que realiza la unión. Las cuñas no producen ninguna fuerza de compresión ya que se trata de una simple unión de arrastre. Existe un tipo de elementos de unión conocidos como retenes de anillo que se emplean con gran éxito en la industria automotriz, aeronáutica y electrónica, por su economía y facilidad de instalación, esto para evitar movimiento axial, figura 10.55.

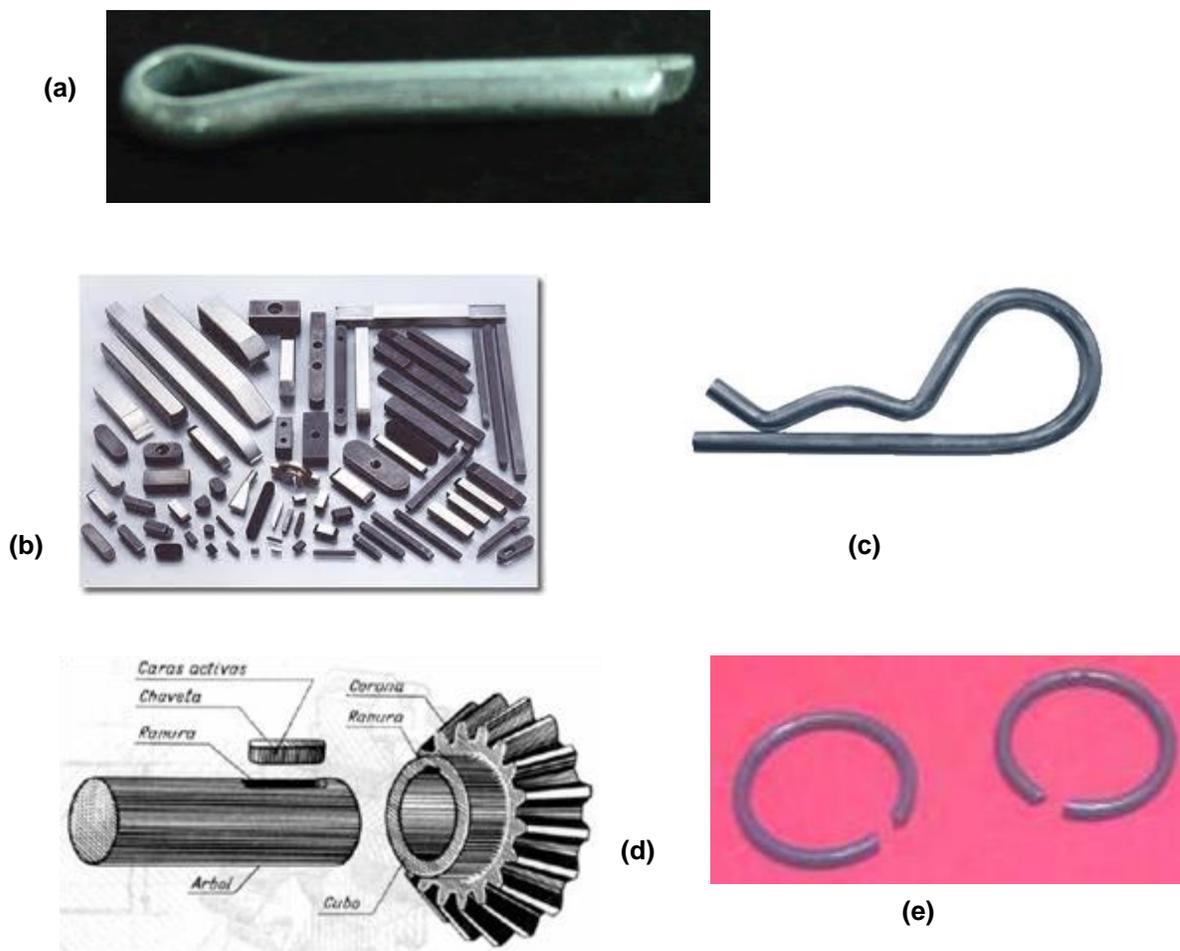


FIGURA 10.55 (a) Pasador, (b) Cuñas, (c) Chaveta, (d) Unión mediante cuña, (e) Retén

CAPÍTULO 11

PROCESOS DE MANUFACTURA EN POLÍMEROS PLÁSTICOS Y ELASTÓMEROS

11.1 CONCEPTOS GENERALES

Si bien los polímeros de origen natural han sido utilizados con diversos fines desde la edad de bronce y aún antes, es hasta 1839 (la patente data del 15 de junio de 1844) con el descubrimiento del proceso de vulcanización por Charles Goodyear (1800-1860) cuando estos materiales emergen a la Edad Moderna. De su uso, desde tiempos inmemoriales, se debe recordar que el término olmeca en náhuatl significa hombres de hule, ya que precisamente la civilización ahora denominada por nosotros como Olmeca dominó el proceso de extracción del látex a partir del árbol del hule (castilla elástica o árbol del hule de panamá o simplemente árbol del hule) (figuras 11.1a , b, c, d) y su transformación a través de mezclar el látex con el jugo de flores de la Ipomoea Alba, con lo cual se permitía su endurecimiento y posterior aplicación (una de las más conocidas fue la producción de pelotas), el proceso se remonta al 1600 a.C.



(a)



(b)

FIGURA 11.1 a) Sembradío de castilla elástica (árbol del hule), b) Corte en el tronco para obtener el látex

El proceso de vulcanización del hule mediante la adición de azufre cambió las posibilidades de aplicación de este, de un mero material empleado para impermeabilización a uno con muy diversas aplicaciones industriales.



(c)



(d)

FIGURA 11.1 **c)** Recolección de la sabia del árbol, **d)** Entre los pueblos mesoamericanos el juego de pelota estuvo muy difundido. Se utilizaba una pelota de hule sin vulcanizar con un peso entre 3 y 4 kg

Por su parte, los plásticos también se han desarrollado a nivel industrial recientemente, ya que el primer plástico de origen natural fue patentado por Alexander Parkes [1813-1890], prolífico ingeniero e inventor quien patentó para 1846 un proceso de vulcanización de hule en Inglaterra, así como los bronce fosforados [1848]. En 1856 desarrolló la parkesina, material termoplástico que es un celuloide basado en nitrocelulosa, el cual por su alta inflamabilidad y su costo de producción tuvo limitada aceptación a nivel industrial, sin embargo, corresponde a este material el honor de haber sido el primer plástico desarrollado. Más adelante, a inicios del siglo XX, se produjo el primer plástico sintético, recayendo este honor en el invento de Leo Bakenland [1863-1944], denominado baquelita [resina de fenol-formaldehído], polímero que por su versatilidad, estabilidad química, propiedades mecánicas y bajo costo fue el primer plástico de verdadera aplicación industrial [patente US 942,699]. Mucho desarrollo tecnológico se ha sucedido desde entonces, lo que nos permite a la fecha disponer de una amplia variedad de plásticos (figuras 11.2 y 11.3) y elásticos, con aplicaciones desde goma de mascar hasta la producción de estructuras aeroespaciales.



FIGURA 11.2 Existe una gran variedad de formas, propiedades y aplicaciones de las piezas producidas en plásticos. En este caso se aprecian diferentes piezas producidas por inyección



FIGURA 11.3 Las propiedades de los plásticos permiten lo mismo ser utilizados para formar el tablero de un automóvil que tarimas para el embalaje (para muchas aplicaciones las tarimas de madera ya están prohibidas)

A la vez que se han desarrollado nuevos polímeros ha sido necesario diseñar procesos para transformar estos en piezas útiles, así, se han generado procesos continuos como la extrusión y por lote, como la inyección. Muchos de estos son característicos de las resinas termofijas como la baquelita (moldeo por compresión, moldeo por transferencia), mientras que otros (inyección) son adecuados para termoplásticos y algunos (moldeo y vulcanización) son típicos de los hules. La invención de la baquelita, en 1909, da inicio oficialmente a la edad de los plásticos. Adolfo Von Baeyer, quien recibió el premio nobel de química en 1905, había ya experimentado con el material en 1872, sin haber concluido su desarrollo. Este material pudo ser transformado mediante moldeo, extrusión y moldeo por transferencia (dadas sus propiedades mecánicas y eléctricas) en partes para radios, aisladores eléctricos, partes para equipo doméstico, entre otras muchas

aplicaciones; tan solo en 1944, a la muerte de Leo Baekeland, se producían anualmente más de 175,000 ton, en forma de más de 15,000 artículos, figura 11.4.



FIGURA 11.4 a) La extrusión permite lo mismo la producción de tuberías, mangueras, perfiles, recubrimiento de cables de cobre, que la producción de fibras. La formación de enlaces cruzados incrementa la rigidez del plástico y, por consecuencia, su aplicación en rotomoldeo (envases para químicos), extrusión, inyección y termoformado. (b) Casco de una pequeña lancha formada en una sola pieza de plástico

Los procesos de manufactura empleados en la transformación de plásticos se pueden agrupar como:

- a. Continuos: extrusión, extrusión-soplo, calandreado, entre otros.
- b. Por lotes: inyección, espumado, inyección-soplado, colado, moldeo por transferencia, moldeo por compresión, termoformado.

11.2 INYECCIÓN

Si bien la parkesina resultó un fracaso a nivel comercial, fue el detonante para que otros buscaran mejorar el producto, tal fue el caso de John Wesley Hyatt [1837 a 1920] quien patentó en EUA en 1869 el celuloide, material que aplicó en la producción de bolas de billar, placas dentales y teclas para piano. Dadas las aplicaciones requirió de un equipo para dar forma al producto, por lo que para 1872 patentó la máquina de inyección de plásticos. El equipo era simple y sus principios se han utilizado hasta la fecha en la producción de equipos manuales de baja capacidad (menos de 50 g), básicamente consistía en un ariete con el cual se impulsaba el material contenido en una cámara de plastificación para obligarlo así a llenar la cavidad del molde. Con este equipo se empezaron a fabricar botones, adornos, peinetas, entre otros objetos.

El desarrollo de los termoplásticos en la década de 1930 y su posterior expansión impulsada en mucho por las necesidades planteadas por la Segunda Guerra Mundial determinaron la necesidad de materiales y métodos de transformación en masa y a bajo costo; con esta óptica, la inyección de plásticos se popularizó y desarrolló permitiendo la producción de una infinidad de artículos (figura 11.2), producidos en una amplia variedad de plásticos con propiedades que han permitido su uso lo mismo en juguetes y adornos que en demandantes elementos de maquinaria. Para 1946, James Watson Hendry construyó la primera máquina de husillo, la cual permitió un control más preciso del proceso, así como la introducción mezclas y la combinación de materiales vírgenes con reciclados. A la fecha existen máquinas de inyección que van desde unos 40 g hasta más de 20 kg, lo que permite una amplia gama de tamaños a la vez de una gran productividad, dando como resultado mínimos costos para la fabricación en masa.

A la fecha, la inyección en máquinas horizontales y verticales se emplea sobre todo en termoplásticos, aun cuando también pueden ser aplicados los principios en termofijos. Las máquinas (figuras 11.5 y 11.6) constan de:

- a. Dosificador: permite depositar en la cámara de plastificación la cantidad de material necesaria para la inyección de la pieza.
- b. Sistema de plastificación: consiste en un tornillo extrusor con desplazamiento axial, por efecto de un pistón.
- c. Sistema de calentamiento y enfriamiento: consta de resistencias eléctricas colocadas alrededor del cañón, estas permiten el calentamiento de la resina, que por efecto del movimiento del tornillo se mezclan y desarrollan la viscosidad adecuada para la inyección. Una vez inyectada la resina es necesario enfriarla para su manipulación por lo que se dispone de un sistema de enfriamiento.
- d. Dispositivo de inyección: en la actualidad consiste fundamentalmente de un pistón que desplaza axialmente al plastificador para llevar a cabo la inyección del material.
- e. Sistema de apertura y cierre: se trata de aquellos elementos que permiten la apertura y cierre del molde.
- f. Elementos mecánicos de sujeción: se trata de todos los elementos mecánicos de soporte del conjunto, las placas porta molde (fija y móvil) y barras guía entre los principales elementos.
- g. Sistemas de monitoreo y control; estos permiten ajustar las diferentes variables del proceso como son temperaturas, tiempos y presiones.



FIGURA 11.5 Máquina de inyección con fuerza de cierre de 4000 kN, capacidad de inyección de 2400 cm³, presión de inyección de 138 MPa y capacidad de plastificación de 132 g/s. La máquina pesa 16 ton y mide 8.6 x1.9 x2.2 m

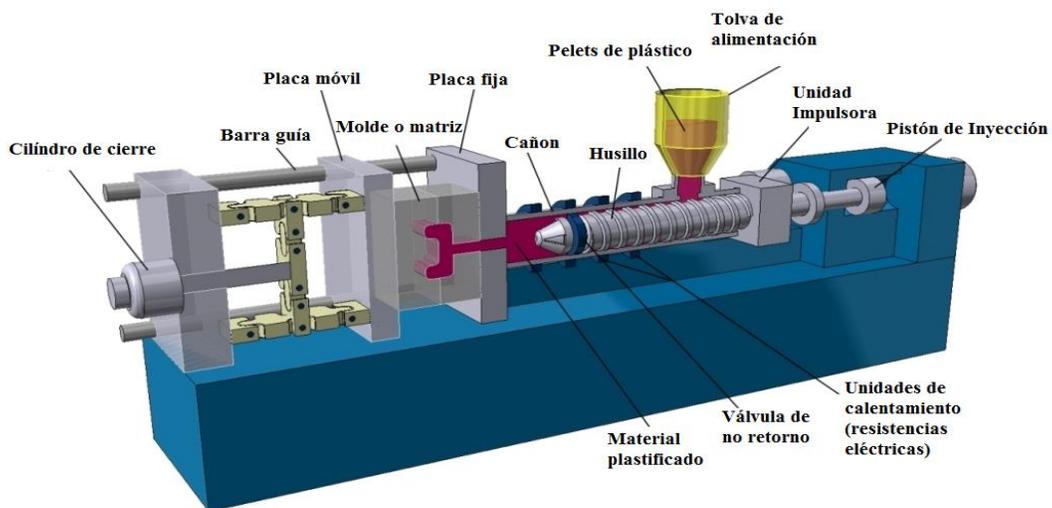
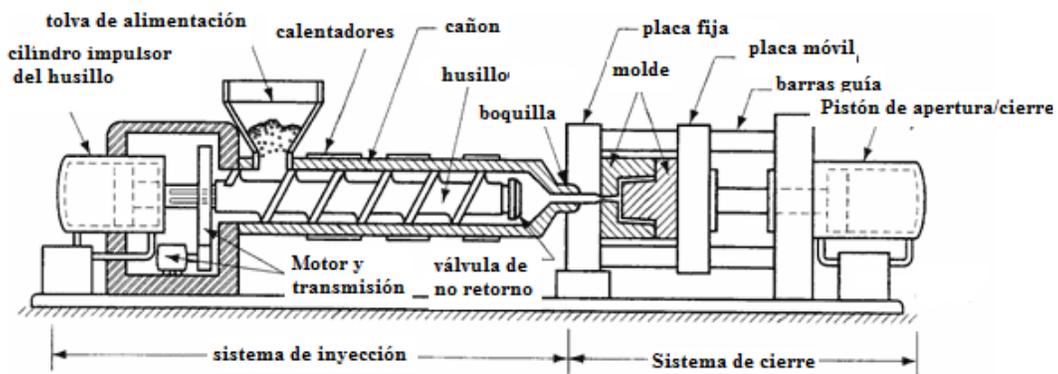


FIGURA 11.6 Descripción esquemática de una máquina de inyección horizontal

Las máquinas de inyección de plásticos permiten la alimentación del polímero a una temperatura que permite su fácil moldeo sin que se presente degradación de este, por tal motivo, cada resina tendrá sus condiciones particulares de proceso, esto en lo que se refiere tanto a temperatura como presión. Es conveniente mencionar que en la actualidad existen mucho más de 20,000 diferentes resinas que pueden ser transformadas por este método y que cada año esta cifra se incrementa en más de 500 nuevos materiales. Los materiales son seleccionados con base en las propiedades mecánicas y químicas que se requieren para el servicio, entre los más usuales se pueden mencionar: polietilenos, poliestirenos, PVC, SAN, ABS, polipropileno, poliuretano, policarbonatos, acetato de celulosa, acetobutirato de celulosa, etilcelulosa, poliamidas, polimetil metacrilato, entre otros, véase la figura 11.7. Por ejemplo, las poliamidas requieren de 250 °C como temperatura de inyección (presentan una contracción de 1 a 2.5%), mientras que el polietileno de baja densidad demanda alrededor de 260 °C (contracción de 1.5 a 3%), el PVC flexible 170 °C ((1.5 a 3% contracción) y el acetato de celulosa 170 °C (contracción de 0.5 a 0.7%). Dado que los tiempos de plastificación e inyección son del orden de segundos, resulta el enfriamiento una variable toral del proceso y, por consecuencia, el sistema de enfriamiento de los moldes, ya que, sin este, el proceso se volvería impráctico al requerir de varios minutos para eliminar el calor excedente y poder retirar la pieza.



FIGURA11.7 Inyectora vertical para plásticos, 120 g de capacidad de inyección hasta 2000 bar, fuerza de cierre 550 kN, peso de la máquina 2200 kg, dimensiones; 1.75 x2.40 x2.45 m

De acuerdo con el volumen de piezas a producir, los moldes de inyección se fabrican preferentemente de acero (altos volúmenes de producción) con un diseño modular, cuidando que los elementos que sufren mayor desgaste puedan ser sustituidos sin tener que reemplazar el molde. Para bajas presiones y cuando el número de piezas es pequeño se pueden producir estos en aluminio o en zamak; por ejemplo, estos últimos son muy adecuados para moldes de calzado.

Los parámetros fundamentales de un equipo de inyección son:

- a. Capacidad de cierre
- b. Capacidad de plastificación
- c. Características del husillo (diámetro, relación longitud a diámetro)
- d. Espacio disponible para la instalación del molde
- e. Presión de inyección
- f. Capacidad de inyección
- g. Volumen de inyección
- h. Fuerza y carrera de separación
- i. Capacidad de calentamiento
- j. Capacidad del sistema hidráulico
- k. Sistemas de control

Resulta por demás evidente de que existirá una gran variedad de máquinas, en función no solo de su capacidad sino de su aplicación. Existen máquinas con mesa rotatoria que permite presentar varios moldes a la boquilla de inyección; para inyección-soplo, la máquina cuenta con etapas de inyección y de soplado, existen sistemas de inyección-espumado, inyección para resinas termofijas. En estas máquinas, los moldes disponen de sistema de calentamiento para que en estos se desarrolle el encadenamiento cruzado que permite alcanzar la rigidez en el polímero; para el caso de inyección en dos colores también se dispone de máquinas equipadas especialmente; todo lo anterior sin considerar la capacidad de inyección, que como ya se comentó, puede alcanzar hasta los 25 kg y fuerzas de cierre de 50,000 kN [5000 ton]; asimismo, el nivel de automatización se extiende desde equipos manuales, semiautomáticos hasta totalmente automatizados, aún en la descarga del producto, figura 11.8.

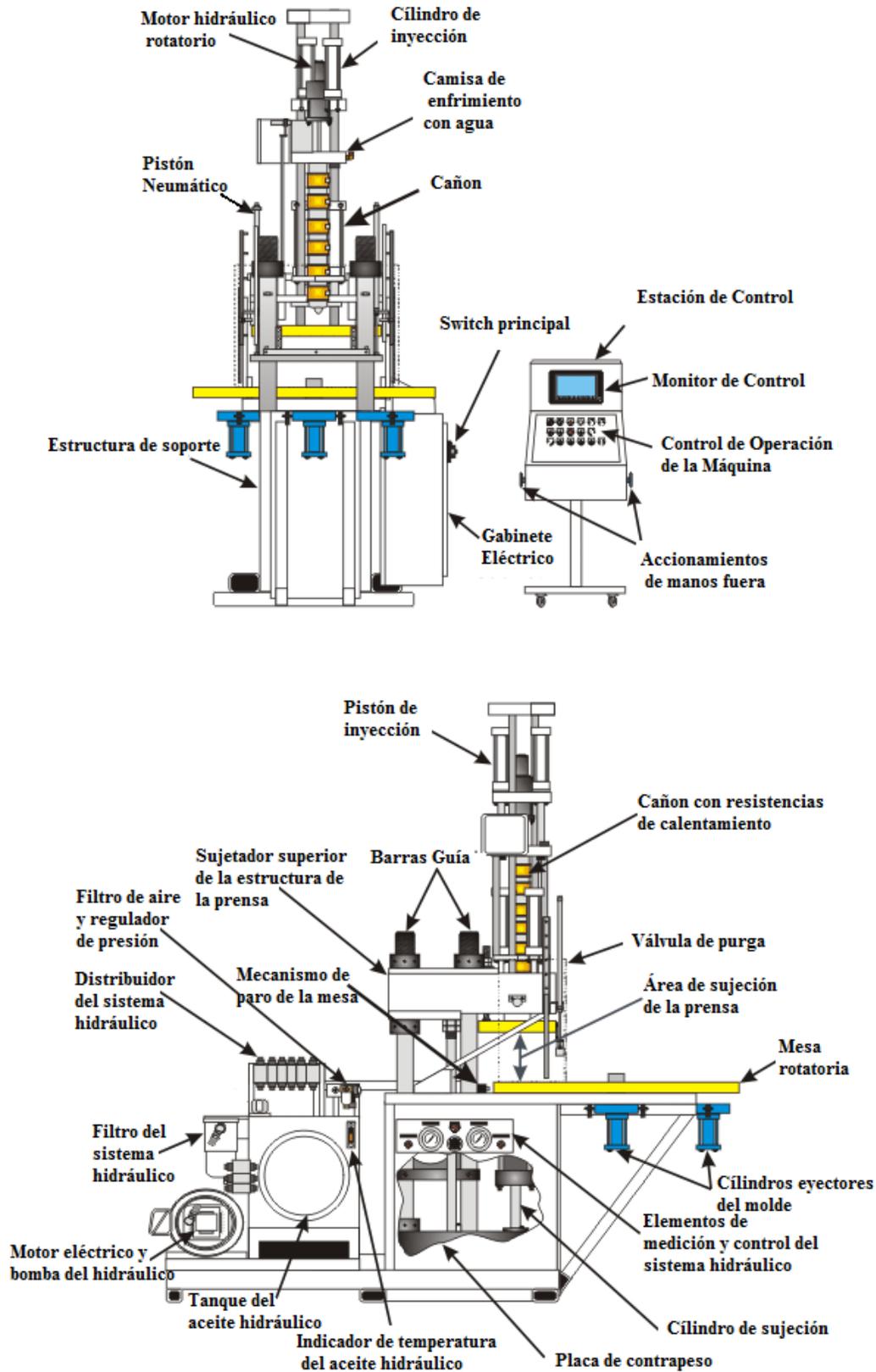


FIGURA 11.8 Descripción esquemática de una máquina de inyección vertical

El tiempo de ciclo t_c está dado por $t_c = t_{cm} + t_p + t_i + t_e + t_{am}$; donde, t_{cm} , t_{am} representan los tiempos de cierre y apertura del molde (el total de la suma de ambos es no mayor a 4 s), t_p representa el tiempo de plastificación (este no es no mayor a 6 s adicionales al cierre del molde), t_i es el tiempo de inyección (a pesar de la viscosidad del plástico, el llenado del molde se realiza rápidamente, dependiendo de la masa a inyectar, la cual va desde unos cuantos gramos hasta más de 25 kg, razón por la que será muy variable, pero en general no es superior a los 10 s), por último, el tiempo de enfriamiento t_e es el dominante en el proceso (de ahí la importancia del sistema de enfriamiento del molde) y depende de la masa de la pieza y desde luego de su espesor. En total, el tiempo de ciclo va desde unos 20 hasta no más de 120 s. Lo cual permite la producción de miles de piezas por día.

Algunas de las ventajas del proceso de inyección son:

1. Rapidez. Se correlaciona con la productividad, ya que el ciclo total va de unos 20 s a no más 2 m.
2. Tolerancias y acabados. La precisión dimensional y los acabados obtenidos permiten que las piezas puedan ser producidas directamente en su forma final.
3. Versatilidad. Se pueden producir piezas de muy diferentes dimensiones, resinas y geometrías. Es factible tener insertos y trabajar más de un color.
4. Bajo costo. La rapidez de producción y la automatización, así como el volumen a producir, permiten reducir los costos de tal forma que se sustituyan piezas que originalmente se producían en otros materiales (metales y cerámicos). Si bien el costo del molde representa una inversión importante (este es muy variable dependiendo de su tamaño y complejidad). Es conveniente mencionar que existen empresas dedicadas a la renta de moldes de inyección, permitiendo con esto la producción con menores costos de inversión y disminuyendo el costo final del producto al reducir la cantidad a prorratear entre el número de piezas fabricadas.

La capacidad de la máquina está definida por volumen de la pieza, de tal manera que el número de piezas a producir por ciclo de inyección n es definido por
$$n = \lambda \frac{V_{im}}{V_p + V_a}$$

donde V_{im} es la capacidad de inyección de la máquina, V_p representa el volumen de la pieza a inyectar, V_a es el volumen de los elementos de alimentación y λ es un factor de eficiencia del equipo que en principio se puede considerar entre 0.8 y 0.9. La fuerza de cierre de la máquina f_c deberá ser $f_c \geq \eta p_i (S_p + S_a)$, donde p_i es la presión de inyección, S_p , S_a representan el área proyectada sobre el plano de partición de la(s) pieza(s) inyectada(s) y la correspondiente al bebedero y alimentaciones, figura 11.9.

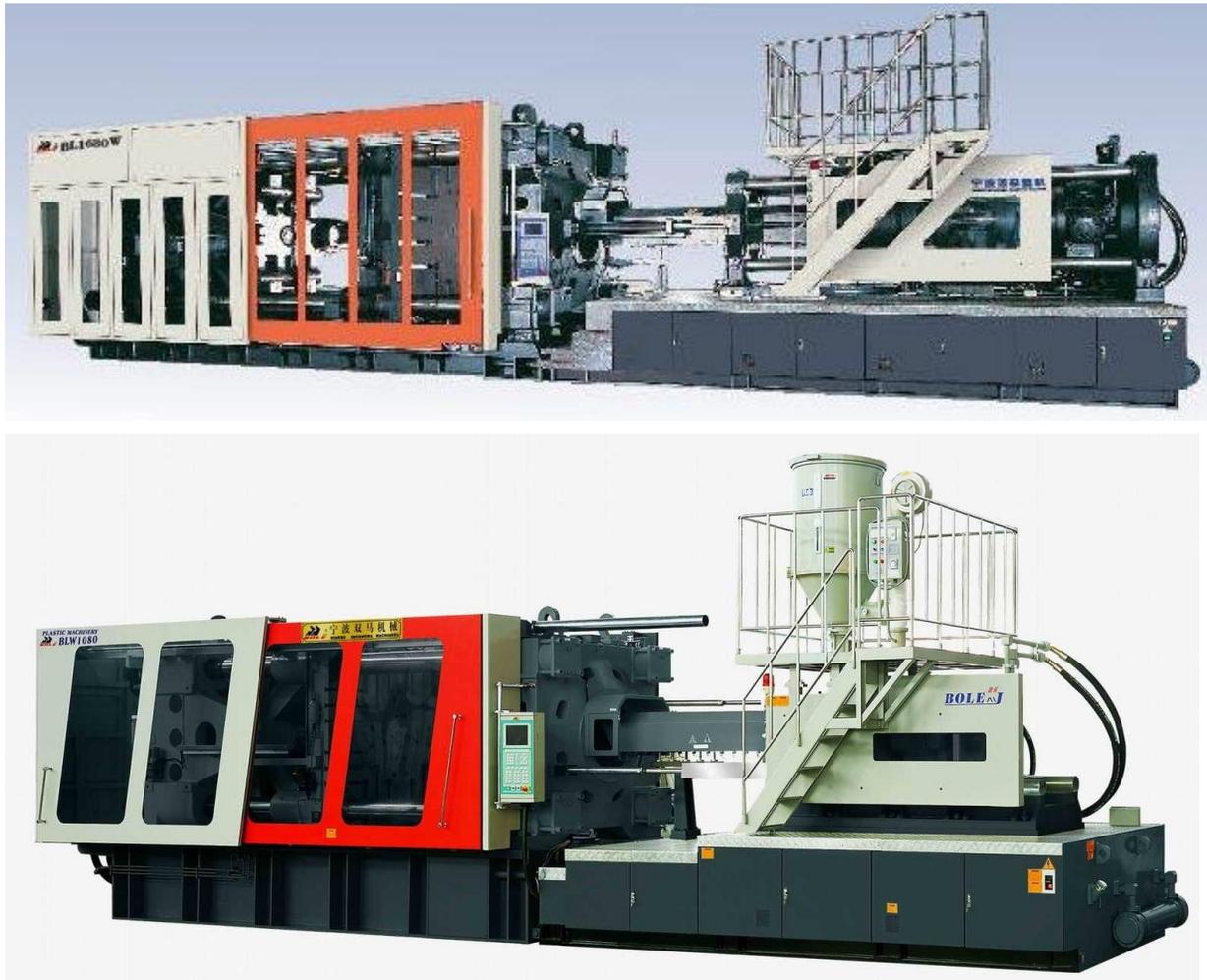


FIGURA 11.9 Máquinas 1300W y 1080W, constructor Ningbo Shuangma Machinery Industry, Co. Ltd., Zhejiang, China. La presión de estas va de 145 a 205 Mpa, la 1300W tiene una fuerza de cierre de 1080 ton, con una capacidad de inyección de hasta 5000 g, la máquina pesa del orden de 58 ton. La 1300W presenta una fuerza de cierre de 3000 ton, permite inyectar hasta 6400 g, el peso del equipo es de 70 ton

Matrices de inyección. Las matrices y moldes de inyección se diseñan y fabrican en función del volumen a producir, en el caso de corridas cortas se pueden utilizar moldes de zamak o de aluminio, los cuales provienen en muchas ocasiones de fundición con mínimas operaciones de maquinado (básicamente aquellas que permiten su ajuste, ensamble, alineación y alimentación). Para alta producción se emplean aceros para moldes o aceros para nitruración (la viscosidad y agresividad del polímero fundido generan un rápido desgaste, sobre todo en los puntos de entrada), los moldes son maquinados por fresado o por electroerosión. Como ya ha sido mencionado, una de las ventajas de la inyección es su versatilidad, por lo que para realizar cavidades se emplean corazones también en acero, los cuales son accionados a través del movimiento de apertura y cierre de la máquina o por pistones que se accionan de manera independiente, figura 11.10.

Para cualquier molde es necesario considerar un ángulo de salida (1 a 2°, en longitudes de hasta 100 mm) que permita la extracción de la pieza. La relación mínima de espesor a área es particular para cada resina, sin embargo, es común alcanzar espesores de 2 a 3 mm. Se recomienda que las piezas inyectadas sean de espesor uniforme, aun en las esquinas, ya que los cambios de espesor demandan mayores presiones de inyección, problemas de alimentación y por ende mayor complejidad del molde. Los radios r pueden tener ser como mínimo $r = \frac{h}{4}$, donde h

representa el espesor, lo más recomendable es $h = \frac{h}{3}$ a $\frac{h}{2}$. Los refuerzos o costillas deben ser

de $b = \frac{h}{2}$ a $\frac{2h}{3}$ con relación al espesor con un ancho del orden de tres veces su altura; es

conveniente considerar que mayor espesor de la pieza representa un incremento en los problemas por contracción durante la solidificación y enfriamiento de la resina, además de incrementar el tiempo de ciclo (se requiere más tiempo de inyección y de enfriamiento).

Durante el llenado de la resina, el molde se encuentra lleno de aire, el cual se debe evacuar para evitar defectos en la pieza, por tal motivo, sobre la línea de partición, el molde presentará una holgura [0.05 mm] suficiente para eliminar al aire, pero imposible para que la resina se introduzca en dicho espacio.

Es conveniente considerar que en la inyección se pueden obtener tolerancias del orden de 0.1 hasta 0.05 mm.

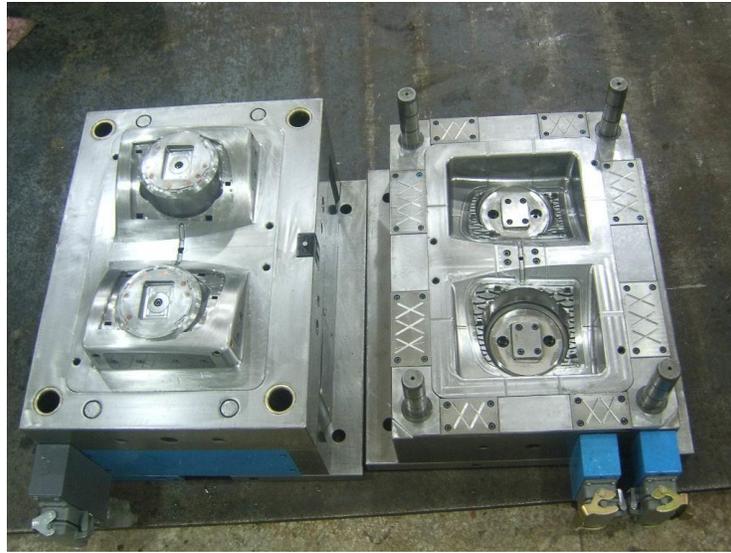


FIGURA 11.10 Molde de inyección con dos cavidades

Para facilitar la construcción del molde, este se diseña y construye de forma modular, lo que permite que las piezas que sufren mayor deterioro se puedan reemplazar, por ejemplo, los bebederos y alimentaciones, figura 11.11. Para facilitar el tratamiento térmico y reducir los costos, es conveniente el seccionamiento modular del molde, ya que este debe de tener una dureza del orden de 35 a 45 HRc, aunque en elementos particularmente sometidos al desgaste es conveniente tener durezas de 50 a 60 HRc.

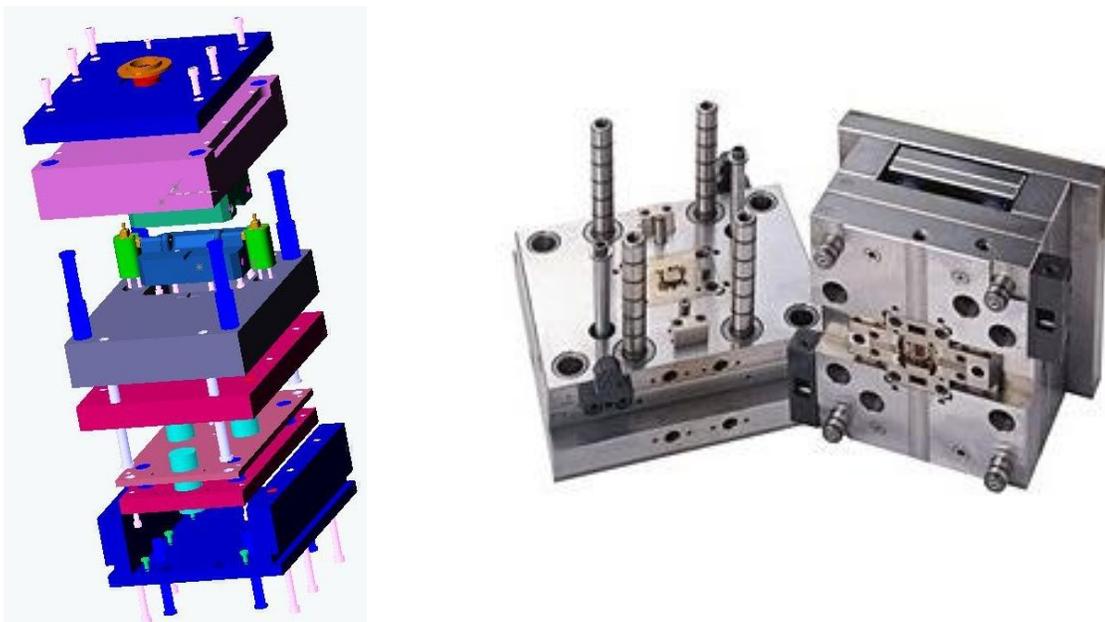


FIGURA 11.11 Descripción esquemática de los elementos que componen el molde de inyección

Para enfriar el molde, este dispone de una serie de barrenos que permiten que el agua circule por el interior del molde para ser enviado a un enfriador y recircular, con esto se limita el desgaste (un molde puede servir para más de 500,000 ciclos de inyección) reduciendo el tiempo de ciclo. Como ya fue mencionado, la matriz de inyección dispone de una serie de insertos y subensambles para facilitar su mantenimiento y reducir los costos de operación. En algunos casos, el molde no es para una pieza, sino que presenta múltiples cavidades diferentes (por ejemplo, todas las piezas de un juguete de armar) que conforman un set o conjunto.

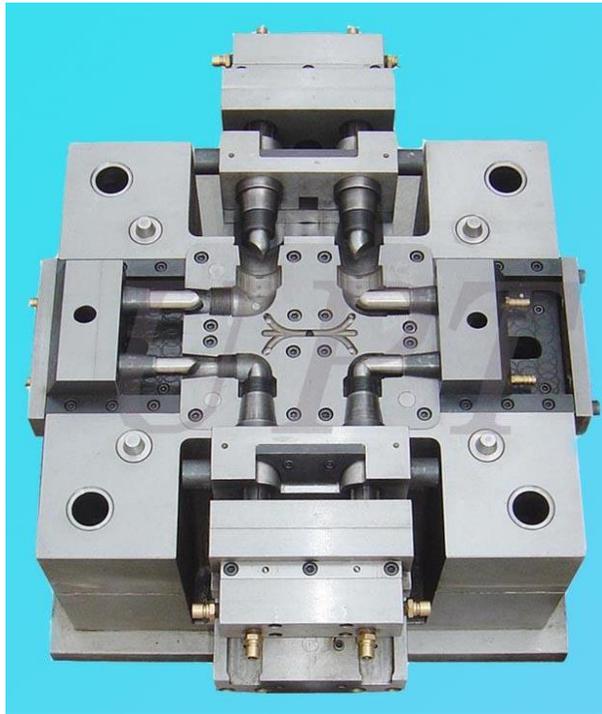


FIGURA 11.12 Molde de Inyección con 4 cavidades, cada una con dos corazones, obsérvese que los corazones han sido desplazados a las diferentes posiciones que alcanzan durante la extracción (con el molde abierto) y en la inyección (con el molde cerrado)

Una vez diseñado el molde, se procede a su evaluación mediante paquetería especializada, con estos resultados se proponen y, en su caso, se realizan ajustes para garantizar un buen y uniforme llenado de las cavidades. Con esta información, se procede a la fabricación del molde el cual una vez terminado y sin todavía el tratamiento térmico se monta en la máquina para probar su llenado. Inicialmente se trabaja con masas inferiores a la requerida para el llenado del molde, y se va incrementando hasta alcanzar un 99% del total necesario. En estos ciclos, se observa la homogeneidad en el llenado de las cavidades y la tendencia a la aparición de rebabas, con estas

observaciones se pueden ajustar las dimensiones de las alimentaciones y el perfecto cierre del molde. Con ayuda de estos ciclos experimentales, se pueden también ajustar los parámetros de inyección (tiempos de las etapas del ciclo, presión y temperatura de inyección). Una vez que todas las cavidades se llenan de manera uniforme se procede a liberar el molde y mandarlo a su tratamiento térmico y ajuste final, conectando ahora ya el sistema de enfriamiento y los diferentes sensores (llenado y temperatura). En el caso de resinas termofijas no se utiliza sistema de enfriamiento, requiriéndose más bien elementos de calentamiento que permitan alcanzar el enlace cruzado y por ende el endurecimiento del material.

11.3 EXTRUSIÓN

La extrusión de plásticos (figura 11.13) es un proceso continuo de alta producción que permite la generación de perfiles, tubería, recubrimiento de cables, formación de película y preparación del material para ciclos posteriores del proceso (figura 11.14). Para la extrusión de plásticos, lo que se requiere es una máquina de husillo horizontal en la que continuamente se va dispensando la resina para ser calentada, plastificada, comprimida y, posteriormente, obligada a pasar a través de un dado con una forma aproximada a la del perfil que se va a producir (es necesario considerar aquí que a diferencia de un metal extruido cuya recuperación elástica es mínima, el polímero presenta un comportamiento viscoelástico, por lo que al salir del dado trata de recuperar su geometría inicial modificándose sensiblemente, (figura 11.15).



FIGURA 11.13 Perfiles extruidos [Dan Shan Plastics Co. Ltd, China]

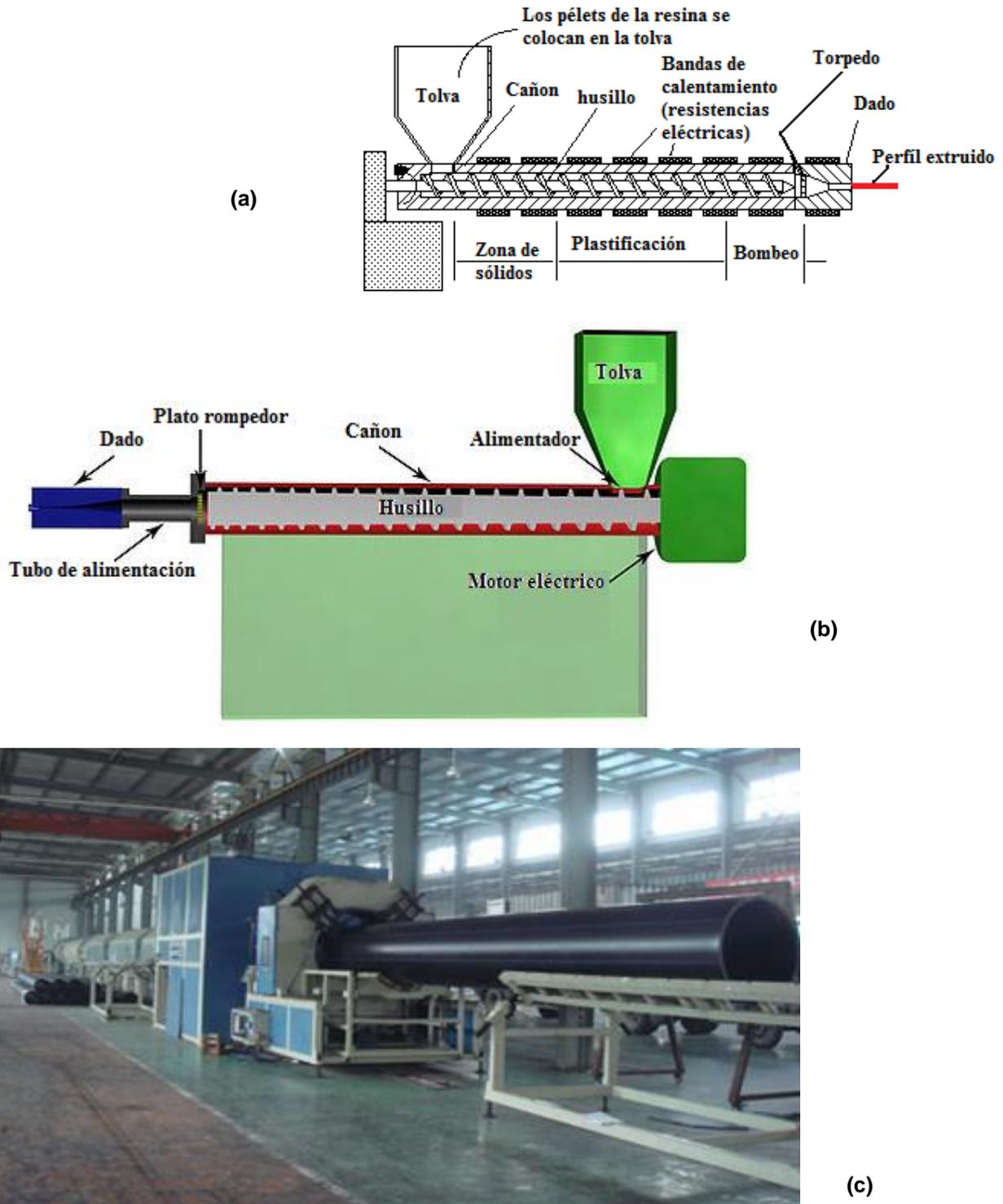


FIGURA 11.14 (a) Se describe esquemáticamente un equipo de extrusión. (b), (c) Se observa una línea para extrusión de tubo (hasta 630 mm de diámetro) de polietileno de alta densidad para agua potable [Yijinhua Plastic Machinery Co Ltd]. Es conveniente mencionar que en la actualidad se puede extruir tubería hasta de 2 m de diámetro

Los equipos de extrusión constan de un depósito para el polímero, generalmente en forma de granulado, que cuenta con un dosificador que se ajusta de acuerdo con la capacidad de plastificación del husillo. El diseño del husillo está en función del plástico a extruir que se coloca dentro de un tubo de acero (barril o cañón) sobre el que se dispone de un banco de resistencias, el cual se puede operar por secciones para garantizar así la adecuada plastificación del material. Durante su giro, el husillo arrastra al material, que al calentarse reduce su viscosidad y se comporta como un fluido viscoelástico [fluido de Maxwell] (véase figura 11.15), cuya ecuación

diferencial en su forma más simple se expresa como $\dot{\varepsilon} = \sigma \left(\frac{1}{G} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{1}{\mu} \right)$, para una sollicitación

constante σ_0 , la deformación $\varepsilon(t)$ está dada por $\varepsilon = \frac{\sigma_0}{G} + \frac{\sigma_0}{\mu} t$, conforme avanza el material se

va reduciendo la sección existente entre husillo y barril lo que produce un incremento de la presión. Al final del husillo es necesario eliminar la inercia del material a seguir con una trayectoria curva por lo que se instala un plato rompedor el cual permite también homogenizar el material para proceder a su extrusión, por último, se tiene el dado de extrusión. Para su perfil, este considera el ensanchamiento (recuperación viscoelástica) que sufre el material al emerger del dado. De acuerdo con el producto, el dado puede ser coaxial al eje del husillo (disposición convencional) o perpendicular a este, esta última solución se emplea en el caso de extruir película (figura 11.16), ya que originalmente se extruye un tubo, al que estando todavía caliente se le aplica una presión en su interior dando como resultado su ensanchamiento y adelgazamiento (por este método se producen las bolsas de plástico), para posteriormente proceder a su enrollado. Es común que, para evitar distorsión del producto a la salida del dado, se tenga una cama o cámara de enfriamiento.



FIGURA 11.15 (a) Analogía del comportamiento de un fluido de Maxwell, el material a la vez de deformarse continuamente por efecto de la sollicitación aplicada almacena energía lo que produce su recuperación al emerger del dado.

Su comportamiento se describe como:
$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{G} + \frac{\sigma_0}{\mu} t$$



FIGURA 11.15 (b) Analogía del comportamiento de un fluido newtoniano (amortiguamiento viscoso), este solo disipa energía sin almacenarla, la relación esfuerzo-rapidez de deformación se expresa como: $\sigma = \mu \dot{\epsilon}$



FIGURA 11.15 (c) Analogía del comportamiento de un sólido elástico, la relación esfuerzo deformación se expresa: $\sigma = G \epsilon$, en este caso el elemento almacena energía: $W = \int \sigma d\epsilon$

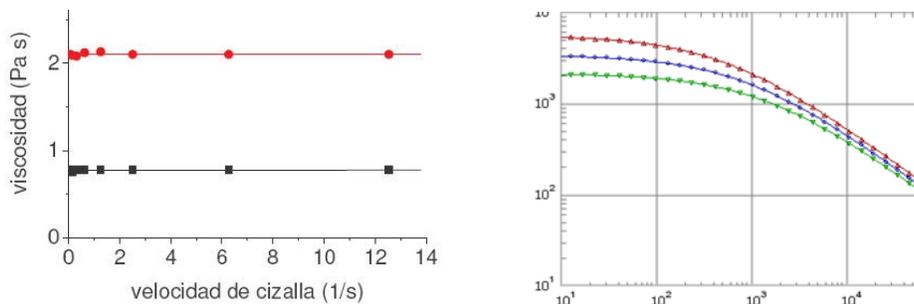


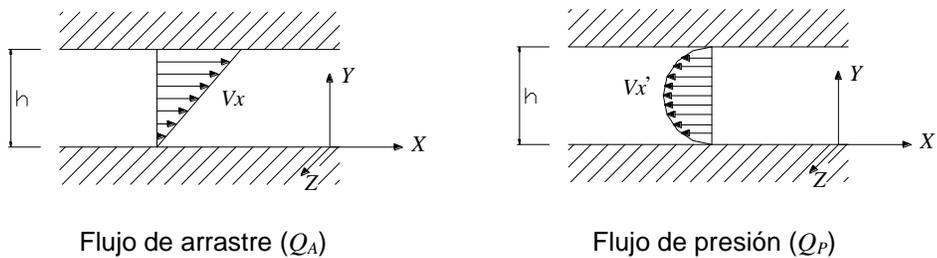
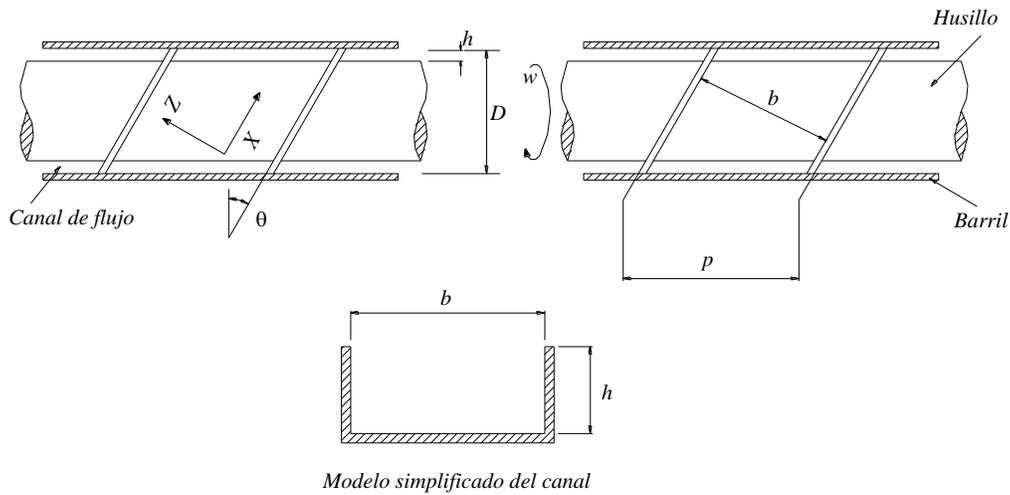
FIGURA 11.15 (d) Izquierda, comportamiento de un fluido newtoniano; derecha, fluido de Maxwell considerando a la resina plastificada como fluido newtoniano (lo cual representa una aproximación)

Se puede demostrar que el gasto volumétrico para un proceso de extrusión de un polímero, el cual se desarrolla mediante un tornillo extrusor, está dado por:

$$\dot{Q} = 0.5 \pi^2 D^2 N h \sin \theta \cos \theta - p \frac{\pi D h^3 \sin^2 \theta}{12 \mu l}$$

Para esto, considere que el fluido se puede modelar como newtoniano y que las condiciones son isotérmicas:

- D = diámetro del cañón o barril
- N = velocidad de rotación del husillo
- h = profundidad del canal del husillo
- θ = ángulo entre la hélice y la dirección perpendicular al husillo
- P = presión de descarga del husillo
- L = longitud del husillo
- μ = viscosidad



Para lo anterior, se define que el gasto volumétrico neto \dot{Q} se puede expresar como la suma de un flujo de arrastre por velocidad \dot{Q}_A (Couette) menos un flujo de presión \dot{Q}_P , este último generado por el incremento de presión que se produce hacia la zona de descarga. El flujo de arrastre se desplaza hacia adelante y ocurre por el movimiento de la superficie del husillo en contacto con el fluido, mientras la otra permanece fija.

- w - velocidad angular del husillo
- p - paso del husillo

Considere que $\dot{Q} = \dot{Q}_A - \dot{Q}_P$

Para facilitar el análisis al calcular el flujo de arrastre, suponga que el barril gira y el husillo permanece inmóvil, además considere que el flujo está dado por $\dot{Q} = vA_c$, donde v es la velocidad promedio y A_c la sección transversal del canal.

De lo antes expuesto, se concluye que la capacidad de un equipo de extrusión es función de las variables del proceso como las características del husillo y barril (D, h, l, θ), así como de la velocidad de giro de este (N), de las propiedades de la resina (μ), como es su viscosidad, entonces, $\dot{Q} = \dot{Q}(\omega, D, h, \theta, l, p)$.

Normalmente, el husillo gira a 120 rpm mientras que el plástico se calienta. La temperatura de extrusión es, de acuerdo al tipo de polímero, de 180 a 250 °C, el calentamiento se produce de manera paulatina por las resistencias eléctricas que rodean al cañón, las cuales (como ya fue mencionado con antelación) se calibran por secciones (precalentamiento, plastificación y extrusión). Se deberá tener cuidado en la relación de las temperaturas, el flujo de calor y el gasto másico, ya que, si el calor es insuficiente, no se plastificará adecuadamente el polímero, lo que se traducirá en bajas propiedades mecánicas del producto extruido y si la temperatura es excesiva se puede degradar el polímero afectando de igual forma las propiedades del producto.

El contacto de la masa plastificada con las paredes del barril y tornillo producen un flujo adicional de calor que deberá ser considerado para evitar inconvenientes por sobrecalentamiento (esto se controla con facilidad a través de la definición de las temperaturas para cada etapa, lo que se traduce en el apagado de los bancos de resistencias al alcanzar condiciones críticas).

En algunos equipos se dispone de ventiladores o chaquetas de enfriamiento por agua, que se activan cuando las temperaturas exceden los valores previamente definidos. El plato rompedor dispuesto entre la punta del tornillo extrusor y el dado de extrusión tiene por fin romper la inercia en el movimiento de la masa plastificada, orientando esta hacia el dado. Previa a la extrusión se alcanzan presiones del orden de 350 bar, las cuales dan lugar al flujo en retroceso. Después de pasar por el plato rompedor, la masa plástica pasa a través del dado, como ya se mencionó, es necesario en el diseño de la geometría del dado considerar que el material extruido tiene un comportamiento viscoelastoplástico. A la salida del dado de extrusión, y dada la baja resistencia del polímero, es necesario enfriar este a la vez de ser estirado, garantizando así que no sufra deformaciones o se generen esfuerzos que afecten su funcionalidad; normalmente, para esto el perfil pasa por una cama de enfriamiento constituido por un baño de agua o mediante aire. En el caso de la producción de películas o bolsas, el material es hecho pasar a través de una serie de rodillos de enfriamiento (figura 11.17).

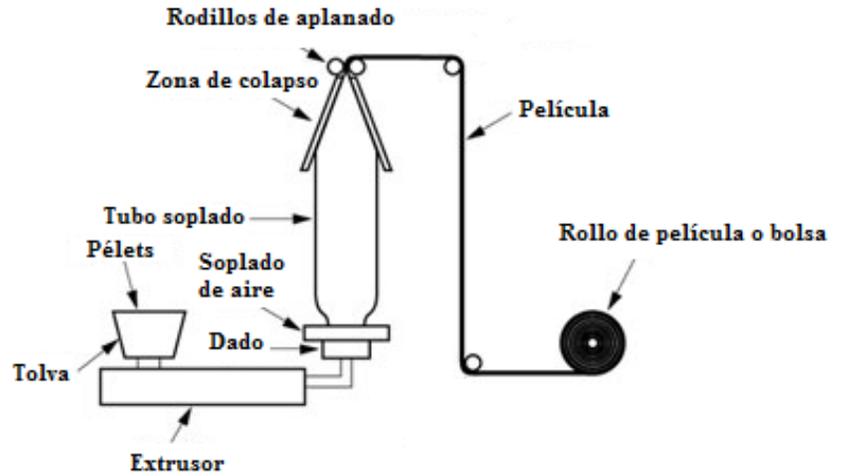


FIGURA 11.16 Extrusión de película. En la figura de la derecha se puede observar la descripción esquemática del proceso.

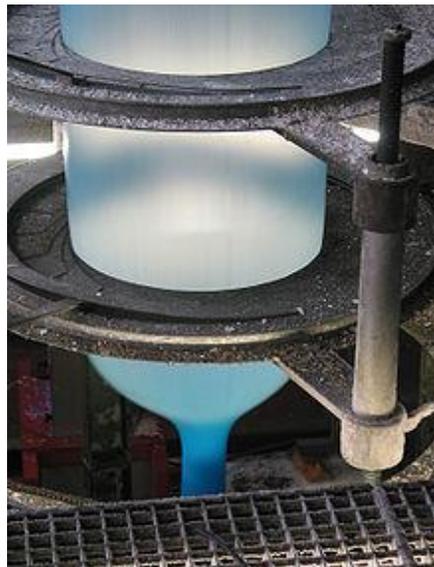


FIGURA 11.17 Extrusión de película. Una vez que un tubo es producido por extrusión e inmediatamente después de salir del dado se inyecta aire a presión el cual deforma plásticamente al tubo dando lugar a una película cuyo espesor depende de la presión y del espesor del material originalmente extruido.

Tornillo extrusor

Un elemento fundamental en el proceso es el tornillo de extrusión, este garantiza la correcta mezcla y plastificación del material (figura 11.18). Su diseño está definido por las características del polímero, por lo que no existe una geometría universal.

En un tornillo de extrusión se observan tres zonas características:

Alimentación. Como su nombre lo indica, en esta zona el material es alimentado y se precalienta. La profundidad del husillo se mantiene constante.

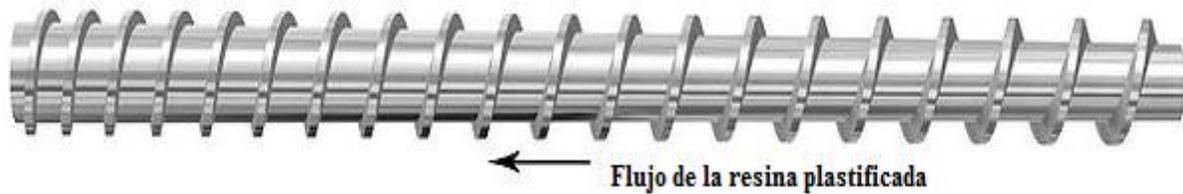
Plastificación. También denominada como zona de fusión o de compresión. En esta la profundidad del canal se va reduciendo paulatinamente.

Transporte o conducción. En esta zona, los últimos vestigios de la resina deben de ser totalmente fundidos. La profundidad del canal usualmente se mantiene. En esta se homogeniza la masa (propiedades y temperatura).

Los tornillos de extrusión se definen en función de su cociente de longitud a diámetro $\frac{l}{d} = \kappa$, este valor κ se ubica entre 24 a 36, dependiendo del polímero.

Técnicas de extrusión

Las características del husillo y del propio proceso dependen del polímero a extruir, en ocasiones dado el gasto volumétrico o el tipo de extrusión puede ser necesario utilizar un equipo con más de un husillo (técnica convencional). En el caso de que se pretenda extruir una resina termofija, el proceso ya no será continuo sino por lote y el extrusor ya no tendrá, necesariamente, un husillo, por lo que existen máquinas sin husillo, las cuales normalmente son accionadas por pistón. Asimismo, existen máquinas con husillos múltiples (de dos a cuatro).

**FIGURA 11.18** Tornillo extrusor típico

Materiales por extruir

Las resinas de extrusión son generalmente termoplásticas y, en algunos casos, termofijas (uretanos espumados). Existe una gran variedad de resinas y copolímeros que pueden ser extruidos, tal como polietileno de alta y baja densidad, PVC flexible y rígido, polimetilmetacrilato, poliamidas, ABS, policarbonatos, polipropileno, acetato-butirato de celulosa, copolímeros de vinil-acetato, nylon, politetrafluoretileno, los cuales representan formulaciones diseñadas para este fin.

11.4 MOLDEO POR COMPRESIÓN

El moldeo por compresión se realiza siempre sobre resinas termofijas, en este caso la resina se deposita en el molde en cantidad suficiente, se aplica presión a la vez de calentar el molde [para lograr la polimerización reticular y por consecuencia el endurecimiento de la resina], hecho esto se mantiene la presión y se procede al enfriamiento, logrando producir piezas de geometría sencilla y limitado control dimensional. El caso de que la reacción de polimerización se debe a la adición de un endurecedor o catalizador se denomina al proceso como Moldeo por Compresión con reacción química.

El proceso de moldeo por compresión se aplica también en los casos de resinas reforzadas con fibra de vidrio.

El moldeo por compresión se caracteriza por la simplicidad de los moldes y su capacidad para formar piezas medianas y grandes de geometría compleja. Por este proceso se trabajan resinas fenólicas, resina poliéster con fibra de vidrio, poliamida, Polifenileno sulfuro, entre otros. Los principales parámetros para considerar en el proceso son:

- Masa requerida para la pieza
- Tiempo de calentamiento y calor requerido para el proceso
- Mecanismo de calentamiento idóneo
- Carga requerida para el formado
- Tiempo y método de enfriamiento

Prensas para moldeo por compresión

El equipo empleado para el moldeo por compresión son prensas verticales (figura 11.19), las cuales cuentan con dos placas en donde se soportan las mitades del molde o matriz, la máquina consta de una placa superior, accionada por un pistón, la cual se desplaza verticalmente generando la presión requerida para el llenado del molde. Estos equipos se encuentran en capacidades que van de las 300 hasta las 4.000 toneladas. El calentamiento y la presión de formado dependen de la resina utilizada; en general, se utilizan temperaturas de 105 a 165 °C, aplicándose una presión de 10 a 60 bar. El tiempo requerido para un ciclo dependerá de la pieza y de la resina, pudiendo variar de uno a cinco minutos.

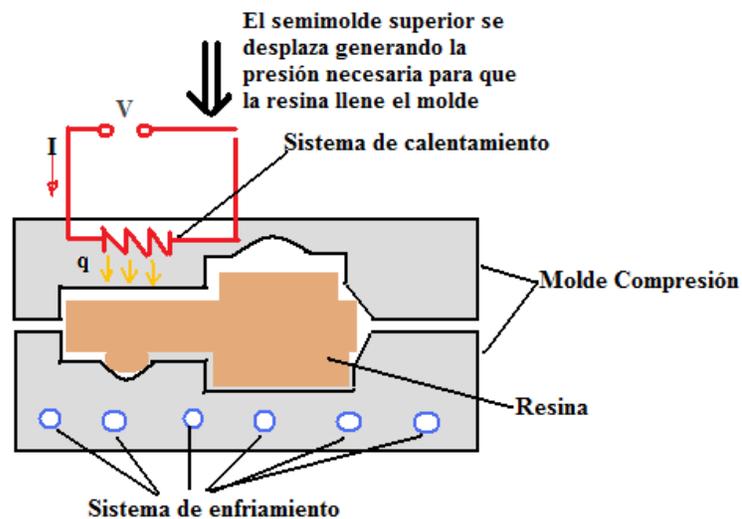


FIGURA 11.19 (a) Descripción esquemática del moldeo por compresión



FIGURA 11.19 (b) Prensa para moldeo por compresión

11.5 MOLDEO POR TRANSFERENCIA

Este proceso de moldeo de resinas es una variación del proceso por compresión, en este caso se cuenta con una cámara adicional en donde se comprime la resina transfiriendo la masa requerida a través de los canales de llenado. En este caso, el material se suministra como preformas para así tener la masa exacta, las cuales se precalientan, con lo que se reduce el tiempo de proceso y el tiempo de precalentamiento en el molde, el que se calienta por resistencia eléctrica o aceite, (figura 11.20). La temperatura a la que se precalienta la resina dependerá de esta (104 a 116 °C para fenólicos, para fenol-melamina de 163 a 182 °C, poliéster de 143 a 171°C) y de la forma en que se presente la resina (preforma o granular). Por su parte, el molde se precalienta también en función de la resina, esto es, para fenólicos de 165 a 182°C, 150 a 177°C para melaminafenólicos, 163°C para poliéster granular, entre otros.

Con este proceso se puede tener una mayor precisión y mejor acabado que en el moldeo por compresión. Los equipos (prensas) son similares, donde la diferencia se presenta en el molde, al requerir este una precámara de compresión. Este tipo de proceso se recomienda cuando se tienen relaciones muy pequeñas del espesor al área, así como también cuando el número de piezas es muy grande o si estas llevan insertos, es por consecuencia el proceso utilizado en el caso de microchips. En cuanto a materiales, sus aplicaciones son similares al moldeo por compresión, esto es, resinas epoxy, baquelitas (fenólicas) y resinas poliéster, entre otras.

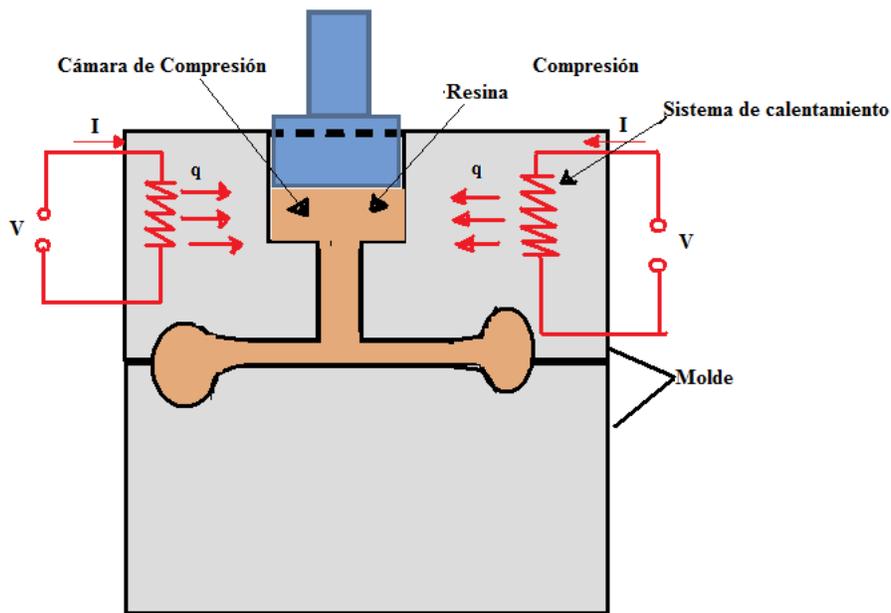


FIGURA 11.20 Descripción esquemática de un matriz para moldeo por transferencia

La presión aplicada es de 5.5 a 6.9 MPa (800 a 1000 psi), el tiempo de transferencia es generalmente menor a 10 s (3 a 8 s), y el tiempo que permanece la resina en el molde dependerá del intervalo requerido para el endurecimiento de la resina, por lo que es función del mayor espesor de la pieza.

Las principales desventajas del proceso radican en la forma de llenado de las cavidades, lo que se traduce, en algunas ocasiones, en distorsión de las piezas, heterogeneidad en la contracción, mayor número de piezas rechazadas, así como mayor demanda de carga de las prensas; esto por la forma de llenado y para evitar la presencia de rebabas.

11.6 EXTRUSIÓN-SOPLADO

En el proceso de moldeo por soplado se trata de producir piezas huecas, en este caso generadas a partir de perfiles extruidos. La primera etapa del proceso consiste en la extrusión de un perfil el cual es cortado y transferido al molde de soplado, en donde, por efecto de la presión toma la forma del molde. Este método se utiliza para el formado de piezas complejas no simétricas, las cuales pueden ser de grandes dimensiones, figura 11.21.

Este proceso data de los años cuarenta, correspondiendo la primicia al poliestireno y al polietileno de baja densidad; su simplicidad y bajo costo han permitido que a la fecha sea uno de los métodos más comunes para el procesamiento de plásticos. Resulta por demás evidente que para el soplado se requiere extruir un perfil de tipo tubular, en general, en estos sistemas se puede modificar el espesor del perfil (aun para intervalos de longitud muy limitados) para garantizar así la producción de piezas sanas con el mínimo espesor de acuerdo con sus aplicaciones. Dado que el material está sometido a las cargas producto de su propio peso, se requiere que la resina plastificada tenga una elevada viscosidad, para evitar así corrimientos del material previo al proceso de soplado, a la vez este debe de soportar las cargas producto de la presión de soplado sin que se produzca falla o fractura. Con el fin de garantizar la adecuada relación de flujo de aire-presión de soplado, el diámetro de la boquilla es función del volumen de la pieza a soplar (1.6 mm de diámetro de la boquilla para un dm^3 , 4 mm hasta 4 dm^3 y 13 para 200 dm^3). Por su parte, si la presión es menor de la requerida la pieza no reproducirá las características de la matriz y si es muy alta pueden presentarse fracturas durante el soplo, por tal motivo, es necesario determinar experimentalmente esta (puede tomar valores mayores a 250 bar).

Por las características del proceso, este puede ser continuo e intermitente, donde este último se utiliza sobre todo para piezas de grandes dimensiones, figura 11.22.

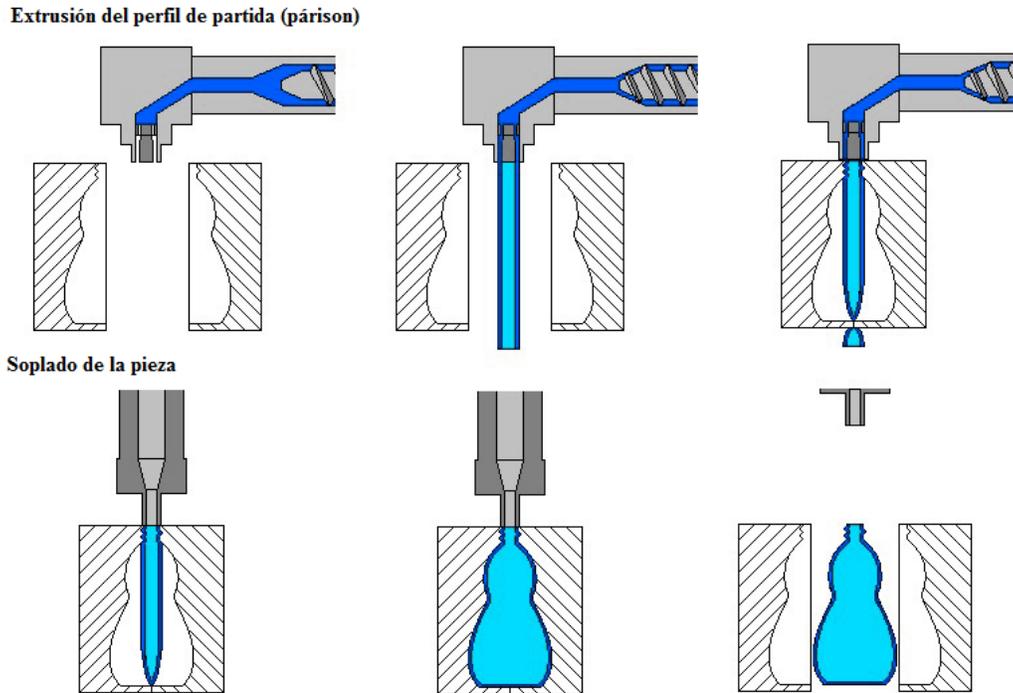
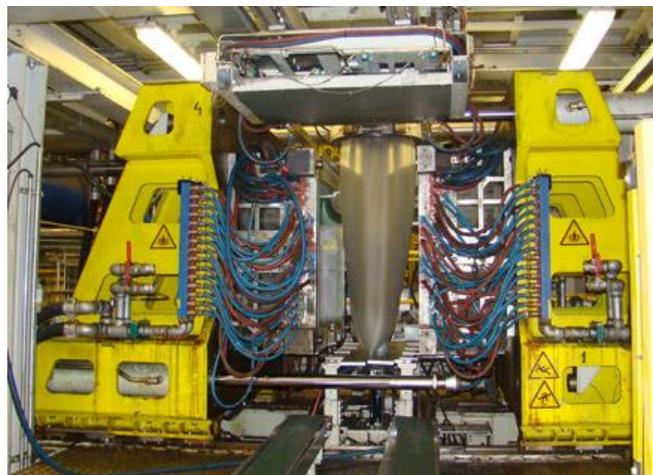


FIGURA 11.21 Descripción esquemática del proceso de extrusión-soplado. En la primera etapa se extruye el perfil, del cual una vez que se tiene la cantidad suficiente se cierra el molde cortando la masa requerida y cerrando uno de los extremos. Acto seguido se procede a colocar el molde con la boquilla de soplado, lo cual permite al polímero deformarse de acuerdo con la matriz (la cual es de aluminio comúnmente)



(a)



(b)

FIGURA 11.22 (a) Ejemplo de piezas producidas por extrusión soplado [Moldes Barcelona S.A. de C.V.]. (b) Máquina de extrusión soplado de gran capacidad, obsérvese el perfil extruido en la parte central del equipo

11.7 INYECCIÓN-SOPLADO

En este caso, la máquina dispone, en una primera etapa, de un molde de inyección con una o varias cavidades etapa (figura 11.23), lo cual permite la formación de las piezas precursoras, hecho esto se procede a colocar los precursores en los moldes de soplado (generalmente, esta es una operación automática), para que se proceda al formado de la pieza. Por lo regular, este método se utiliza para la producción de envases con un eje de simetría axial, como pueden ser las botellas para agua o bebidas carbonatadas (en este caso se emplea PET), los biberones, entre otras muchas aplicaciones. Este proceso es intrínsecamente más preciso y, por consecuencia, produce piezas de mayor calidad que en extrusión-soplado, además de tener una elevada productividad, no existe desperdicio de la resina y puede emplearse para un número más amplio de polímeros que la extrusión-soplado, proceso que se encuentra limitado por la viscosidad de la resina. Sus principales inconvenientes se deben a:

- a. Mayor costo del herramental (se requiere de un molde de inyección además del de soplado).
- b. Mayor costo del equipo (este es mucho más complejo que el de extrusión soplado).
- c. No se pueden producir piezas con asas.
- d. En general, se limita a recipientes (botellas) de volumen mucho menor que las obtenidas por extrusión soplado.

Una variación del proceso consiste en el soplado con estirado [stretch blow molding], este método es utilizado del orden de un 75% de lo que corresponde a la inyección-soplado. Se utiliza para el formado de botellas de PET, donde se pretende que estas sean impermeables al CO₂, condición que es básica para la producción de envases de plástico para refrescos.

En este caso, el precursor se enfría rápidamente con la finalidad de que el polímero no cristalice, para posteriormente ser calentado en el molde de soplado [de 95 a 100 °C para el PET], esto a la vez de aplicar una carga de tracción, que combinada con la presión interior permite formar el envase, con una alta resistencia mecánica e impermeable al bióxido de carbono. Si el material llega a cristalizar el envase se desecha, ya que se presentarán zonas opacas (de cristalización) en la superficie de la botella. Durante el estirado se forman pequeñas láminas que no producen opacidad y que a la vez incrementan la resistencia mecánica de la pieza. La aplicación de este método en botellas para agua ha permitido una sensible reducción en el espesor de estas con el consiguiente ahorro de material y disminución de costo.

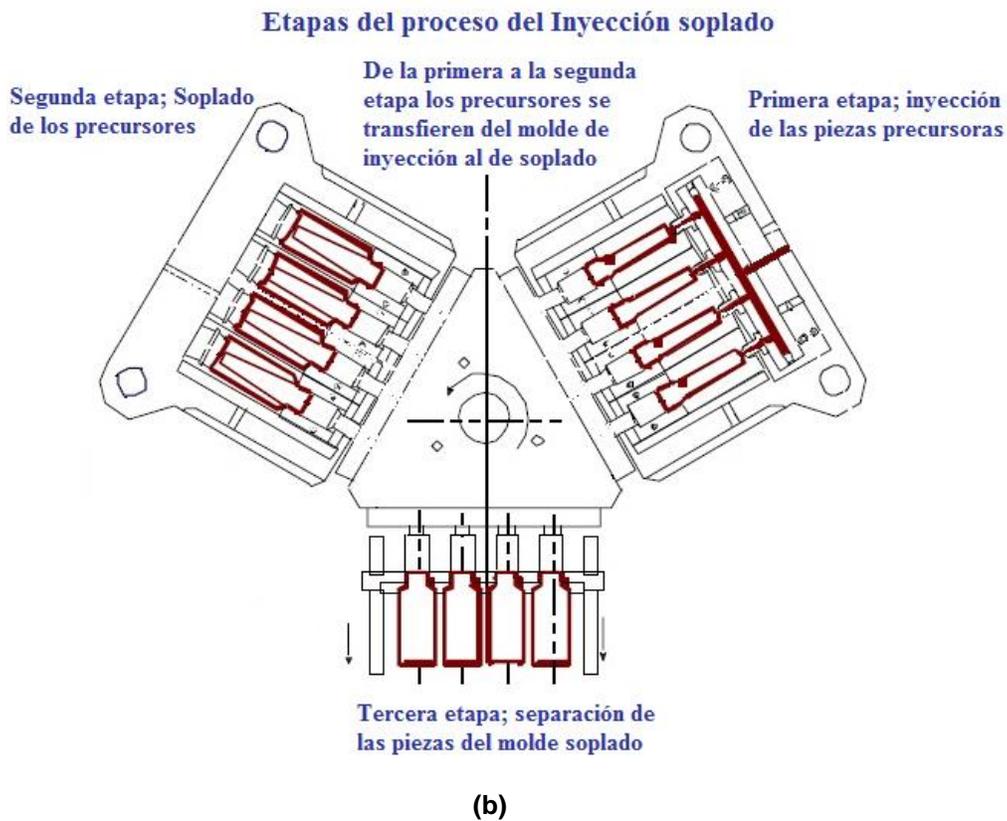
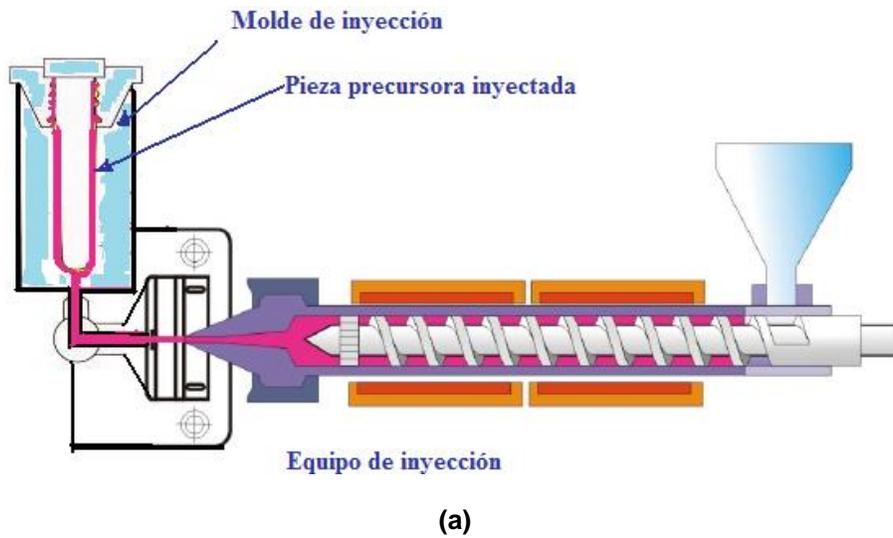


FIGURA 11.23 Descripción esquemática del proceso de inyección soplado. **(a)** Inyección del precursor. **(b)** Secuencia del proceso

En este caso, el proceso debe realizarse en dos etapas, lo cual incrementa la inversión inicial, pero en su defecto permite ahorro en el costo del envase y permite una mayor eficiencia tanto de la inyección de precursores como del soplado de botellas.

11.8 ROTOMOLDEO

Este proceso es equivalente al centrifugado en los metales, ya que se introduce la resina en estado líquido o en polvo al molde para, posteriormente, ponerlo a girar; a su vez el molde se puede calentar con la finalidad de fundir o sinterizar la resina, al enfriarse la pieza, esta se retira del molde. Originalmente, el proceso se utilizó para la producción de piezas pequeñas que requerían ser huecas, como es el caso de cabezas de muñecas y pelotas, figuras 11.24 (a) y (b).



(a)



(b)

FIGURA 11.24 (a) Máquina de rotomoldeado [Caccia Engineering, S de R L]. (b) Máquina de rotomoldeado para laboratorio [Reduction Engineering Scheer Inc.]

En la actualidad, se emplea en la producción de grandes piezas como pueden ser tanques o barriles. Se utiliza para termoplásticos como polietileno de alta y baja densidad (HDPE, LDPE),

policloruro de vinilo (PVC), polipropileno (PP), poliestireno (PS), acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS); en termofijos se emplea en resinas poliéster y epoxi, entre otras.

Dadas sus características, el proceso no se limita a piezas simétricas, sino también se puede emplear para piezas no simétricas (figuras 11.25 (a) y (b)).



(a)



FIGURA 11.25 (a) Lancha producida por rotomoldeo (b) Tanque producido por rotomoldeo [Rotomoldeo Geotec]

11.9 TERMOFORMADO

Se trata de uno de los procesos más sencillos utilizados en la manufactura de láminas u hojas de resina, las cuales después de calentarse (de 120 a 180°C, en función del polímero) son formadas por vacío o por la aplicación de presión mediante un contramolde, figura 11.26. Dada la simplicidad del proceso y la mínima carga requerida, tanto los equipos como los propios moldes representan una mínima inversión. Mediante este proceso, lo mismo se puede formar un mapa en relieve que una caja de poliestireno, el interior de un refrigerador o el empaque para unas galletas, figura 11.27. Son viables de trabajarse por este método el PS, PP, PET, ABS, PVC, PVC espumado, acrílico, poliestireno de alto impacto, SAN, acetobutirato de celulosa, policarbonato; en espesores del orden de 0.1 mm hasta superiores a los 6 mm. Las condiciones de termoformado se presentan en la tabla 11.1.

De acuerdo con las características del herramental, el proceso puede ser: al vacío, por molde macho, por molde coincidente, por molde macho y vacío, a presión con núcleo o macho, por presión, entre los más usuales. Dadas sus posibilidades, el método es utilizado para: la industria del empaque, comida para llevar, empaque de alimentos, para señalización, artículos para el hogar y electrodomésticos, construcción (domos de acrílico), equipaje, entre las principales.



FIGURA 11.26 Piezas producidas por termoformado, bañeras, tinas de hidromasaje, cubiertas de refrigerador, pisos para regadera, cajones (Eletroforming: Termoformados y máquinas para embalajes)

TABLA 11.1 Condiciones de termoformado

Polímero	Temperatura de deformación a 18.6 bar	Temperatura de deformación a 4.6 bar	Temperatura de deformación sin carga	Temperatura de termoformado
Acrílico extruido	94 °C	98°C		135-165°C
Acetobutirato de celulosa	65-75	75-80	120-150°C	140-160
Poliétileno de alta densidad		60-80	100	145-190
Polipropileno	55-65	110-115	140	145-200
Poliestireno	70-95	70-100	100	140-170
Poliestireno alto impacto	85-95	90-95	120	170-180
SAN	100	105		220-230
ABS	75-115	80-120	95	120-180
Policloruro de vinilo	70	75	110	135-175
Polycarbonato	130	140	160	180-230

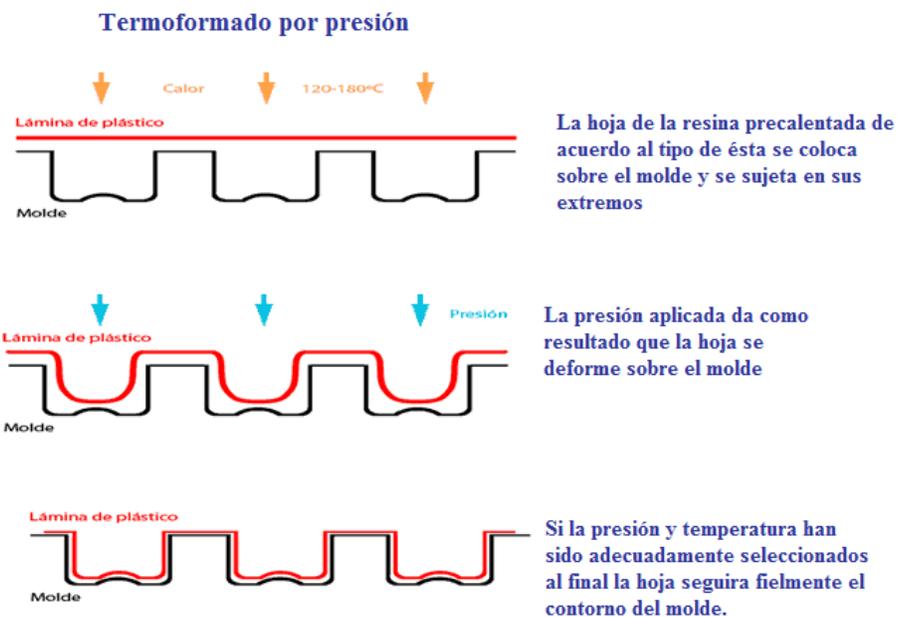


FIGURA 11.27 Descripción esquemática del proceso de termoformado. (a) Por presión

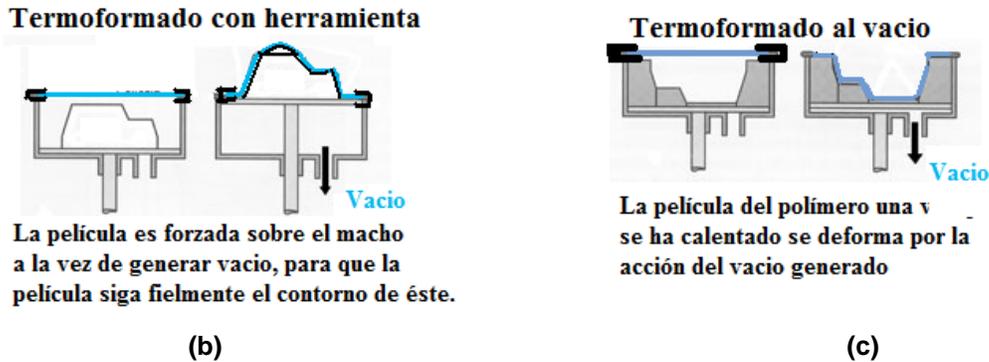


FIGURA 11.27 Descripción esquemática del proceso de termoformado. (b) Con herramienta, (c) Al vacío

11.10 TENDENCIAS EN LA MANUFACTURA DE POLÍMEROS

La estrategia de utilizar materiales que permitan ahorrar peso y energía mantendrá la tendencia de sustituir componentes metálicos por piezas producidas en polímero para lo que se requiere de formulaciones con mayor resistencia y tenacidad, de tal forma que los elementos soporten las cargas sin fallar y sin presentar deformaciones excesivas. Además, es necesario que el reciclado se realice sin mayores inconvenientes. El empleo de materiales compuesto formados por polímeros reforzados, el uso de paneles y de sistemas híbridos metal polímero será cada vez más común, sobre todo en automóviles, lanchas y aviones. Esto se traducirá en el desarrollo de nuevos métodos de procesamiento, en una mayor aplicación de las técnicas de manufactura aditiva y en la mejora de los procesos en uso en la actualidad. Si bien los métodos de simulación han sido ya la constante en la industria desde la última década del siglo XX, cada vez se contará con mejores paqueterías, las cuales dispondrán de amplias bases de datos de propiedades de los polímeros, todo esto a menor costo y sin necesidad de utilizar una estación de trabajo de muy altas prestaciones, permitiendo así que para cualquier producto generado sea simulada su manufactura, previendo inconvenientes y favoreciendo su optimización. Los nuevos polímeros, además de provenir de formulaciones conceptualizadas para mejorar sus propiedades físicas y químicas, y obtener otras que no les son usuales como la conductividad eléctrica, serán micro y nanoestructurados, obteniendo así propiedades que les permitan su aplicación en micro-mecánica, en microóptica o microelectromecánica, en la producción de piel sintética, fabricación de órganos, producción de resinas a base grafeno. Situación, esta última, que permitirá la superación de muchos de los inconvenientes que, en cuanto a propiedades físicas, presentan los polímeros.

CAPÍTULO 12

PROCESAMIENTO DE MATERIALES CERÁMICOS

12.1 CONCEPTOS GENERALES

Un material cerámico es un sólido de origen inorgánico, no metálico, que en su estado crudo (verde) es altamente deformable y que al calentarse se endurece. Por efecto de las altas temperaturas, los componentes del cerámico se sinterizan y se cristalizan total o parcialmente incrementando con esto su resistencia, y obteniendo propiedades que permiten una amplia gama de aplicaciones. Las cerámicas tradicionales se han producido fundamentalmente a partir de arcillas (compuestos silicoaluminosos que son factibles de ser hidratados) $n\text{SiO} \cdot m\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, mismas que al absorber agua y por efecto de la distorsión de la molécula se genera un dipolo permanente y con esto, a nivel macroscópico, una gran fuerza de adherencia que promueve una alta plasticidad del material lo que favorece su moldeo a la forma demandada. Al calentarse se generan transformaciones y se producen puentes que dan como resultado un incremento en la resistencia mecánica.

Durante muchos siglos, los procesos y materias primas no variaron sensiblemente, por lo que los cerámicos se orientaron a cubrir necesidades básicas con la producción de recipientes o vasijas y los elementos decorativos con los mosaicos. En el caso de la fusión de los metales, se fueron seleccionando productos que soportaran las temperaturas características de los metales líquidos desarrollándose las cerámicas refractarias, impulso que tuvo gran énfasis en el siglo XIX sobre todo por la necesidad de materiales que soportaran el calor sin deformarse y pudieran utilizarse como recubrimiento cerámico en los convertidores Bessemer o en los hornos de hogar abierto (Siemens-Martin). La segunda mitad del siglo XX trajo nuevos desafíos, como por ejemplo los materiales que debieran proteger las cápsulas espaciales y transbordadores durante su reingreso a la atmósfera, o materiales con mayor dureza y resistencia al desgaste, como las herramientas de corte para las máquinas de alta producción; esto ha dado como consecuencia un nuevo empuje al desarrollo de los cerámicos, dando lugar a los *cerámicos de ingeniería*.

Los cerámicos son los materiales que primero fueron transformados por el hombre, ya que existen evidencias de la producción de objetos de estos desde hace ya casi 30 000 años; ya que los primeros productos de arcillas cocidas se han fechado con una antigüedad entre 26 000 a 29 000 años, los cuales corresponden a la cultura denominada de Gravettian (Le Gravette, Francia) y que representa una cultura semisedentaria que se desarrolló en la Europa Prehistórica y la que, por sus necesidades, y la disponibilidad de arcillas empezó a producir vasijas, figuras y recipientes mediante el formado de las arcillas crudas y su posterior endurecimiento por cocción. De hecho, los elementos más antiguos corresponden a figuras femeninas muy posiblemente relacionadas con el culto a la fertilidad. Esta primera etapa llevada a efecto en tiempos prehistóricos representa el primer antecedente conocido de la producción de productos cerámicos. Esta tecnología se desarrolló en función de la disponibilidad de arcillas con las características que permitieran la fabricación de recipientes y elementos con mejores propiedades mecánicas y una mayor belleza. Estos productos se obtuvieron gracias al control de las materias primas, los tiempos y temperaturas de cocción y el desarrollo de ingenios como el torno de alfarero, cuyos antecedentes se remontan a 4000 a 6000 a. C. en la antigua Mesopotamia.

La palabra cerámico viene del griego κεραμικος (keramikos), término que se relaciona con la producción de vasijas o recipientes, el término fue empleado por los griegos tanto para definir el material como el proceso o el producto.

Los cerámicos desde el mundo antiguo han tenido varias aplicaciones, las que se han ido ampliando en el tiempo, en la actualidad se tiene:

- Estructural: por ejemplo, tabique rojo o cocido, tubos, losetas para piso y azulejos.
- Materiales refractarios: a base de sílice, alúmina, silicoaluminosos, mullita, carburo de silicio, óxido de magnesio, óxido de zirconio, entre otros. Estos se pueden encontrar en forma de tabique, dovela, crisoles; entre otros.
- Utensilios domésticos y para el hogar: como pueden ser vajillas, ollas, cazuelas, cerámicos para baño, recipientes para microondas, entre otros.
- Cerámicas técnicas o de ingeniería: refractarios, recubrimientos para altas temperaturas, discos de freno, conos para cohetes, recubrimientos para rodamientos, placas de protección balística, implantes, boquillas de combustión, entre otros.



FIGURA 12.1 Descripción esquemática del proceso de producción de componentes cerámicos

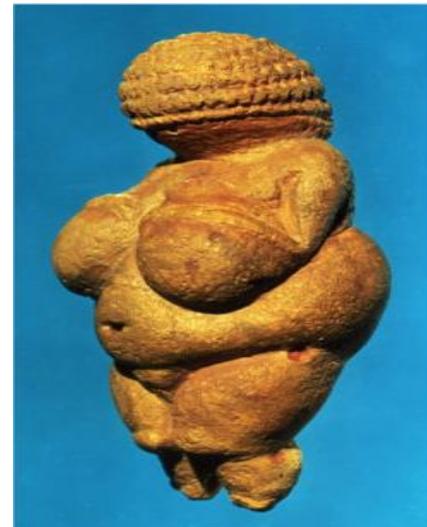


FIGURA 12.2 La cultura de La Gravettian se desarrolló en el Paleolítico Superior, se trata de grupos semisedentarios cuya tecnología corresponde con la edad de piedra, sin embargo, corresponde a estos la primera producción de piezas de cerámica por cocción a bajas temperaturas (500 a 900 °C), en principio orientadas a probables cuestiones mágicas o de culto y, posteriormente, utilizadas para aplicaciones prácticas como vasijas y recipientes



FIGURA 12.3 Los ceramistas chinos utilizaron caolín [$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$] lo que aunado a hornos que alcanzaban mayores temperaturas ($1200\text{ }^\circ\text{C}$) permitió la fabricación de productos de mayor resistencia dando lugar al nacimiento de la porcelana durante la dinastía Tang (siglos VII a X); una vez determinado que la presencia de hierro afectaba el color del producto y controlado este se obtuvieron cerámicas de mayor blancura y calidad, lo que se logró durante la dinastía Ming

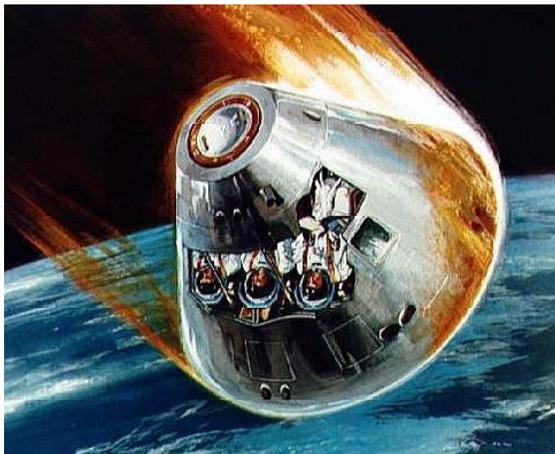


FIGURA 12.4 Durante el reingreso a la tierra parte de la energía cinética de la nave se transforma en calor, por lo que esta debe disponer de escudos cerámicos refractarios con una elevada resistencia a la temperatura y al desgaste



FIGURA 12.5 Disco para frenos de material cerámico

Por ejemplo, los discos para frenos se producen en carburo de silicio reforzado con fibras de carbono, lo cual permite mayor duración, no existen problemas de corrosión; asimismo, este tipo de material presenta mayor coeficiente de fricción el cual no se modifica con las condiciones de operación, lo que garantiza un mejor comportamiento al frenado, ya que absorbe y disipa el calor

más rápido. Todo lo antes expuesto aunado a su menor peso representa grandes ventajas en su empleo, con una única desventaja que es su mayor costo. Por su parte, las pastillas de freno también son productos cerámicos (cerámico reforzado con fibras de cobre).



(a)



(b)



(c)

FIGURA 12.6 (a) Cuchillos de cerámica (óxido de zirconio), (b) Loseta de cerámica, (c) Reloj con carcasa de cerámico (Hublot, modelo Big Bang Bullet Bang)

A inicios del siglo XXI, la aplicación de los cerámicos se ha diversificado, manteniendo muchos de sus ancestrales roles, pero presentándose en sustitución de metales y aleaciones, como por ejemplo en las hojas de cuchillos, discos de freno, alabes de turbinas, esferas de cojinetes antifricción, o siguiendo sus roles tradicionales como en utensilios para la cocina pero resistentes a mayores temperaturas o a las condiciones de rápidos calentamientos característicos de los hornos de microondas. La gran diversidad de geometrías y dimensiones en que se producen las piezas de cerámica ha dado como consecuencia una amplia variedad de métodos de conformado como son el moldeado, extrusión, compactado, inyección, decantado, entre otros.

12.2 MATERIALES CERÁMICOS

Las piezas de materiales cerámicos son producidas en muy diferentes composiciones y estructuras cristalinas, parámetros de los cuales dependen sus propiedades y, por consecuencia, aplicaciones. Como ya se ha mencionado, las cerámicas tradicionales son producidas a partir de arcillas y minerales tales como:

a) Cuarzo o sílice (SiO_2). La sílice presenta polimorfismo y de acuerdo con la estructura dominante será su denominación: tridimita (hexagonal y romboédrico), coesita (monoclínico), cristobalita (tetragonal), cuarzo (trigonal). El cuarzo se caracteriza por presentar propiedades piezoeléctricas, tiene comportamiento resonante, por lo cual se aplica en relojes.

En general, la sílice presenta una gran resistencia al desgaste por lo que se usa como abrasivo. Asimismo, presenta una elevada temperatura de fusión ($1713\text{ }^\circ\text{C}$) por lo que tiene aplicación en la producción de refractarios. Se usa en arenas para fundición y es constituyente primordial en la producción de vidrio.

b) Feldespato, silicatos de aluminio, sodio, calcio y potasio (aluminio-silicatos). De amplia difusión en la corteza terrestre $\text{Me}[\text{Si}, \text{Al}]_4 \text{O}_8$; KAlSi_3O_8 , $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$, pueden presentarse con estructura monoclínica o triclínica. Se emplean en la producción de vidrios (plano y especiales) y cerámicas, como porcelana vítrea y semivítrea, loza para piso, azulejos, loza sanitaria (para baño), porcelanas eléctricas, así como mezclas con otros minerales para obtener colores y propiedades particulares.

c) Caolín. Arcilla blanca de estructura triclínica, que mantiene su color aun ya cocida. También conocida como arcilla china, es producto de la descomposición (erosión) de rocas de feldespato, por acción del agua y del dióxido de carbono, su composición química es



En ocasiones presenta tonalidades naranja producto de la presencia de Fe_2O_3 . Al calentarse sufre diversas transformaciones, a bajas temperaturas (550 a 600 °C) se deshidrata y forma metacaolín anhidro, a 900 °C continúa eliminando iones $(\text{OH})^{-1}$ y forma $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$; $2 \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \rightarrow \text{Si}_3\text{Al}_4\text{O}_{12} + \text{SiO}_2$, esto según $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \rightarrow \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7 + 4\text{H}_2\text{O}$ para los 950 °C las transformaciones continúan $2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7 \rightarrow \text{Si}_3\text{Al}_4\text{O}_{12} + \text{SiO}_2$, al continuar el calentamiento a mayores temperaturas el espinel formado anteriormente se transforma en mullita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) y cristobalita altamente cristalina, $3\text{Si}_3\text{Al}_4\text{O}_{12} \rightarrow 2(3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2) + 5\text{SiO}_2$, lo que se traduce en una elevada resistencia del material resultante, que aunado con su color se ha traducido en uno de los materiales más deseados y utilizados en la producción de cerámicos tradicionales. Por otra parte, si bien la porcelana china ha sido un material emblemático, el caolín (de las raíces chinas kao-alta, ling-colina, que corresponde a la zona en donde se inició la explotación del mineral) se encuentra ampliamente difundido en la corteza terrestre (además de China, existen importantes yacimientos en EUA, Europa, India, Australia y Sudamérica). Este mineral no solo se utiliza en la producción de cerámicas, sino también en medicinas, pinturas, producción de hule, adhesivos y en la agricultura.

d) Óxidos. Este tipo de materiales corresponden ya a las cerámicas de ingeniería, se puede mencionar entre otros:

d.1 Alúmina. Se trata de óxido de aluminio [Al_2O_3], también denominado como corundum, que es su forma cristalina. Dada su elevada temperatura de fusión (2072 °C) y su estabilidad química, una de sus principales aplicaciones es en la producción de refractarios; asimismo, su elevada dureza y resistencia a la abrasión permiten su uso como abrasivo y revestimiento, en la producción de cerámicas eléctricas y en la fabricación de pigmentos.

d.2 Zirconia [ZrO_2]. Este mineral se puede presentar en diversas estructuras cristalinas (monoclínica, tetragonal, cúbica) y también amorfo. Su elevada temperatura de fusión (2715°C) y baja conductividad térmica lo hacen ideal para la producción de refractarios; su elevada dureza permite su aplicación en cuchillos (figura 12.6) y como abrasivo. Su elevada conductividad iónica permite su aplicación como electrocerámica, sus excelentes propiedades ópticas de su fase cristalina ha permitido utilizarlo en la sustitución de diamantes en joyería.

d.3 Óxido de Zirconio [Zr_2O_2]. Por su alta resistencia al desgaste se utiliza en la producción de cojinetes de cerámica. Se aplica también en la producción de refractarios para la producción de aceros en hornos de inducción, esto debido a sus altas temperaturas de servicio, su estabilidad química, su baja conductividad térmica, su estabilidad térmica y capacidad de aislamiento eléctrico; asimismo, soporta bajas temperaturas de servicio, alta presión del rodamiento, resistencia a ácidos fuertes, entre otras características. Puede ir mezclado con carburo de silicio y con zirconia.

e. Compuestos diferentes de los óxidos

e.1 Carburo de silicio. Llamado también carborundum [SiC], se trata de un material polimórfico (existen más de 200 estructuras conocidas), con excepción de algunos cristales formados a partir de meteoritos todo el carburo de silicio que se conoce se ha producido de manera artificial (figura 12.7). Su producción dio inicio a fines del siglo XIX, en principio orientada a la fabricación de abrasivos, su alta temperatura de fusión ($2730\text{ }^{\circ}C$) ha permitido que este material sea ampliamente utilizado en la actualidad también en la fabricación de refractarios; se emplea reforzado con fibras (fibras de carbono), por ejemplo, en discos de freno de alto desempeño (figura 12.5), y en pastas para freno y para embragues, así como para placas de blindaje personal (figura 12.8).

e.2 Boruros. En general, los boruros no presentan enlace iónico sino covalente lo que les da una notable resistencia, dureza y una alta temperatura de fusión. Son compuestos de Boro con algún elemento menos electronegativo, sin embargo, existe el $B_{12}As_2$. Presentan notables propiedades eléctricas y magnéticas, lo que permite su aplicación en dispositivos electrónicos semiconductores y, por consecuencia, en circuitos integrados, por ejemplo, compuertas de CMOS (Complementary metal oxide semiconductors), tal es el caso de TiB_2 , ZrB_2 , $Hf B$.

Por su parte, el SiB_3 , SiB_6 dada su alta temperatura de fusión se utilizan como compuestos refractarios. El diborato de titanio TiB_2 se utiliza como cerámica de alta capacidad para la producción de herramientas de corte, crisoles y placas de protección balística. El diborato de zirconio ZrB_2 combinado con SiC se emplea para herramientas de corte y como recubrimiento para protección contra la corrosión. Su alta capacidad de absorber neutrones permite su uso con este fin en plantas nucleares; su elevada temperatura de fusión y su estabilidad química permiten su aplicación en la producción de crisoles y refractarios, en general para la industria del acero,

sobre todo en casos de excesiva abrasión como boquillas en crisoles o máquinas de colada continua. El diborato de cromo CrB_2 se utiliza como recubrimiento duro y para revestimiento resistente al calor. El hexaborato de lantano LaB_6 se emplea en la producción de cátodos para microscopios electrónicos de barrido y en la modulación de absorción en el rango del infrarrojo. Los boruros de aluminio magnesio como el AlMgB_{14} se caracterizan por ser cerámicos de alta resistencia al desgaste y bajo coeficiente de fricción, su estructura cristalina es ortorrómbica. En general, se emplean como recubrimiento de pistones, sellos, impulsores y herramientas de corte. Ya en la década de los ochenta, Toyota desarrolló un motor de combustión adiabático, en el que las zonas de mayor temperatura se recubrían con este material; sin embargo, el mayor costo, aunado a sus limitadas ventajas, dieron como resultado que tal innovación no se aplicara comercialmente.

e.3 Carbonitruros. Dada su gran resistencia al desgaste se utilizan en la producción de cermets para herramientas de corte $[\text{Ti}(\text{C},\text{N})]$ y particularmente cuando estas se van a utilizar en el maquinado del hierro fundido, cuya cáscara presenta un elevado contenido de Fe_3C , lo que se traduce en una elevada dureza superficial y por consecuencia en un importante desgaste de las herramientas.

e.4 Otros carburos. Compuestos como TaC , NbC se utilizan en herramientas de corte, recubrimientos de alta resistencia al desgaste y en la protección balística. No solo los anteriores son factibles de ser utilizados sino también:



por sus propiedades químicas y físicas, estos se utilizan para la producción de herramientas de corte, elementos que demandan una gran resistencia al desgaste y a la temperatura. Como recubrimiento se pueden aplicar mediante espray térmico. El Cr_3C_2 se utiliza para la producción de placas de protección balística, abrasivos y en la absorción de neutrones.

El carburo de tungsteno es uno de los cerámicos más utilizados debido a sus propiedades, sobre todo en la producción de herramientas de corte y dados de estirado.

e.5 Nitruros. Estos se utilizan en la producción de cermets, rodamientos, relleno para plástico, crisoles para sales, recubrimientos, tanto para herramientas de corte como instrumental médico.



FIGURA 12.7 Cristales de SiC (Imagen tomada de wikipedia, John Faithfull, 2010). Ruedas abrasivas tipo copa de carburo de silicio.



FIGURA 12.8 Placas de blindaje de carburo de silicio o carburo de boro (producidas por ADA Corp.).

De todo lo expuesto con antelación, se concluye que las propiedades de las cerámicas de ingeniería han generado nuevas soluciones al proveer materiales y recubrimientos con elevada dureza, resistencia al desgaste, resistencia a altas temperaturas, estabilidad química, combinaciones de estas propiedades, bajos coeficientes de fricción y propiedades electrónicas y magnéticas particulares, de lo cual se derivan sus aplicaciones. Las más comunes tienen que ver con su empleo como refractarios, herramientas de corte o recubrimientos para estas, rodamientos, recubrimientos o producción de dispositivos para punzones y matrices, placas

antibalísticas para blindaje personal o para vehículos, ruedas para frenos de vehículos de alto desempeño, aislantes eléctricos y elementos para circuitos integrados. Su mayor estabilidad química las vuelve idóneas para emplearse en ambientes húmedos y en general corrosivos. A la fecha, además de cojinetes antifricción, cuchillos y herramientas de corte, se ha experimentado en la producción de partes para turbinas, como por ejemplo álabes, boquillas para cohetes; asimismo, se han desarrollado biocerámicas las cuales se emplean tanto para implantes dentales, que como reemplazo de tejido óseo.

Se ha comprobado que las biocerámicas o el recubrimiento de prótesis metálicas presentan una mayor biocompatibilidad (es usual el empleo de hidroxiapatita) y favorecen la oseointegración; para estas aplicaciones se han desarrollado equipos de manufactura aditiva que permiten la producción de por ejemplo, implantes craneales y para otros huesos capaces de cumplir las funciones estéticas y mecánicas de los componentes óseos originales, también estos implantes pueden emplearse en conjunto con prótesis poliméricas y metálicas con lo que se favorece la osteointegración, lo cual es ventajoso en problemas de pediatría o también en el caso de elementos que deban ser reabsorbidos o de osteobiocerámicas conductoras. El uso de la manufactura 3D permite la producción de geometrías tridimensionales fabricadas a la medida de las necesidades del paciente.

Los mayores inconvenientes de las cerámicas son su limitada tenacidad y su elevado costo. El primer inconveniente se presenta a través de la aplicación de las fibras de refuerzo de numerosos materiales, como pueden ser de carbón; en cuanto al costo, las mayores posibilidades de las cerámicas, con relación a materiales tradicionales, justifican sin duda alguna el sobreprecio que significa su selección y uso.

El procesamiento de los cerámicos depende de sus características por lo que es usual el empleo de extrusores, prensas de inyección, prensas isostáticas para prensado en caliente y de formado; una vez formada la pieza es necesario sinterizar, por lo que los hornos son elementos fundamentales para el proceso, estos pueden ser: con o sin control de atmósfera y al vacío. En general, el rango de calentamiento del horno depende de los cerámicos a procesar. Por sus características, el procesamiento de cerámicos es muy similar, en cuanto a etapas y equipo, a la metalurgia de polvos, razón por la que muchos equipos y procesos son similares.

Para la extrusión, es usual la aplicación de sistemas con dos husillos; sin embargo, en la actualidad existen equipos de alta eficiencia de mezclado y preparación con 12 husillos.

12.3 VIDRIOS

Se trata de un material de origen inorgánico el cual se encuentra en la naturaleza y puede ser generado artificialmente, se caracteriza por su estructura amorfa, ser translucido a la radiación electromagnética en el rango de lo visible y por lo regular son frágiles. Existe una gran diversidad de variedades; sin embargo, los tipos más comerciales se producen a partir de la sílice (SiO_2), carbonato sódico (Na_2CO_3) y carbonato de calcio (CaCO_3).



FIGURA 12.9 Trozo de obsidiana. En las culturas de la edad de piedra y antes de que los metales tuvieran una amplia difusión, la obsidiana se utilizó en lugar de estos. Se trata de rocas de origen ígneo formadas fundamentalmente por SiO_2 y silicoaluminatos $n\text{SiO}_2 \cdot m\text{Al}_2\text{O}_3$ e impurezas Fe, Mg, las cuales determinan su color, como puede ser negro, café, tonos de gris, violeta y aun azul

Como se ya ha mencionado, los vidrios no presentan una estructura tridimensional ordenada de largo alcance, sino que se trata de materiales amorfos, por lo que se refiere a estos como líquidos subenfriados. A diferencia de los sólidos que presentan un comportamiento elástico, y que en caso de fundirse transforman su comportamiento a viscoso, en los vidrios no se puede definir una temperatura de fusión, sino que al calentarse disminuyen su viscosidad, lo cual permite que fluyan tan solo por efecto de su propio peso.

En la naturaleza se presenta la obsidiana, material que tuvo una gran importancia durante la prehistoria y que continuó siendo ampliamente aplicada aun al inicio de la Edad de los Metales, tal como se puede constatar en los pueblos precolombinos e incluso al inicio de la colonización europea en América, esto por efecto de la limitada provisión de hierro.

La obsidiana, conocida también como vidrio volcánico, es un material de origen ígneo, producto de rocas volcánicas (lava) enfriadas rápidamente. Está constituida por sílico-aluminatos $[n\text{SiO}_2 \cdot m\text{Al}_2\text{O}_3](\text{Me}_x^{\text{nt}})$ contaminados por diferentes iones (normalmente metálicos), estos modifican su color, razón por la cual se pueden obtener obsidianas en tonos gris, café, rosa, rojizo y negro, entre otras. La obsidiana fue empleada para la producción de herramientas de corte y armas, pudiéndose aplicar en la producción de espejos rústicos al ser pulidas sus caras, así como en adornos.

En la naturaleza, dada la abundancia de la sílice (se trata del óxido con mayor difusión sobre la corteza terrestre) se pueden encontrar algunos otros ejemplos de vidrios naturales, entre estos se puede mencionar a la sílice vitrificada (fulgurita) la cual se produce por efecto de las descargas eléctricas en suelos ricos en SiO_2 , este tipo de cristal fue empleado desde la antigüedad para la producción de joyas y adornos.

Por su parte, el cristal de roca (cuarzo hialino) no es otra cosa que un sinónimo del cuarzo, en general se presenta en rocas ígneas ácidas. Se trata de un material con una densidad relativa de 2.65 y dureza de 7 en la escala Mohs, por su apariencia se ha utilizado desde tiempos inmemoriales en la producción de elementos decorativos. En la actualidad, y dadas sus propiedades ópticas y su estabilidad durante la oscilación, se utiliza en equipo óptico, electrónico, de telecomunicaciones y en la producción de otros materiales cerámicos.

El origen del vidrio es incierto, si bien existen algunas teorías de cómo se inició su técnica; esto pudo ser a través de la alfarería por una sobrecocción accidental que produjo vitrificación, otra teoría se refiere a que la técnica se derivó del conocimiento y manipulación de las escorias producidas durante la fusión del cobre. Por su parte, Plinio¹ el Viejo narra en su Historia Natural "*Naturalis Historiae*" (que se puede considerar como una enciclopedia de 37 volúmenes, de los cuales los 5 últimos están dedicados a la metales y la mineralogía, la cual fue escrita hacia el año 77 de nuestra era), en esta narra que la producción de vidrio se había iniciado de forma accidental

¹ Gayo Plinio Cecilio Segundo; 23 a 79 d. C., escritor, científico, naturalista y militar romano.

en la región del río Belus, el cual corre por la antigua Fenicia cercano a la actual ciudad de Acre (territorio actual de Israel). Esta zona se caracteriza por sus arenas sílicas de alta calidad, lo cual permitió la producción de vidrio desde tiempos de los fenicios. Plinio el Viejo menciona que unos mercaderes fenicios que transportaban natrón $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (sal mineral constituida fundamentalmente por carbonato de sodio con un alto nivel de hidratación, el nombre del mineral se debe a que este se extraía en la región de Natrun en Egipto), se detuvieron para cenar a orillas del río Belus. Como no había piedras para colocar sus ollas, decidieron utilizar algunos trozos de natrón como soporte de sus utensilios. Calentaron sus alimentos, comieron y se dispusieron a dormir. A la mañana siguiente vieron asombrados que las piedras se habían fundido y habían reaccionado con la arena para producir un material duro y brillante, el vidrio.

En realidad, el hombre aprendió a fabricar el vidrio muchísimo tiempo antes de lo que narra Plinio el Viejo y sobre todo se empleó en la producción de adornos, estos eran productos vitrificados, denominados como *fayenza* en el antiguo Egipto (se supone que fueron artesanos asiáticos los que establecieron la producción de elementos decorativos vitrificados en Egipto), ya que se han encontrado artículos decorativos tales como collares y restos de cerámica elaborados en tumbas del periodo predinástico de Egipto (3500-3200 a. C.).

Estas técnicas florecieron en Egipto y Mesopotamia hasta el 1200 a. C. y, posteriormente, se pierde su conocimiento casi por completo durante varios siglos. En Egipto se produjo un vidrio claro, que contenía sílice pura el cual se coloreaba en azul y verde, teniendo su principal área de producción en Alejandría. Hacia el siglo I de nuestra era, en las costas fenicias se desarrolló de forma importante la producción de vidrio soplado, conocimiento que los romanos extendieron por todo el imperio; es en esta misma época cuando se reconoció que la adición de óxido de manganeso permitía la obtención de un vidrio claro. A la caída del imperio muchas de las técnicas de manufactura del vidrio se perdieron, reduciéndose en mucho su producción.

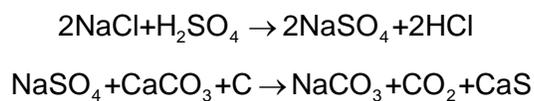
La limitación en el comercio, característico de la Edad Media, impidió que muchos de los artesanos del norte de Europa tuvieran acceso al carbonato de sodio, lo cual produjo que empezaran a experimentar agregando las cenizas del carbón de sus propios hornos como fundente al vidrio que fabricaban, esto con la intención de reducir la viscosidad del material y facilitar su producción. Tal técnica dio lugar al vidrio tipo Waldglas (vidrio del bosque). En general, durante este periodo, la producción de vidrio se orientó a la construcción de mosaicos (vidrieras) de plomo para las iglesias. Si bien ya en documentos del siglo VI se hace referencia a estas obras, los ejemplares más antiguos que existen se remontan al siglo XI.



FIGURA 12.10 (a) Muestras de cristal de sílice vitrificada (fulgurita), (b) Cristal de roca

Hasta nuestros días ha llegado la fama de los cristales de murano o cristales venecianos. Durante la baja Edad Media y el Renacimiento, los venecianos dominaron el mercado europeo hasta el año 1700. Su principal aportación fue la adición de óxido de plomo y la producción de un vidrio sódico duro e incoloro, de gran transparencia, muy semejante al cristal de roca.

Siendo el carbonato de sodio una materia prima fundamental en la producción de vidrio y dada la escasez y costo, a fines del siglo XVIII (1791), el francés Nicolás LeBlanc obtuvo una patente, en la que se producía el carbonato a partir de sal común y ácido sulfúrico



Esto permitió abaratar el costo del vidrio al disponer de carbonato de sodio a bajo costo y calidad uniforme, dicho proceso fue sustituido, posteriormente, por el propuesto por Ernest Solvay².

Hasta nuestros días, la materia prima fundamental para la elaboración del vidrio es la sílice, presente en la arena o en el cuarzo, a la cual se agregan diferentes proporciones de carbonato de sodio y carbonato de calcio.

² Químico belga (1838-1922), en 1861 obtuvo su primera patente para la producción de carbonato de sodio, mejorando el proceso LeBlanc.

La sílice en la naturaleza se encuentra en forma de silicoaluminatos, sin embargo, entre más pura se encuentre la sílice, se tendrá como resultado un vidrio de mayor transparencia y, por consecuencia, al estar combinada la materia prima, el vidrio producido adquiere una apariencia turbia.

Como ya ha sido comentado en párrafos anteriores, la sosa indispensable para la fabricación del vidrio se ha obtenido por diferentes formas y a partir de diferentes materias primas en función de la época y del lugar, por ejemplo, cenizas de las hojas de los árboles, en Egipto se utilizaba la ceniza de la planta conocida como alkali, los españoles la obtenían de la barrilla, los franceses del salicor, y los alemanes de las cenizas del abeto. Los vidrios más primitivos poseían un color verdoso (que se puede considerar como el natural del vidrio, producto de sus impurezas), el cual fue usual hasta que los artesanos aprendieron a depurar el material para obtener un aspecto totalmente traslúcido.

Los óxidos metálicos dan al vidrio diferentes colores; el hierro produce el verde azul o el amarillo, en función del ión presente; el cobre origina al verde azul o rojo; el cobalto al azul; el oro al rojo púrpura; el manganeso al morado o violeta; el azufre y el antimonio al amarillo, y el estaño al blanco opaco.

A final de cuentas, la presencia del carbonato durante la fusión permite reducir notablemente la temperatura de fusión de la sílice, ya que, si esta se encuentra pura, su temperatura de fusión es superior a los 1700 °C; al producto obtenido de la fusión de sílice se le denomina como vidrio de cuarzo.

Las propiedades del vidrio de cuarzo le aportan notables aplicaciones, por ejemplo, se caracteriza por su gran resistencia a los químicos, de tal forma que a temperatura ambiente solo el ácido fluorhídrico lo afecta, mientras que a temperaturas superiores a los 800 °C reacciona en presencia de sales alcalinas o alcalinotérreas. Su bajo coeficiente de dilatación $5.1 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ permite su empleo en equipos científicos, así como en aquellos casos que se requiere variar súbitamente la temperatura sin que se presenten fracturas por el choque térmico.

El índice de refracción del vidrio de cuarzo permite su aplicación en la producción de instrumentos ópticos, presenta una elevada resistividad eléctrica (10^{20} ohm-cm) con todas las implicaciones y posibles aplicaciones que esta propiedad permite.

Sin embargo, la dificultad de su procesamiento (temperatura de fusión y viscosidad) encarece su costo y limitan su aplicación, lo que lo vuelve una variedad de vidrio poco usual.

Al añadir sosa (carbonato de sodio) a la sílice, la temperatura de procesamiento de la mezcla disminuye en forma apreciable (de 2000 °C del vidrio de cuarzo a unos 1200 °C), este vidrio de silicato sódico se caracteriza por ser muy quebradizo y, generalmente, se presenta en solución acuosa siendo utilizado como pegamento cerámico y en la producción por hidrólisis de gel de sílice. Para producir un vidrio común, se utiliza el silicato de sodio el cual se mezcla con diversos productos que mejoran sus propiedades mecánicas y químicas, en la tabla 12.1 se presentan las composiciones típicas del vidrio común.

TABLA 12.1 Intervalos de composición de los vidrios comunes

Componente	Desde %	hasta %
SiO₂	68,0	74,5
Al₂O₃	0,0	4,0
Fe₂O₃	0,0	0,45
CaO	9,0	14,0
MgO	0,0	4,0
Na₂O	10,0	16,0
K₂O	0,0	4,0
SO₃	0,0	0,3

Este tipo de vidrios se procesan a temperaturas entre 1450 °C y 1600 °C, los cuales son calentados mediante combustible líquido o gas y, en algunas ocasiones, mediante energía eléctrica. En el horno es el lugar donde se lleva a cabo la fusión de las materias primas, (figura 12.11). Normalmente consiste en un recipiente rectangular construido con materiales refractarios resistentes al desgaste producido por el vidrio líquido y la flama de los quemadores. Se emplean combustibles líquidos o gaseosos dependiendo de su disponibilidad y su costo. Para alcanzar las temperaturas que se requieren en el horno, es necesario que este cuente con estufas de precalentamiento (figura 12.12), con lo que la temperatura de flama y, por consecuencia, la temperatura en la cámara de fusión se incrementan, una vez que los gases pasan en contacto íntimo con el vidrio a fundir, estos salen a través de las estufas que se encuentran en etapa de precalentamiento, de las estufas deben de salir a unos 450 °C. Dado que no se trata de un metal, es necesario considerar que al incrementarse la temperatura y adicionarse las diferentes materias primas, estas reaccionan reduciendo sensiblemente su viscosidad, por lo que esto se interpreta

como la fusión del material. Una vez que la masa alcanza condiciones equivalentes a un líquido se procede a refinar el material, esto es eliminar las burbujas que se forman durante la reacción de las materias primas, posteriormente, el vidrio líquido pasa a la cámara de refinación o acondicionamiento, en la que se busca homogeneizar la temperatura de la mezcla, para que ya después emerja fuera del horno a través de los canales de reparto y pase a las máquinas de formado.

Las propiedades del vidrio común son función tanto de la naturaleza, de las materias primas y de la composición química del producto obtenido.

TABLA 12.2 Vidrio de silicato sódico

Composición "tipo" de vidrio de SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
73,20	1,51	0,10	10,62	0,03	13,22	1,12	0,20

TABLA 12.3 Propiedades del vidrio

Propiedad	Valor	Unidades	Fuente
Densidad a 25 °C	2,49	g/cm ³	Gilard & Dubrul
Coefficiente de dilatación lineal a 25 °C	8,72·10 ⁻⁶	°C ⁻¹	Wilkelman & Schott
Conductividad térmica a 25 °C	0,002	cal/cm·s °C	Russ
Tensión superficial a 1200 °C	319	dinas/cm	Rubenstein
Índice de refracción (a 589,3 nm)	1,52	-	Gilard & Dubrul
Módulo de elasticidad a 25 °C	719	kbar	Appen
Módulo de Poisson a 25 °C	0,22	-	Wilkelman & Schott
Resistencia a la tracción a 25 °C	~(900)	bar	Wilkelman & Schott
Constante dieléctrica (4.5.18 ⁸ Hz)	7,3	-	Appen & Bresker
Resistencia eléctrica a 1100 °C	1,06	Ω·cm	
Resistencia eléctrica a 1500 °C	0,51	Ω·cm	
Calor específico a 25 °C	0,20	cal/g/°C	Sharp & Ginter
Atacabilidad química DIN 12111	13,52	ml de HCl 0,01N	R. Cuartas

De todo lo que se ha mencionado en párrafos anteriores, se puede concluir que para un vidrio común sus materias primas son:

Arena sílica: principal componente.

Carbonato o sulfato de sodio: favorecen la fundición de la arena sílica al reducir su temperatura de fusión.

Piedra caliza: evita la posibilidad de que el vidrio sea inestable frente al agua.

Vidrio de reúso: su aplicación reduce el consumo de materias primas.

Por otra parte, en esta época y en los años venideros las políticas de reduce, reusa, recicla, hacen del vidrio un material ideal, ya que no tiene límites en su capacidad de reciclado y por su estabilidad química; al reciclarlo no se pierden propiedades y se ahorra el 30% que si se produjera vidrio nuevo. En ocasiones, como es el caso de los envases de bebidas carbonatadas, no es necesario volver a fundir la botella sino solamente se requiere de su lavado para poder usarlas de nueva cuenta.



FIGURA 12.11 Horno para vidrio con recuperadores TECO (Toledo Engineering)

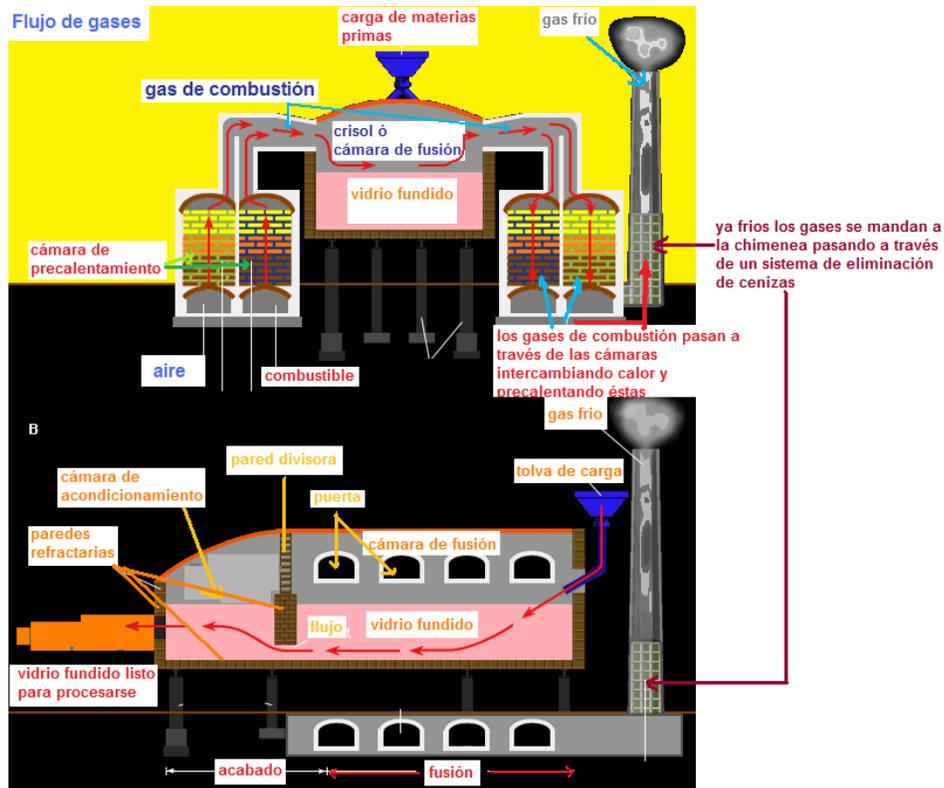


FIGURA 12.12 Descripción esquemática de un horno para fusión de vidrio (Enciclopedia Británica, 1997)



FIGURA 12.13 Formado de botellas de vidrio

En resumen, se tiene que el vidrio se puede procesar por colada, soplado, estirado, flotado y laminado, dependiendo de la pieza a producir y del tipo de vidrio que se requiera procesar.

12.4 TENDENCIAS A FUTURO

Adicional a la producción de biocerámicos se tiene el desarrollo de sistemas aglomerantes y de soluciones producidas mediante vaciado basadas en corundum ($\text{Al}_2\text{O}_3 > 95\%$), así como en espinela -aluminomagnesia- (MgAl_2O_4). Se desarrollarán nuevos métodos de moldeado centrífugo con espesores $h \leq 5\text{mm}$ con porosidad del orden del 14%. Los métodos de vibrocompactado con contenido de humedad de 3.4 a 4% permiten generar productos de gran resistencia y elevada densidad. En general, se desarrollará un mayor número de cerámicos para ingeniería con mayor resistencia mecánica, al desgaste, poder refractario, así como menores consumos de energía durante su procesamiento. Las cerámicas avanzadas se caracterizan por su elevada resistencia mecánica y al medio ambiente, así como por su baja densidad, otra de sus características peculiares es, en algunos casos, comportamiento ferroeléctrico, capacidad semiconductor, resistividad no lineal y gran tenacidad; con lo que este tipo de materiales tendrán cada vez mayor aplicación en la industria, ya sea como elementos enterizos o como recubrimientos.

BIBLIOGRAFÍA

ALTAN, Taylan, NGAILE, Gracious, SHEN, Gangshu. *Cold and Hot Forging, Fundamentals and Applications*, ASM, The Materials Information Society, 2007.

ALTAN, T., TEKKAYA, E. *Sheet Metal Forming*, ASM International, 2012.

ALTING, Leo. *Manufacturing Engineering Processes*, CRC Press, 1993.

AMMEN, C. *Metalcasting*, McGraw Hill, 2000.

AVITZUR, Betzalel. *Metalfforming. The Application of Limit Analysis*, Marcel Dekker Inc, 1980.

BAIRD, D. G., COLLIAS, I. D. *Polymer Processing, Principles and Design*, John Wiley and Sons, 1998.

BEELEY, P. *Foundry Technology*, Buttherworth-Heinemann, 2001.

BICKFORD, J. *An Introduction to the Design and Behavior of Bolted Joints*, 3rd. edition, Marcel Dekker, 1995.

BOLJANOVIC, V., PAQUIN, J. R. *Die Design Fundamentals*, Industrial Press, 2006.

BRALLA, James G. *Handbook of manufacturing Processes: How materials, products and components are made*, Ed. Industrial Press Inc., 2007.

BROWN, J. R. *No Ferrous Foundrymens Handbook*, Buttherworth-Heinemann, 1999.

BRYCE, D.M. *Plastic Injection Molding, Manufacturing Process Fundamentals*, Society of Manufacturing Engineers, 1996.

CAMPBELL, J. *Castings*, Buttherworth-Heinemann, 1995.

CARTER, C. B., NORTON, M. G. *Ceramic Materials: Science and Engineering*. Springer Science+Bussiness Media New York, 2007.

CHAKRABARTY, J. *Applied Plasticity*, Springer, 2010.

- CHUNG, Chan I. *Extrusion of Polymers, Theory and Practice*, Carl Hanser Verlag, 2000.
- DEL RIO, Jesús. *Deformación plástica de los materiales. La forja y la laminación en caliente*, Gustavo Gili, 1980.
- DEWULF, J., VAN LANGENHOVE, H. *Integrating Industrial Ecology Principles into a Set of Environmental Sustainability Indicators for Technology Assessment*, Resources, Conservation and Recycling 43, Elsevier, 2005.
- EASTERLING, K. *Introduction of the Physical Metallurgy of Welding*, Butterworth Heinemann, 1993.
- FINCH, R. *Welder's Handbook, A Complete Guide to MIG, TIG, Arc, & Oxyacetylene Welding*, H. P. Books, Berkley Publishing Group, 1997.
- _____, *Welder's Handbook, A Guide to Plasma Cutting, Oxyacetylene, Arc, MIG and TIG, Welding*, AWS Books, HP Books Penguin, 2007.
- FRUEHAN, R. J. *The Making, Shaping and Treating of Steel (Steel Making and Refining)*, USS Coop, American Society for Metals, 1998.
- GRISKEY, R. G. *Polymer Process Engineering*, Chapman & Hall, Nueva York, 1995.
- GROOVER, Mikell P. *Fundamentals of Modern Manufacturing*, Wiley & Sons, 2010.
- HOSFORD, William F., CADDELL, Robert M. *Metal Forming, Mechanics and Metallurgy*, Cambridge University Press, New York, 2011.
- HUMPSTON, G., JACOBSON, D. M. *Principles of soldering and Brazing*, ASM International, 1994.
- IRON AGE*. Wikipedia, The free encyclopedia.
- JENNEY, C.L., O'BRIEN, A. *Welding Handbook, Vol.1 Science and Technology*; R.L. O'Brien, Vol.2 *Welding Processes*; W.R. Oates, Vol. 3, *Materials and Applications*, AWS [American Welding Society], 2001.
- KALPAKJIAN, Serope, SCHMID, Steven. *Manufacturing Engineering and Technology*, Prentice Hall, 2009.
- KHAN AKHTAR, S. *Continuum Theory of Plasticity*, John Wiley and Sons, 1995.
- KOBAYASHI, Shiro, SOO IK OH, ALTAN, Taylan. *Metal Forming and the Finite Element Method*, Oxford University Press, 1989.

- LANCASTER, J. F. *Metallurgy of Welding*, Chapman & Hall, 1994.
- LANGE, Kurt. *Handbook of Metal Forming*, McGraw-Hill Book Company, 1985.
- LENARD, J.G., PIETRZYK, M., Cser, L. *Mathematical and Physical Simulation of the Properties of Hot Rolled Products*, Elsevier, Amsterdam, 1999.
- LJUNGBERG, Lennart Y. *Materials Selection and Design for Development of Sustainable Products*, Materials and Design 28, Elsevier, Amsterdam, 2007.
- LUBLINER, Jacob. *Plasticity Theory*, MacMillan Publishing Company, 1990.
- MENGISTU, Solomon. *Manufacturing Processes*, LAP Lambert Academic Publishing, 2010.
- MINNICK, W.H. *Gas Tungsten Arc Welding Handbook*, The Goodheart-Willcox Company, Inc, Publishers, 1992.
- MORTON-JONES, D.H. *Polymer Processing*, Chapman and Hall, 1989.
- ROSEN, S. R. *Thermoforming: Improving Processes Performance*, Society of Manufacturing Engineers, 2002.
- ROWE, Geoffrey W. *Elements of Metal Working Theory*, Edward Arnold, London, 1984.
- _____, *Conformado de los metales*, Urmo, 1972.
- _____, *Finite-Element Plasticity and Metalforming Analysis*, Cambridge University Press, 1991.
- ROWE, G. W., STURGESS, C. E. N., HARTLEY, P. I. *Finite Element Plasticity and Metalforming Analysis*, Cambridge University Press, 1991.
- SCHULER, GmbH. *Metal Forming Handbook*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1998.
- SINGH, D. K. *Fundamentals of Manufacturing Engineering*, CRC Press, 2007.
- SIRO, Kobayashi. *Metal Forming and The Finite-Element Method*, Oxford University Press, Inc., 1989.
- STUZALEC, A. *Theory of Metal Forming Plasticity*, Springer-Verlag, Berlin, 2004.
- SUCHY, I. *Handbook of Die Design*, McGrawHill, 2006.

TADMOR, Z., GOGOS, C. G. *Principles of Polymer Processing*, John Wiley and Sons, 2006.

TERPSTRA, R. A., DE VRIES, P. Pex. *A Ceramic Processing*, Chapman-Hall, 1995.

TRIPATHI, Vibha. *History of Iron Technology in India*, Infinity Foundation Series, 2008.

WAGONER, Robert H., CHENOT, Jean Loup. *Fundamentals of Metalforming*, John Wiley and Sons, 1997.

WALDBAUM, J. C. *From Bronze to Iron: The Transition from the Bronze Age to the Iron Age in Eastern Mediterranean*, Coronet Books Inc., 1978.

YUASTEPANOV, N. *Tecnología del proceso de fundición*, Mir, Moscú, 1981.