



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Optimización del tratamiento
térmico aplicado a la aleación
SAE-788**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO**

P R E S E N T A:

CARLOS GABRIEL FIGUEROA ALCÁNTARA

**DIRECTOR DE TESIS
DR. RAFAEL SCHOUWENAARS FRANSSSENS**



CD. UNIVERSITARIA

2009

Agradecimientos:

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por haberme proporcionado la educación para crecer.

Al personal que conforma la Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales, en especial al Dr. Armando Ortiz Prado, por permitirme formar parte de este gran grupo de trabajo.

A los ingenieros: David Hernández, Roberto Andresen, Hugo Durán, Andrés Suárez y al M.C. Agustín Bravo por su amistad y conocimientos aportados.

A Eduardo, Ramón, David, Rey y Omar, por hacer más agradable mi vida en la Facultad.

A mi familia: mi papá Cutberto, Elena, Ana Laura, Rosalinda. Especialmente a mi madre María Alcántara† que siempre me motivó a seguir adelante. A Héctor por su apoyo incondicional y a Hugo por su constante interés.

A Samantha por darle magia a mi vida.

Agradezco profundamente los valiosos comentarios y observaciones de mis sinodales: Dr. Armando Ortiz Prado, Dr. Víctor Hugo Jacobo Armendáriz, M.C. Édgar Isaac Ramírez Díaz y M.I. Ubaldo Eduardo Márquez Amador.

Un agradecimiento muy especial al Dr. Rafael Schouwenaars Franssens por su paciencia y enseñanzas.

Dedicatorias:

A la memoria de mi madre María Alcántara Rodríguez. No hay día en el que me sienta solo gracias a ti mamá.

A mi familia por todo el apoyo que siempre me ha brindado.

A Samantha, sin ti nada hubiera sido igual.

Índice

Prólogo	7
Objetivo	8
Capítulo 1. Introducción	9
1.1. Tribología	9
1.2. Cojinetes de deslizamiento	10
1.2.1. Propiedades de cojinetes de deslizamiento	11
1.2.2. Materiales para cojinetes de deslizamiento	12
1.2.3. Aleaciones base aluminio para cojinetes de deslizamiento	13
1.2.4. Aleación SAE 788	16
Capítulo 2. Antecedentes	17
2.1. Fundición	17
2.1.1. Fundición de las aleaciones de aluminio	17
2.2. Solidificación	18
2.2.1. Óxidos	19
2.3. Estructura de las fundiciones de aluminio	20
2.3.1. Estructura del grano	20
2.4. Endurecimiento por deformación	22
2.5. Laminación	24
2.6. Ensayo de tracción	25
2.7. Curva ingenieril esfuerzo–deformación	26
2.8. Curva real esfuerzo–deformación	27
2.9. Tratamiento térmico	28
2.10. Recocido	29
2.10.1. Recuperación	29
2.10.2. Recristalización	30
2.10.3. Crecimiento de grano	32
2.11. Metodología de superficie de respuesta	33
Capítulo 3. Desarrollo experimental	35
3.1. Laminación de la aleación SAE-788	36
3.2. Maquinado de probetas de tracción	37
3.3. Tratamiento térmico	38
3.4. Ensayos de tracción	39
3.5. Metalografía	39
Capítulo 4. Resultados	40

4.1. Propiedades mecánicas, Microestructuras y Curvas esfuerzo–deformación	40
4.1.1. Deformación 3 ($\epsilon=3$) Sin tratamiento térmico	41
4.1.2. Deformación 3 ($\epsilon=3$) Recocido a 200°C	42
4.1.3. Deformación 3 ($\epsilon=3$) Recocido a 300°C	44
4.1.4. Deformación 3 ($\epsilon=3$) Recocido a 400°C	45
4.1.5. Deformación 3.5 ($\epsilon=3.5$) Sin tratamiento térmico	47
4.1.6. Deformación 3.5 ($\epsilon=3.5$) Recocido a 200°C	48
4.1.7. Deformación 3.5 ($\epsilon=3.5$) Recocido a 300°C	50
4.1.8. Deformación 3.5 ($\epsilon=3.5$) Recocido a 400°C	51
4.1.9. Deformación 4 ($\epsilon=4$) sin tratamiento térmico	53
4.1.10. Deformación 4 ($\epsilon=4$) Recocido a 200°C	54
4.1.11. Deformación 4 ($\epsilon=4$) Recocido a 300°C	56
4.1.12. Deformación 4 ($\epsilon=4$) Recocido a 400°C	58
4.2. Superficie de respuesta para las propiedades mecánicas de la aleación SAE – 788	59
4.2.1. Deformación homogénea	60
4.2.2. Deformación máxima	61
4.2.3. Esfuerzo máximo	62
4.2.4. Tenacidad	62
4.2.5. Esfuerzo de cedencia	63
4.3. Propiedades mecánicas maximizadas	64
4.3.1. Tenacidad limitada por el esfuerzo de cedencia	64
4.3.2. Tenacidad limitada por la deformación máxima	64
4.3.3. Esfuerzo de cedencia limitado por la deformación máxima	65
4.3.4. Deformación máxima limitada por el esfuerzo de cedencia	65
Capítulo 5. Discusión	66
Conclusiones	69
Bibliografía	70

Prólogo

La presente tesis forma parte de una extensa serie de trabajos donde se ha estudiado de manera exhaustiva la utilización de aleaciones aluminio–estaño y aluminio–estaño–silicio para la obtención de materiales tribológicos utilizados en cojinetes de deslizamiento de uso automotriz.

La realización de la fase experimental consistió en la caracterización mecánica y metalográfica del material con y sin tratamiento térmicos; se llevó a cabo en las instalaciones de los laboratorios de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, dentro de la Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales (UDIATEM), bajo la guía y dirección del Doctor Rafael Schouwenaars Franssens.

El trabajo se divide en cinco capítulos. En el primero se explican brevemente y a manera de introducción algunos conceptos relacionados con el uso y estudio del material trabajado.

En el capítulo dos se analizan algunos antecedentes teóricos relacionados con la metalurgia física, metalurgia mecánica y metodología de superficies de respuesta, cuya aplicación es fundamental para el análisis de los resultados que se obtendrán a partir del proceso experimental que se explica a detalle en el capítulo tres.

Los resultados obtenidos a partir de la experimentación se muestran en el cuarto capítulo, haciendo énfasis en las propiedades mecánicas que se consideran más importantes en un material tribológico con aplicación específica en cojinetes de deslizamiento. En este capítulo también se muestran los resultados obtenidos al aplicar la metodología de superficie de respuesta, así como la maximización de la función obtenida, lo cual es una herramienta importante en el planteamiento del tratamiento termomecánico de la aleación SAE–788 ya que previamente no se había aplicado. Finalmente en el capítulo cinco se realiza el análisis e interpretación de los resultados.

Por último se presentan las conclusiones generales de la tesis

Objetivo

El objetivo de la presente tesis es proponer un proceso termomecánico más eficiente al utilizado actualmente en la obtención de material tribológico para utilización en cojinetes de deslizamiento y de esta manera dotar a la industria automotriz de una guía que le permita optimizar sus procesos de producción, con la finalidad de lograr una reducción en costos y principalmente obtener una mejora de calidad.

Capítulo 1. Introducción

1.1 Tribología

Tribología es el estudio de superficies en contacto y es de extrema importancia en el ámbito tecnológico, abarca bastantes disciplinas; desde la física y la química, hasta la ingeniería mecánica y la ciencia de materiales.

La tribología nació formalmente como ciencia en marzo de 1966, en la Gran Bretaña. Etimológicamente proviene de las raíces griegas *tribos* (frotamiento) y *logos* (estudio), es decir, el estudio del frotamiento. Se puede definir como el estudio de la ciencia y tecnología de la interacción de superficies en movimiento relativo y tópicos relacionados [1].

La tribología se fundamenta en el estudio de tres fenómenos: la fricción, el desgaste y la lubricación.

- Fricción es la resistencia al deslizamiento entre dos cuerpos rígidos, al hacer referencia a un cuerpo rígido se entiende que su estudio es a nivel macroscópico. En algunos casos es deseable tener coeficientes de fricción elevados (superiores a 0.5); como ejemplo se puede mencionar el caso de un neumático sobre el pavimento. También se presentan casos donde lo ideal es tener coeficientes de fricción con valores bajos como en el caso de los cojinetes con los ejes.
- El desgaste es consecuencia de la fricción, en él se remueve material de una o ambas superficies debido al movimiento que existe entre ellas.
- La lubricación, en su sentido general, es la aplicación de un medio (gas, líquido o sólido) en alguna zona donde se espera fricción y desgaste. El lubricante tiene el objetivo de disminuir la severidad de estos fenómenos a través de la separación de las superficies en movimiento para evitar el contacto y disminuir el esfuerzo cortante entre los dos. Desde el punto de vista tecnológico, la lubricación no sólo involucra los fenómenos que ocurren dentro de esta zona limitada de contacto; sino todo el sistema de alimentación, recirculación y presurización de los lubricantes, así como las características químicas, mecánicas y térmicas de los lubricantes [1].

La tribología y los avances tecnológicos que de ella emanan son de gran utilidad en la industria, ya que la implementación de maquinaria moderna implica el uso de superficies rodantes y/o deslizantes [2].

Las pérdidas causadas por deficiencias tribológicas para la economía de cualquier país son enormes ya que se debe tomar en cuenta toda la energía que se desperdicia de manera simultánea en cada uno de los millones de dispositivos mecánicos utilizados a lo largo del territorio. Se estima que a nivel mundial una tercera parte de la energía generada en procesos termodinámicos se pierde a causa de la fricción [1], provocando grandes gastos en mantenimiento, pausas en producción debido a fallas y sustitución de equipo.

A los materiales que cumplen con los objetivos de la tribología y que por ende presentan ciertas características tales como reducir la fricción y el desgaste en aplicaciones donde hay contacto entre superficies, se les conoce como materiales tribológicos. Como es lógico, el estudio y la posterior designación de los materiales que tendrán aplicaciones tribológicas está completamente ligado al uso que se les dará, pues cada material presenta propiedades particulares que dependen de los elementos que lo conforman. Uno de los objetivos de la tribología que está estrechamente vinculado con la ciencia e ingeniería de materiales es precisamente el diseño y optimización de materiales tribológicos.

1.2 Cojinetes de deslizamiento

Los cojinetes de deslizamiento son elementos de máquina que forman parte de los motores de combustión interna; son utilizados para permitir la transmisión de carga y par, además de reducir la fricción e inhibir el desgaste entre dos piezas que tienen movimiento relativo entre sí [3]. Este objetivo se puede alcanzar mediante sistemas con o sin lubricación. Los cojinetes de deslizamiento son parte esencial de la maquinaria ya que la fricción hace que se consuman cantidades de energía; el desgaste altera las dimensiones y ajuste de las piezas hasta que se requiera el remplazo de las mismas o en algunos casos se puede llegar a la inutilización de la máquina [4].

Como los cojinetes de deslizamiento actúan bajo condiciones de contacto se entiende que de los seis grados de libertad que tiene un cuerpo sólido, se elimina por lo menos uno. Por lo general los cojinetes se diseñan de tal manera que permiten un solo grado de libertad, por ejemplo una translación en una dirección o una rotación alrededor de un eje fijo [1].

En los motores de combustión interna, el uso de cojinetes de deslizamiento contribuye de manera substancial a la mejora de la eficiencia, ya que se obtienen beneficios tales como un mejor aprovechamiento de combustible, menor consumo de aceite, reducción de emisiones contaminantes y disminución en gastos de mantenimiento [5].

El funcionamiento de los cojinetes de deslizamiento consiste en que entre el eje y el cojinete se tiene una delgada película lubricante, la cual impide el contacto entre metales, cumpliéndose así el objetivo de limitar la fricción; dicha película también funciona como refrigerante al contribuir en la transferencia de calor y como amortiguador, ya que absorbe los impactos causados por vibraciones y cargas variables, las cuales son típicas para motores de combustión interna. Este tipo de cojinetes son conocidos como hidrodinámicos [6].

Otro elemento de máquina que puede realizar funciones muy similares a las de los cojinetes de deslizamiento son los rodamientos o baleros. Probablemente la ventaja más importante que presentan los rodamientos es que el rozamiento en el arranque no es mucho mayor que en funcionamiento normal, además de que tienen gran capacidad para resistir fuerzas axiales.

Los requerimientos de espacio para rodamientos y cojinetes de deslizamiento son diferentes. El primero puede ocupar un espacio radial del mismo tamaño del eje sobre el cual está montado; mientras que un cojinete de deslizamiento, independientemente del radio del eje, no mide más que unos milímetros, pero su ancho puede ser mucho mayor que el de un rodamiento [1].

1.2.1 Propiedades de los cojinetes de deslizamiento

Los cojinetes de deslizamiento están diseñados para funcionar bajo condiciones de lubricación hidrodinámica donde una delgada película de aceite separa al cojinete del eje; es bajo estas circunstancias cuando se logra la mayor eficiencia y una larga vida útil. Sin embargo, tanto al arrancar como al detener la máquina es común que se presenten cambios bruscos en el régimen de operación [6]. Es por lo anterior que los materiales con los que se fabrican los cojinetes de deslizamiento deben cumplir con ciertas propiedades térmicas y mecánicas que a continuación se mencionan.

Propiedades mecánicas:

- *Compatibilidad*. Se deben tener buenas propiedades para evitar que los materiales tanto del eje como del cojinete se adhieran o peguen, ya que ocasionalmente habrá contacto entre metales [7].
- *Conformabilidad*. Es una medida de la disposición para ajustarse a un mal alineamiento o a algunos otros errores geométricos [2].
- *Incrustabilidad*. El material del cojinete debe tener la capacidad de absorber partículas extrañas y así evitar el rayado [7].
- El material debe cumplir con ciertos parámetros de *resistencia mecánica* ya que será sometido a diversas cargas en distintas condiciones geométricas, por lo que es común utilizar un material base llamado casquillo el cual generalmente está hecho de un acero de bajo carbono [6].

Propiedades térmicas:

- *Alta conductividad térmica* para que el calor generado debido a la fricción pueda ser disipado y de esta manera proteger al cojinete de un sobrecalentamiento [13].
- *Bajo coeficiente de expansión térmica* debido a que durante el funcionamiento del motor se elevará la temperatura [7].
- El material del cojinete debe tener un *punto de fusión* mayor a la temperatura de operación del motor y al de la película lubricante en cualquier condición de funcionamiento, de lo contrario el material comenzará a fundirse causando una falla en el sistema [6].

Además de las propiedades anteriores cabe destacar que los cojinetes de deslizamiento deben tener buena *resistencia a la corrosión* para aquellas aplicaciones donde se corra el riesgo de que el aceite lubricante se degrade y por lo tanto actúe como agente corrosivo. Finalmente, aunque no de menos importancia, el **costo** del material debe ser el menor posible [6].

1.2.2 Materiales para cojinetes de deslizamiento

En el año 1839 comenzó un periodo de evolución de las aleaciones utilizadas en la fabricación de cojinetes de deslizamiento, esto debido a la aparición de los metales Babbit, los cuales están basados en el sistema binario plomo–estaño, el cual forma un eutéctico simple y que tiene solubilidad sólida limitada de ambos elementos en el otro. Los Babbit o también llamados metales blancos poseen buena compatibilidad, incrustabilidad y conformabilidad. Sin embargo, su resistencia mecánica es baja. Cabe destacar que su resistencia a la corrosión va en función de la composición específica que se utilice, las

aleaciones con un alto contenido de estaño presentan una excelente resistencia a la misma, no así las que tienen alto contenido de plomo [1].

Al continuar con las investigaciones se pudo observar que las aleaciones cobre–plomo cuentan con buena compatibilidad la cual se obtiene a partir del plomo, mientras que el cobre mejora la resistencia mecánica. Una desventaja de estas aleaciones era que en estado líquido se forman dos fases no mezclables lo cual provoca segregación gravimétrica, por lo que era necesario recurrir a la metalurgia de polvos para lograr una correcta aleación. Sin embargo, gracias a nuevas técnicas en el proceso de fundición, hoy se pueden obtener este tipo de aleaciones por medio de colada sobre la base de acero lo cual reduce costos y dota al material de mejores propiedades mecánicas. Debido a que en un medio contaminado por azufre la resistencia a la corrosión de este tipo de aleaciones no es buena, se acostumbra aplicar un recubrimiento electrolítico de Babbitt en la superficie. Como este tipo de cojinetes se compone de una capa de Babbitt sobre la aleación cobre–plomo y ésta se encuentra a su vez sobre un respaldo de acero se les conoce como trimetálicos. Este tipo de cojinetes son utilizados bajo condiciones severas de trabajo [8].

Dependiendo de la aplicación que tendrán, los cojinetes de deslizamiento se han fabricado con muy diversos materiales a lo largo de la historia. A continuación se mencionarán algunos de los más importantes.

- *Aleaciones de aluminio.* Presentan buena capacidad de carga, resistencia a la fatiga, conductividad térmica, resistencia a la corrosión y bajo costo.
- *Metales porosos.* Son de metal sinterizado, tienen poros de interconexión en los cuales se almacena aceite con lo que se lubrica la superficie del cojinete.
- *Cojinetes de hierro fundido o acero.* Se utilizan para cargas relativamente pequeñas, su principal ventaja es el bajo costo. Tienen poca incrustabilidad y conformabilidad por lo que se debe tener un muy buen alineamiento.
- *Polímeros.* Presentan buena compatibilidad, poco ruido en el funcionamiento y no hay corrosión. No es posible utilizarlos a altas temperaturas de operación [6].

1.2.3 Aleaciones base aluminio para cojinetes de deslizamiento

En el momento en el que se inventaron las aleaciones aluminio–estaño, se buscaba una matriz resistente para contener a un babbitt ya que por la Segunda Guerra Mundial las potencias del Eje se veían limitadas en sus reservas de cobre. Dos ventajas de las aleaciones de aluminio son que se pueden producir por fundición seguida de un tratamiento termomecánico y que su excelente resistencia a la corrosión permite utilizarlas sin recubrimiento de babbitt [1]. Gracias a lo anterior es que se habla de cojinetes bimetálicos, los cuales se componen de una base de acero cubierta con una aleación de aluminio–estaño;

su proceso de fabricación disminuye substancialmente los costos que podrían derivarse de un proceso de pulvimetalurgia.

Una característica del uso de aleaciones basadas en aluminio de pureza industrial es la presencia de Fe y Mn como contaminantes de la materia prima. El segundo se puede añadir de manera intencional para mejorar la estabilidad térmica de la aleación y para modificar la forma alargada de los intermetálicos $\text{Fe}_2\text{Si}_2\text{Al}_9$, los cuales pueden causar serios problemas en la reducción de los lingotes, pero posteriormente pueden contribuir en la obtención de un grano fino [1].

Otro incentivo para el uso del aluminio en los cojinetes de deslizamiento es que el costo de este metal es relativamente estable. Por lo anterior y por algunas de sus propiedades tales como su excelente resistencia a la corrosión la cual se genera a partir de la capa de óxido que se crea en su superficie a temperatura ambiente, además de que al añadir elementos aleantes es posible modificar algunas propiedades físicas tales como la conductividad eléctrica, el coeficiente de expansión térmica, conductividad térmica y su temperatura de fusión, se ha planteado que las aleaciones base aluminio con un porcentaje de estaño son viables para ser utilizadas en la fabricación de cojinetes de deslizamiento. Este tipo de aleaciones ha tenido mucho éxito ya que se ha observado que en condiciones límite como al arranque del motor o en caso de tener problemas con la lubricación y que la temperatura de operación se eleve, se forma un tribocapa antidesgaste y antifricción [8].

A las aleaciones aluminio–estaño se les puede suministrar algunos elementos aleantes tales como:

- Silicio (Si), Hierro (Fe) o Níquel (Ni) los cuales forman partículas duras que mejoran la resistencia mecánica y resistencia a la fatiga.
- Cobre (Cu) el cual aumenta la resistencia de la matriz y promueve la formación de algunos intermetálicos tales como CuAl_2 .

En la tabla 1.1 se presentan las principales aleaciones de aluminio utilizadas en cojinetes de deslizamiento, así como algunas de sus características y aplicaciones.

Designación SAE	Designación ISO	Características	Aplicaciones
770	AlSn6Cu	Buena resistencia a la corrosión. Buena compatibilidad. Buena conformabilidad. Buena incrustabilidad. Resistencia a la fatiga. Resistencia a la cavitación.	Cojinetes de cigüeñal en motores de automóvil y como recubrimiento para servicio pesado.
783	AlSn20Cu	Buena resistencia a la corrosión. Buena compatibilidad. Buena incrustabilidad. Baja resistencia a la fatiga y a la cavitación.	Cojinetes para motores de automóviles.
784	AlSi11Cu	Buena resistencia a la corrosión. Mala compatibilidad. Pobre conformabilidad. Buena incrustabilidad. Buena resistencia a la fatiga. Resistencia a la cavitación.	Cojinetes de cigüeñal para servicio pesado.
786	AlSn40	Buena resistencia a la corrosión. Buena compatibilidad. Buena conformabilidad. Buena incrustabilidad. Baja resistencia a la fatiga. Baja resistencia a la cavitación.	Motores diesel marinos, generalmente con recubrimiento de plomo-estaño
788	AlSn12Si	La mejor resistencia a la fatiga y al desgaste en combinación con cigüeñales de hierro nodular.	Cojinetes para motores de automóviles.

Tabla 1.1. Aplicaciones según SAE de las aleaciones de aluminio [7]

1.2.4 Aleación SAE 788

En la Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales se han estudiado ampliamente dos aleaciones tribológicas que se utilizan en la fabricación de cojinetes de deslizamiento, el presente trabajo se enfoca en el estudio de una de ellas; la aleación SAE 788.

La composición en peso de la aleación SAE 788 es la siguiente:

- Aluminio – 82.8%
- Estaño – 12%
- Silicio – 2.5%
- Plomo – 1.7%
- Cobre – 0.7%
- Otros – 0.3%

El estaño dentro de la aleación se agrega para promover la formación de la tribocapa característica de éste tipo de aleaciones; el plomo sirven para mejorar la maquinabilidad de la aleación[7]; el cobre se añade en bajas concentraciones para obtener un endurecimiento por solución sólida y también pueden formar precipitados[1]; la adición de silicio se usa para mejorar la resistencia mediante partículas duras dentro de la matriz y además, cuando se combina con cobre, mejora la capacidad de ser fundido, ya que con el porcentaje de silicio presente se formará una fase eutéctica durante la solidificación y en consecuencia habrá una disminución en el punto de fusión de la aleación [7].

En el aluminio se encuentran diversos tipos de impurezas las cuales provienen de los procesos a los que el material ha sido sometido. Sin embargo, el aluminio obtenido después de la electrolisis de la alúmina tiene una pureza de entre 99.5% y 99.9%, siendo la principal impureza el hierro, que al combinarse con el silicio tiende a formar fases intermetálicas que intervienen de manera importante en las propiedades mecánicas de la aleación, ya que si bien pueden aumentar la resistencia del material, también pueden aumentar su fragilidad, tal y como ocurre con los intermetálicos β -AlFeSi que se forman comúnmente a bajas velocidades de crecimiento de grano. Por lo anteriormente expuesto es importante el control durante la fundición, solidificación y tratamientos térmicos de la aleación [9].

Capítulo 2. Antecedentes

En el presente capítulo se abordarán algunos conceptos básicos relacionados con la producción del material utilizado para la manufactura de cojinetes de deslizamiento, así como cuestiones relativas a las propiedades más importantes en este tipo de material.

2.1 Fundición

Como la mayoría de los materiales metálicos, las aleaciones tribológicas de aluminio provienen de un proceso de fundición en el cual se integran los diferentes elementos aleantes que en conjunto y después de ser sometidas a un proceso termomecánico, proporcionan las características deseadas en los cojinetes de deslizamiento.

La fundición es un proceso de manufactura en el cual se eleva la temperatura de un material por arriba del punto de fusión, para posteriormente ser vertido en un molde donde solidificará [10].

2.1.1 Fundición de las aleaciones de aluminio

Las propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio dependen en gran medida de la calidad en el proceso de fundición, el cual se ve afectada por ciertas variables como son la cantidad de porosidad causada por el hidrogeno en la fundición, las inclusiones y la segregación [11].

La turbulencia o la agitación del metal fundido provoca que aumente la cantidad de hidrogeno en solución, mientras que su solubilidad aumenta considerablemente con la temperatura.

Durante el enfriamiento y la solidificación del aluminio, el hidrógeno puede precipitar en forma molecular ya que éste es el único gas apreciablemente soluble en el aluminio, lo que provoca la formación de poros, esto causado por la gran diferencia de solubilidad de hidrógeno entre el estado líquido y el sólido [11].

El hidrógeno en el aluminio puede generarse de diversas fuentes como la atmosfera en la cual se realiza la fundición ya que en el horno puede haberse generado una combustión incompleta; si las herramientas utilizadas durante el proceso no se mantienen

limpias se puede presentar una situación similar a la descrita para los materiales que conforman la aleación por lo que también son una fuente potencial de hidrógeno. Si durante el vaciado el flujo de metal fundido es turbulento se puede aspirar aire hacia el molde, este debe ser expulsado antes de la solidificación ya que de no ser así se tendrá absorción de hidrógeno en la fundición [12].

La reacción mediante la cual se puede tener presencia de hidrógeno en la aleación es la siguiente:



El método más simple para disminuir el contenido de hidrógeno en las aleaciones de aluminio es desgasificar la fundición inyectando un gas o combinaciones de gases a presión por medio de un tubo de acero recubierto con algún material cerámico. El gas sirve para encapsular el hidrógeno en una burbuja de gas y saldrá a la superficie para ser expulsada a la atmósfera. Cabe destacar que se debe inyectar el gas purgante de manera uniforme en toda la fundición ya que las burbujas se forman en el lugar donde el metal fundido entró en contacto con el gas, es decir, en una zona cercana al tubo de inyección y por ende se limita la cantidad de metal que entra en contacto con el gas [8].

Para desgasificar por medio de inyección se pueden utilizar gases inertes (como argón o nitrógeno) o gases reactivos (como cloro o freón 12).

Otro método para desgasificar (posiblemente el más común) es el uso de pastillas de hexacloretano (C_2Cl_6) las cuales al reaccionar con el aluminio forman $AlCl_3$ gaseoso que generará burbujas que atrapan al hidrógeno y lo llevan a la superficie para finalmente ser expulsado a la atmósfera. Las pastillas de hexacloretano deben conservarse en lugares secos y al ser utilizadas lo más conveniente es llevarlas hasta el fondo del crisol con ayuda de herramientas limpias y mantenerlas en esa posición hasta que se pueda apreciar burbujeo en la superficie. De no hacerse de esta manera, la pastilla subirá a la superficie ya que su densidad es menor que la del metal fundido y no se llevará a cabo una correcta desgasificación [12].

2.2. Solidificación

Como ya se mencionó, el sistema aluminio–estaño comienza a solidificar aproximadamente a los $650^\circ C$, sin embargo el estaño se mantiene en estado líquido hasta aproximadamente los $229^\circ C$; este gran rango de temperaturas provoca segregación [9].

Mientras menor sea la dispersión de inclusiones y menor el tamaño de las partículas de segunda fase, se obtendrán mejores propiedades en la aleación. Al tener grandes masas

de óxidos o compuestos intermetálicos el material se hará extremadamente frágil. Hasta cierto punto es posible variar la forma y el tamaño de los precipitados de segunda fase controlando la composición. Sin embargo, esto se puede lograr de manera más eficiente minimizando el periodo durante el cual los microconstituyentes antes mencionados puedan crecer. Por lo tanto, es evidente que tener una velocidad de enfriamiento elevada es de gran importancia para obtener una pieza de buena calidad.

Cabe destacar que las inclusiones son partículas arrastradas que provienen del molde, atmósfera o escoria y no son deseadas en la aleación. Por otro lado, los precipitados son partículas que se forman durante la solidificación y que como ya se mencionó su crecimiento puede ser controlado con la finalidad de modificar algunas propiedades del material.

Existen varios tipos de partículas en fase sólida para aleaciones de aluminio, tales como óxidos (Al_2O_3) o intermetálicos (FeAl_3) [11].

2.2.1 Óxidos

El aluminio y sus aleaciones se oxidan rápidamente tanto en estado sólido como en el líquido y forman una capa continua autolimitante la cual es benéfica ya que limita la oxidación y actúa como barrera para la difusión del hidrógeno en solución. Elementos reactivos contenidos en aleaciones de aluminio como el magnesio, estroncio, sodio, calcio, berilio o titanio también son factores en la formación de óxidos. Provocar turbulencia cuando la aleación se encuentra en estado líquido da como resultado que se arrastren partículas de óxidos las cuales quedarán atrapadas ya que su densidad es similar a la del aluminio fundido. Lo anterior provocará que la aleación aumente su fragilidad por lo que debe evitarse agitar el metal fundido.

Los óxidos se forman por oxidación directa con el aire, por reacción con vapor de agua o por reacciones aluminotérmicas con los óxidos de otros metales como hierro o silicio contenidos en herramientas y refractarios.

Con el objetivo de separar partículas sólidas de la fundición o aleación de aluminio se utilizan aditivos sólidos o gases químicamente activos como cloro o flúor; estos aditivos también sirven para minimizar la formación de óxidos, especialmente en el caso de aleaciones que contengan magnesio. Polvos de grafito y boro también retardan efectivamente la oxidación cuando se añaden a la superficie de la fundición [12].

2.3 Estructura de las fundiciones de aluminio

El tamaño, la forma y distribución de fases microestructurales, el espaciamiento interdendrítico y el tamaño de grano son factores que definen la estructura de las fundiciones de aluminio.

El tamaño de la estructura dendrítica puede ser controlada al manipular la velocidad de solidificación, mientras que el tamaño y distribución de fases primarias e intermetálicas son considerablemente más complejos de controlar. Sin embargo, el control en la concentración de impurezas, el control en la relación de los componentes de la aleación basado en estequiometría de las fases intermetálicas y el control de las condiciones de solidificación para garantizar una correcta distribución y tamaño de las fases intermetálicas, además del correcto uso de modificadores y refinadores de grano son de gran ayuda para obtener una buena estructura en la aleación.

El uso de modificadores y refinadores de grano en las aleaciones de aluminio-silicio es un ejemplo de que es posible controlar las estructuras eutécticas e hipereutécticas durante el proceso de fundición [14].

2.3.1 Estructura del grano

Normalmente en las fundiciones de aluminio se desea una estructura de grano fina y equiaxial; el tipo y el tamaño de grano son determinados por la composición de la aleación, la velocidad de solidificación y la adición de aleaciones maestras (refinadores de grano) que contienen partículas de fases intermetálicas que actúan como agentes nucleantes para la fase primaria α -Al.

Usualmente para refinar el grano en las aleaciones de aluminio se utilizan aleaciones maestras de aluminio-titanio o aluminio-titanio-boro. El contenido de titanio en estas aleaciones va de 3% a 10% y de 0.1% a 3% de boro y depende de los requerimientos que deba cumplir la fundición. Sin embargo, el uso de las aleaciones Al-5%Ti-1%B y Al-5%Ti-0.6%B es común ya que promueven un buen refinamiento de grano bajo casi cualquier condición [14].

En las imágenes 2.1 a 2.3 es posible apreciar los efectos del refinador AlTiB agregado en diferentes cantidades a una aleación SAE 788.

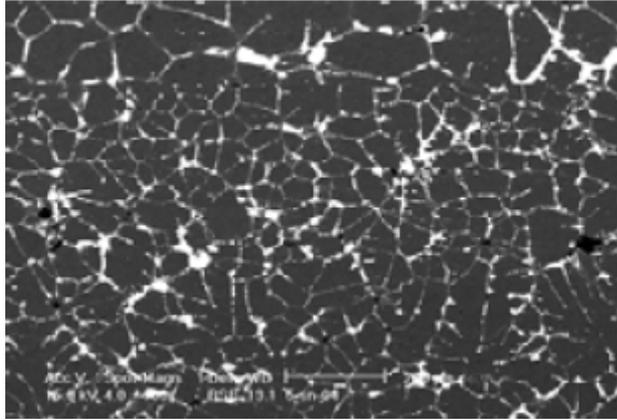


Imagen 2.1. Aleación SAE – 788 sin refinador [16].

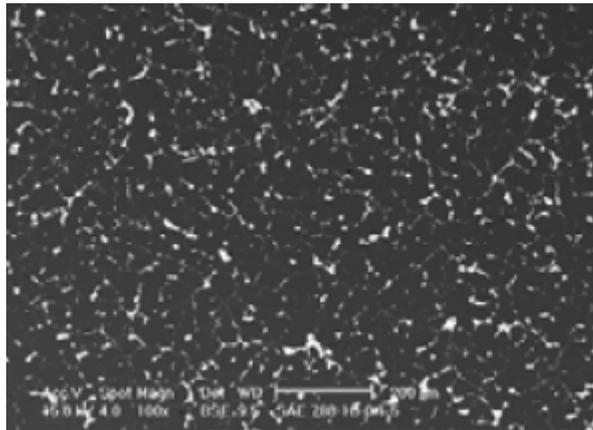


Imagen 2.2. Aleación SAE- 788 con 0.1% de refinador [16].

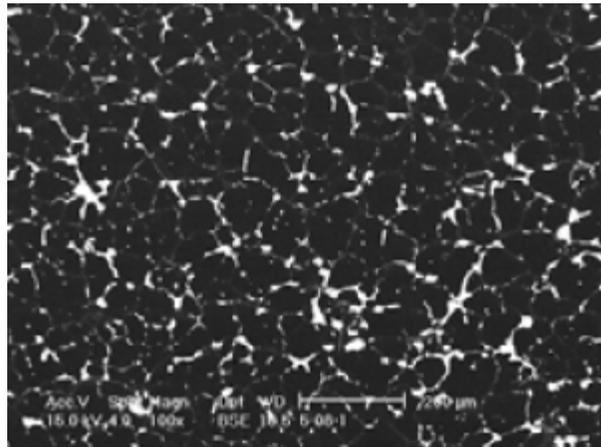


Imagen 2.3. Aleación SAE- 788 con 0.8% de refinador [16].

En el caso de la aleación sin refinador se puede observar poca homogeneidad en el tamaño de grano, ya que se tienen presentes desde granos relativamente finos hasta granos demasiado grandes. Cuando se adiciona 0.1% de refinador, la situación cambia ya que se aprecia un tamaño de grano fino y homogéneo, aún más que en la aleación con 0.8% de refinador donde se tiene homogeneidad pero el tamaño de grano es mayor que en la aleación a la que se le adicionó 0.1% de refinador.

En las aleaciones de Al-Si se observa una estructura irregular donde el crecimiento de los granos de aluminio y silicio es excesivo, si se tiene un enfriamiento lento el silicio adopta una morfología gruesa en forma de laminillas que favorecen la formación de grietas en la pieza, lo que la hace bastante frágil. Si se logra una transición de laminillas a fibras el material aumenta su ductilidad. Para lograr lo anterior se requieren altas velocidades de enfriamiento.

Uno de los desarrollos que ha permitido mejoras considerables en las propiedades mecánicas de las aleaciones Al-Si y, con esto, su ingreso al grupo de aleaciones con mayor aplicación comercial, es el tratamiento de modificación, en el cual se incorporan a la aleación en estado líquido agentes químicos llamados modificadores los cuales cambian la morfología del Si produciendo una notable mejora en las propiedades mecánicas y en la respuesta a tratamientos térmicos [11].

Los agentes modificadores más comunes son el sodio, estroncio y antimonio, aunque sólo el sodio y el estroncio han encontrado aceptación en Estados Unidos ya que el antimonio presenta diversos inconvenientes, entre los cuales destaca el peligro que representan los gases tóxicos que eventualmente pueden producirse durante su empleo en planta.

El tratamiento convencional de modificación se realiza en el horno o en el crisol y consiste en agregar una cantidad preestablecida de agente modificador al metal en estado líquido. La cantidad a adicionar se determina experimentalmente en función de la masa de la aleación a tratar y del nivel deseado de modificación.

2.4 Endurecimiento por deformación

El tiempo de relajación para los procesos moleculares en gases y en la mayoría de los líquidos es corto por lo que casi siempre se encuentran en un estado de equilibrio bien definido; en consecuencia, la estructura de un gas o de un líquido no depende de los procesos a los que fueron sometidos. En contraste, los tiempos de relajación en algunos procesos atómicos en cristales son tan largos que difícilmente se llega al estado de equilibrio, ésta es la razón por la que en los metales se tiene la característica de que al ser

deformados se endurecen. Si el tiempo de relajación fuera corto, la estructura regresaría casi de inmediato a su estado de equilibrio y al aplicar deformación plástica se tendría un esfuerzo constante, este comportamiento se conoce como idealmente plástico (imagen 2.4). Sin embargo, cuando un sólido cristalino real es deformado plásticamente se aumenta la resistencia por lo que es necesario incrementar la carga para continuar deformando el material. A lo anterior se le conoce como endurecimiento por deformación [13].

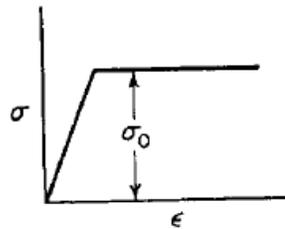


Imagen 2.4. Comportamiento idealmente plástico [13].

El endurecimiento al aplicar deformación plástica a un metal es uno de los procesos más importantes al trabajar con este tipo de materiales ya que algunos en particular no endurecen por precipitación y al ser dúctiles responden bien al endurecimiento por trabajo en frío.

Básicamente el endurecimiento en un material cristalino se da porque al aplicar una carga se tiene movimiento de dislocaciones que provoca la deformación plástica. Dichas dislocaciones aumentan en número, interactúan directamente entre sí y con otras imperfecciones o indirectamente con campos de esfuerzos generados por imperfecciones y obstáculos; estas interacciones provocan una disminución en la movilidad de las dislocaciones, lo que lleva a la necesidad de aplicar un mayor esfuerzo para continuar con el movimiento. Cabe destacar que al endurecer por deformación un material se disminuye la ductilidad del mismo (imagen 2.5).

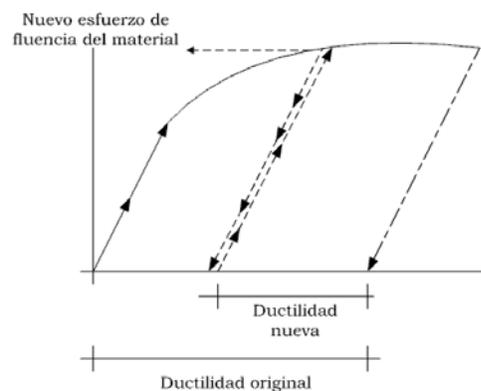


Imagen 2.5. Curva en la que se observa que al deformar plásticamente se disminuye la ductilidad del material.

En el caso de algunos metales el esfuerzo requerido para deformar plásticamente un metal sometido a deformaciones previas por debajo de la temperatura de recristalización está dado por la relación de Ludwik:

$$\sigma = \sigma_y + K \varepsilon^n$$

Donde σ_y es el esfuerzo de cedencia, K es el módulo de resistencia, n el coeficiente de endurecimiento por trabajo en frío, σ el esfuerzo y ε la deformación. Para la mayoría de los metales n toma valores entre 0.1 y 0.5.

2.5 Laminación

El laminado es un proceso de deformación volumétrica, en el que se reduce el espesor o la sección transversal de una pieza de trabajo por medio de fricción aplicada a través de un juego de rodillos que giran en sentidos opuestos. En el proceso de laminado lo más común es que el material no sufra un ensanchamiento significativo ya que las fuerzas de fricción entre los rodillos y el metal no lo permiten, por lo que la deformación se ve reflejada en el alargamiento del material (imagen 2.6) [17].

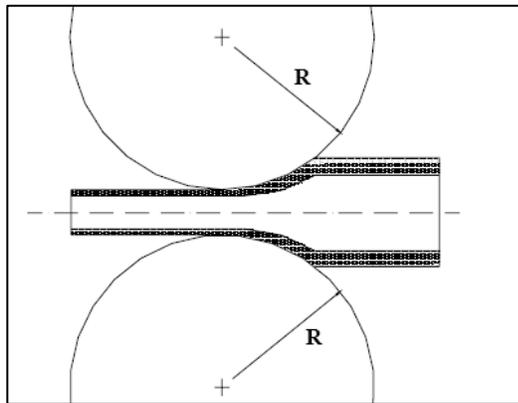


Imagen 2.6. Diagrama del proceso de laminado.

Una clasificación importante del proceso de laminado es con base en la temperatura a la que éste es realizado; si el proceso se lleva a cabo por encima de la temperatura de recristalización, la cual es aproximadamente la mitad de la temperatura de fusión en escala absoluta, se dice que el laminado es en caliente, de lo contrario es laminado en frío. Los dos procesos aunque tienen el mismo propósito (reducir el espesor de la pieza) cumplen con diferentes necesidades.

Algunas de las ventajas obtenidas al laminar el material en caliente es que las discontinuidades del lingote quedan soldadas a presión, resultando un material homogéneo,

además de que la reducción en cada paso es grande ya que la deformación plástica se logra más fácilmente si el material se encuentra a temperatura elevada. También se tienen algunas desventajas tales como la pobre precisión geométrica y la estructura granular burda provocada por el enfriamiento lento del material.

Normalmente el laminado en frío se realiza a temperatura ambiente y es utilizado para producir lámina o perfiles con buenos acabados superficiales y buena tolerancia geométrica. Además, la deformación en frío provoca endurecimiento del material y orientación de los granos, dándole distintas propiedades mecánicas al producto final.

El laminado es sin duda el proceso de conformado mecánico más importante, ya que produce cerca del 90% de todos los productos generados por conformado mecánico. Esto es porque permite una alta productividad, buenos acabados superficiales y excelentes tolerancias geométricas [17].

2.6 Ensayo de tracción

El ensayo de tracción es una de las pruebas más utilizadas para evaluar el comportamiento de un material; en su forma más simple, consiste en sujetar por ambos extremos una probeta para posteriormente aplicar una deformación [17].

Durante el ensayo de tracción se lleva un registro de la carga aplicada a la probeta y el incremento en su longitud. Cuando el ensayo de tracción se realiza de manera correcta, es posible obtener ciertas propiedades mecánicas muy importantes del material tales como las que a continuación se mencionan:

- **Resistencia a la tracción.** Es el cociente obtenido al dividir la carga máxima por la sección transversal de la probeta.

$$\sigma_u = \frac{P_{max}}{A_0}$$

Esta resistencia puede ser considerada en los metales dúctiles como una medida de la carga máxima que puede soportar un metal bajo condiciones de carga uniaxial.

- **Tenacidad.** Representa la capacidad para absorber energía en el campo plástico, una forma de cuantificarla es considerando el área total bajo la curva esfuerzo–deformación, esta área es una indicación del trabajo total que puede realizarse en el material sin que se produzca fractura, por unidad de volumen.

El ensayo de tracción también resulta útil para visualizar características del endurecimiento por deformación que presenta el material y propiedades relativas a su ductilidad, tales como el incremento en la longitud y reducción del área transversal [13].

Las propiedades mecánicas obtenidas a partir del ensayo de tracción son utilizadas entre otras cosas para llevar un mejor control de calidad en procesos de producción, para predecir el comportamiento de materiales estructurales o para evaluar el desarrollo de nuevas aleaciones.

En el ensayo de tracción y considerando un sistema principal, la probeta está sometida al siguiente estado de esfuerzos uniaxial.

$$\sigma_1 \begin{pmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Aplicando las ecuaciones de la Ley de Hooke generalizada es posible obtener las deformaciones correspondientes en régimen elástico para un material isotrópico.

$$\epsilon_1 \begin{pmatrix} \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & -\nu \epsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & -\nu \epsilon_{11} \end{pmatrix}$$

O en términos de esfuerzo:

$$\epsilon_1 \begin{pmatrix} \frac{\sigma_{11}}{E} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\nu \sigma_{11}}{E} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\nu \sigma_{11}}{E} \end{pmatrix}$$

2.7 Curva ingenieril esfuerzo–deformación

A partir del ensayo de tracción convencional, se obtiene la curva esfuerzo–deformación ingenieril cuyos puntos representan la medida de la carga aplicada y elongación sufrida por la probeta. El esfuerzo ingenieril (s) usado en esta curva muestra un promedio de los esfuerzos aplicados longitudinalmente a la probeta a lo largo del ensayo y se obtiene dividiendo la carga (P) entre el área original (A_0) de la sección transversal de la probeta.

$$s = \frac{P}{A_0}$$

La deformación (ϵ) utilizada en la curva ingenieril, es un promedio de la deformación lineal la cual se obtiene dividiendo la elongación sufrida por la probeta (δ) entre su longitud inicial (L_0).

$$\epsilon = \frac{\delta}{L_0} = \frac{AF}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0}$$

Como el esfuerzo y deformación ingenieriles son obtenidos dividiendo la carga y la elongación respectivamente, entre factores constantes, la curva carga–elongación tiene la misma forma que la curva esfuerzo–deformación ingenieril por lo que frecuentemente ambas se usan de manera alternada [17]. Sin embargo, se debe aclarar que la curva carga–desplazamiento no sirve para caracterizar al material.

La forma y magnitud de la curva esfuerzo–deformación ingenieril en un metal depende de diversos factores tales como su composición, tratamientos térmicos aplicados antes y después de la deformación plástica, velocidad de deformación, temperatura y el estado de esfuerzos generado durante el ensayo.

En general, la curva esfuerzo–deformación ingenieril se compone de una zona elástica donde ambos parámetros guardan una proporción lineal; cuando el esfuerzo excede el valor correspondiente al esfuerzo de fluencia se entra en una zona de deformación plástica donde el esfuerzo requerido para continuar deformando el material aumenta conforme aumenta la deformación. Cabe destacar que hasta este punto la deformación a lo largo de la probeta se considera uniforme y hay una reducción del área transversal proporcional al aumento de la longitud de la probeta. Al llegar al punto de esfuerzo máximo, en una zona específica de la probeta se da la formación de un cuello debido a que la reducción del área transversal aumenta más rápidamente que la longitud de la probeta, a partir de aquí solamente se deforma esta zona de la probeta y por ende el esfuerzo disminuye hasta llegar a un punto donde el área se ha reducido al grado de no soportar la carga y derivar en la fractura de la probeta [17].

2.8 Curva real esfuerzo–deformación

La curva ingenieril esfuerzo–deformación, al estar basada completamente en las dimensiones iniciales de la probeta no proporciona una verdadera indicación de las características de deformación del material, ya que sus dimensiones cambian constantemente durante la prueba. Además, un metal dúctil al ser sometido al ensayo de tracción muestra datos erróneos a partir de la zona de formación del cuello, ya que a pesar de que el material continúa endureciéndose por deformación, la curva muestra una caída en el esfuerzo provocada porque el área que se está considerando es la inicial, a pesar de que

se sufre una fuerte reducción de la misma. Si se considerara el esfuerzo verdadero, basado en el área en cada momento del ensayo, éste continuaría elevándose hasta llegar a la fractura. Si la deformación también se midiera instantáneamente y se graficaran ambos valores se obtendría una curva real de esfuerzo–deformación [17].

El esfuerzo real es la carga aplicada en cualquier instante, dividida por el área de la sección transversal en ese mismo instante.

$$\sigma = \frac{P}{A_t}$$

Asimismo, la deformación real está dada por la siguiente expresión:

$$s = \ln \frac{L}{L_0} = \ln \frac{A_0}{A}$$

En términos del esfuerzo y deformación ingenieriles, el esfuerzo verdadero se puede representar de la siguiente manera:

$$\sigma = s(s + 1)$$

Sin embargo, la expresión anterior es válida solamente para la zona previa a la formación del cuello, ya que en ella se considera constancia en el volumen y homogeneidad en la deformación a lo largo de toda la probeta, más allá de la carga máxima, el esfuerzo real debe ser obtenido basándose en su definición.

Y la deformación verdadera:

$$s = \ln (s + 1)$$

2.9 Tratamiento térmico

Cuando un metal se encuentra en estado sólido pueden ocurrir muchos tipos de transformaciones microestructurales que afectan sus propiedades mecánicas, dichas transformaciones pueden manipularse al elevar y posteriormente disminuir la temperatura del material bajo ciertas condiciones; a este tipo de proceso se le llama tratamiento térmico. El control cuidadoso de la temperatura, así como sus tiempos, es esencial para obtener la microestructura deseada. Para la correcta aplicación de los tratamientos térmicos es esencial el uso de los diagramas de fases que sirven para seleccionar las temperaturas apropiadas, pero también se necesitan datos experimentales para lograr la combinación óptima de tiempos, temperaturas y composiciones [18].

2.10 Recocido

Un metal al ser deformado en frío presenta cambios en sus propiedades físicas y mecánicas, el incremento en la dureza y resistencia del material obtenidos mediante este proceso es necesario para ciertas aplicaciones, sin embargo, es frecuente que se necesite regresar al metal ciertas propiedades físicas, como la conductividad eléctrica, o mecánicas, como la ductilidad, en caso de requerir algún proceso de deformación posterior [19].

La energía libre de un material cristalino se incrementa al ser deformado en frío debido al aumento en la densidad de dislocaciones (ρ); esta puede ir desde 10^{10} – 10^{12} metro de dislocaciones por metro cúbico en un material sin deformar, hasta 10^{15} – 10^{16} metro de dislocaciones por metro cúbico en un material severamente deformado. Un material con tal densidad de dislocaciones es termodinámicamente inestable, y aunque la termodinámica sugiere que estos defectos se reducirán espontáneamente, en la práctica los mecanismos para disminuir ρ a temperatura ambiente son muy lentos; como resultado se tiene una estructura inestable posterior al proceso de deformación [19].

Si después de haber aplicado la deformación se eleva la temperatura del material, se activarán ciertos procesos tales como la difusión en estado sólido la cual facilita los mecanismos para reducir el número de dislocaciones en el material, o para acomodarlas de tal forma que sea posible llegar a un estado de menor energía.

El tratamiento térmico que se utiliza para disminuir energía libre y por ende la dureza e incrementar la ductilidad de metales previamente trabajados en frío se conoce como recocido. Este tratamiento usualmente implica calentar el material previamente deformado durante un periodo específico de tiempo a una temperatura aproximada de la mitad de su temperatura de fusión en escala absoluta [15].

El proceso de recocido es la combinación de tres etapas: recuperación, recristalización y crecimiento de grano; a continuación se describe brevemente cada una de ellas [19].

2.10.1 Recuperación

La recuperación es un proceso relativamente homogéneo en términos de espacio y tiempo. En esta etapa se recuperan parcialmente algunas de las propiedades que el material tenía antes del trabajo en frío ya que se libera una pequeña parte de la energía almacenada. Hoy en día se sabe que la recuperación se da principalmente por los cambios provocados

sobre las dislocaciones del material, ya que éstas adoptan nuevas posiciones en las que la energía es menor [15].

En la recuperación se presentan cambios en la densidad y distribución de los defectos relacionados por las propiedades físicas y mecánicas del material. La estructura de un material trabajado en frío presenta una densa red de dislocaciones. Como se muestra en la imagen 2.7, cabe destacar que el enredo de dislocaciones y la formación de celdas son etapas que se tienen durante la deformación en frío, mientras que la aniquilación de dislocaciones dentro de la celda, la formación de subgranos y el crecimiento de subgranos forman parte de la recuperación, la cual consiste principalmente en el reordenamiento de dichos defectos para de esa manera reducir la energía del sistema [19].

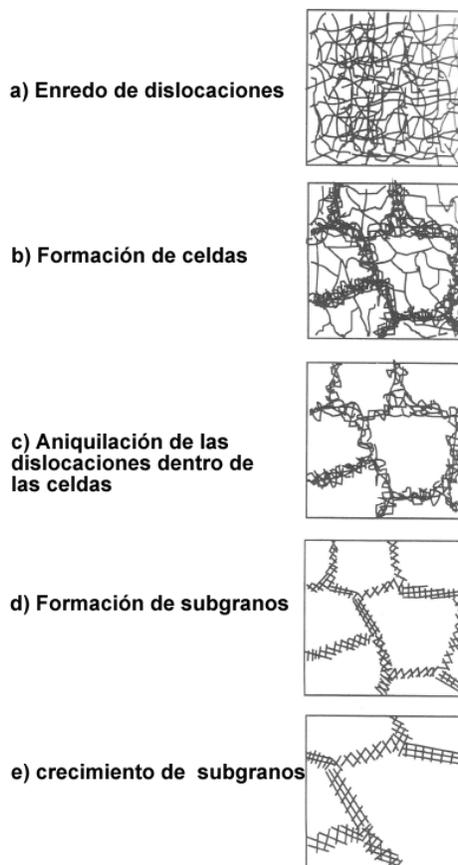


Imagen 2.7. Etapas en la deformación en frío y de la recuperación de un material [19].

2.10.2 Recristalización

La recristalización de la estructura deformada a menudo es llamada recristalización primaria, esto para distinguirla del proceso donde el grano crece exageradamente, lo que ocurre en un material completamente recristalizado y que en ocasiones es llamado

recristalización secundaria o crecimiento anormal de grano. Se acostumbra que al referirse simplemente al término recristalización, se está haciendo referencia a la recristalización primaria [19].

Es conveniente dividir la recristalización primaria en dos etapas: la nucleación, que corresponde a la primera aparición de nuevos granos en la microestructura, y crecimiento, que es la etapa en la que los nuevos granos reemplazan a la estructura deformada [19].

Los cambios más significativos en la estructura y propiedades de un material en el proceso de recocido se dan en la recristalización primaria. En esta etapa la red deformada es completamente reemplazada, esto implica procesos de nucleación y crecimiento de nuevos granos [19].

La orientación de los nuevos granos difiere considerablemente de los cristales que han sido consumidos, esto debido a que la nucleación se da en el límite de los granos viejos donde la energía de deformación es grande.

Entre los años 1948 (Mehl) y 1952 (Burke and Turnbull) postularon algunas leyes que describen los efectos que la microestructura inicial y los parámetros de procesamiento provocan en la recristalización [19]:

- i. **Una mínima deformación (crítica) es necesaria para iniciar la recristalización.** La deformación debe ser suficiente para que se tenga nucleación, además de proveer la fuerza impulsora necesaria para mantener el crecimiento de grano.
- ii. **La temperatura a la cual ocurre la recristalización decrece conforme el tiempo de recocido aumenta.** Esto por el hecho de que los mecanismos microscópicos que controlan la recristalización se activan térmicamente y la relación entre la velocidad de recristalización y la temperatura está dada por la ecuación de Arrhenius.
- iii. **La temperatura a la que ocurre la recristalización decrece a mayores deformaciones.** La energía almacenada, que provee la fuerza impulsora para la recristalización, se incrementa a mayores deformaciones.
- iv. **El tamaño de grano recristalizado depende principalmente de la cantidad de deformación, siendo menor para grandes deformaciones.** La velocidad de nucleación se ve más afectada que la velocidad de crecimiento por la deformación. Es decir, una mayor deformación provocará más núcleos por unidad de volumen y por lo tanto un tamaño de grano menor.
- v. **Para una cierta deformación, la temperatura de recristalización se elevará si:**
 - a) Se tiene un gran tamaño de grano inicial. Las fronteras de grano son sitios favorecidos para la nucleación, por lo tanto, un gran tamaño de grano inicial provoca que se tengan pocos sitios para la nucleación, la velocidad de nucleación baja, y la recristalización es más lenta.

- b) La deformación es a altas temperaturas. A una alta temperatura de deformación, se tendrá más recuperación durante la misma (recuperación dinámica), y la energía almacenada es menor que en deformaciones a menor temperatura.

2.10.3 Crecimiento de grano

Cuando la recristalización primaria se ha completado, es decir, cuando los nuevos granos han consumido toda la red deformada, la estructura del grano todavía no es estable. La fuerza impulsora principal, asociada con la energía de deformación, se ha consumido pero el material continúa teniendo límites de grano que almacenan energía, la cual sirve como fuerza impulsora para que los granos recristalizados sigan creciendo.

El crecimiento de grano puede dividirse en dos tipos, crecimiento de grano normal o crecimiento de grano anormal. En el primero la microestructura cambia de manera uniforme, por lo que el rango de formas y tamaños de grano es estrecho. Durante el crecimiento anormal, unos cuantos granos crecen demasiado y consumen otros granos.

En la imagen 2.8 se muestran esquemáticamente las etapas del proceso de recocido [19].

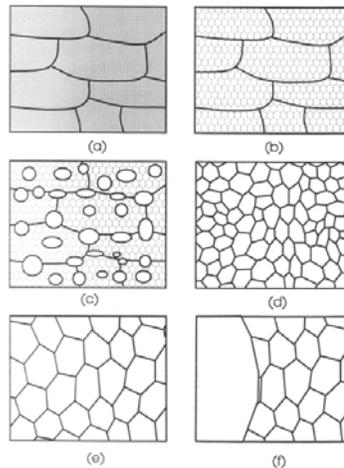


Imagen 2.8. Diagrama esquemático de las etapas en el proceso de recocido. a) Estado deformado, b) Recuperación, c) Recristalización parcial, d) Recristalización total, e) Crecimiento de grano, f) Crecimiento anormal de grano [19].

2.11 Metodología de superficie de respuesta

La metodología de superficie de respuesta (RSM por sus siglas en inglés: Response Surface Methodology) es un conjunto de técnicas matemáticas introducidas por G. E. P. Box y K.B. Wilson en 1951; son utilizadas para modelar problemas en los que una variable es influida por otras. El objetivo es optimizar la variable de interés mediante la determinación de las mejores condiciones de operación del sistema mediante un análisis estadístico [3].

En la metodología de superficie de respuesta se conoce como factores a las condiciones del proceso, ya sean cualitativas o cuantitativas que influyen la variable de respuesta la cual es una cantidad medible. La función de respuesta es una cantidad Y que se puede representar mediante un polinomio que depende de los niveles de x_1, x_2, \dots, x_k de k factores $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$, es decir, existe una función matemática de x_1, x_2, \dots, x_k cuyo valor para una combinación dada de los niveles de los factores corresponde a Y , esto es $Y=f(x_1, x_2, \dots, x_k)$.

La relación $Y=f(x_1, x_2, \dots, x_k)$ entre Y y los niveles de los k factores $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ representan una superficie. Con k factores la superficie esta en $k+1$ dimensiones, por ejemplo: cuando se tiene $Y=f(x_1)$ la superficie está en dos dimensiones, mientras que si se tiene $Y=f(x_1, x_2)$ se tendrá una superficie de respuesta en tres dimensiones [20].

Para visualizar de manera gráfica la forma de una superficie de respuesta en tres dimensiones son muy útiles las gráficas de contornos, donde las curvas de los valores iguales de respuesta se grafican en un plano donde los ejes coordenados representan los niveles de factores. Cada curva representa un valor específico en la altura de la superficie, es decir, un valor específico de Y [20].

La representación matemática de los modelos de metodología de las superficies de respuestas puede ser de tipo lineal sin iteraciones o producto cruzado, lineal con iteraciones, o también, de segundo grado. Los modelos polinomiales se utilizan como una aproximación a la función de respuesta real, y generalmente son buenas aproximaciones cuando son pequeñas zonas en las que operan los valores cuantitativos de las variables independientes [3].

Para los fines del presente trabajo fue necesario el uso de un modelo de segundo orden debido al comportamiento de algunas propiedades que no es posible modelar de manera lineal.

El modelo general de segundo orden es el siguiente:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{j=2}^k \sum_{i=1}^{j-1} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \epsilon$$

Donde los β_i son coeficientes de regresión para los términos de primer orden, los β_{ii} son coeficientes para los términos cuadráticos puros, los β_{ij} son coeficientes para los términos de producto cruz y ϵ es el término de error aleatorio.

Capítulo 3. Desarrollo experimental

Durante la preparación del presente trabajo se llevaron a cabo una serie de procesos con la finalidad de obtener las probetas que fueron sometidas a estudio, por lo que en este capítulo se explican brevemente cada uno de dichos procesos, los cuales son:

- Laminado
- Obtención de probetas de tracción
- Tratamiento térmico
- Ensayo de tracción
- Metalografía

Aunque la obtención de la aleación utilizada para la realización del presente trabajo no fue parte del desarrollo experimental ya que el lingote fue fundido en la planta de la empresa Clevite de México, vale la pena mencionar algunas consideraciones a seguir durante la obtención de la aleación SAE – 788.

Al preparar la carga para obtener la aleación SAE – 788 es recomendable precalentar la materia prima ya que esto ayuda a eliminar gases absorbidos y la humedad que se presenta en la superficie de los lingotes y del material de carga. En el caso de elementos aleantes con altos puntos de fusión, como el silicio o cobre, lo mejor es añadirlos en forma de aleación maestra de composición conocida ya que de esta manera se reducirá la temperatura de fusión y por ende el gasto de energía. En el caso específico del silicio el uso de aleaciones maestras es de gran ayuda ya que debido a la densidad de dicho elemento, éste tiende a flotar hacia la superficie y oxidarse.

3.1 Laminación de la aleación SAE-788

Con la finalidad de conocer la manera como se presenta el fenómeno de endurecimiento por trabajo en frío para esta aleación se aplicó un proceso de laminado a los lingotes.

En el proceso de laminación se utilizó una laminadora dúo reversible a una velocidad de 15.24 m/min (50 ft/min). Partiendo de planchones delgados cuyo espesor inicial fue de 6.6 mm se aplicaron reducciones de 10% por paso hasta llegar a la deformación deseada, es decir, a deformaciones de 3, 3.5 y 4.

La obtención de los espesores necesarios para lograr las deformaciones antes mencionadas se calculó utilizando la ecuación 3.1 que a continuación se muestra.

$$\epsilon_{VM} = 1.15 \left[\ln \left(\frac{h_0}{h_f} \right) \right] \quad (3.1)$$

La cual corresponde a deformaciones de Von Mises Donde h_0 y h_f son los espesores inicial y final respectivamente.

Los espesores finales para cada una de las deformaciones fueron los siguientes:

- $\epsilon=3$, $h_f=0.49$ mm
- $\epsilon=3.5$, $h_f=0.31$ mm
- $\epsilon=4$, $h_f=0.2$ mm

La secuencia seguida para el laminado fue la siguiente:

1. Medir el espesor inicial del lingote con ayuda de un calibrador digital.
2. Ajustar los rodillos al tamaño del lingote, es decir, pasar el lingote sin obtener reducción alguna.
3. Ajustar el equipo para obtener reducciones de 10% hasta lograr el espesor deseado.

Conforme se aplicaban más pasos de laminación, además de la reducción en el espesor se tenía un alargamiento de la pieza y muy poco ensanchamiento debido a los efectos de la fricción entre los rodillos y el material; como resultado de lo anterior las muestras presentaron grietas en las orillas, que se consideró material de desecho.

3.2 Maquinado de probetas de tracción

Después de la obtención de las deformaciones deseadas en cada una de las láminas, se retiró todo el material de desecho y con la ayuda de una cizalla y de tijeras se cortaron piezas rectangulares cuyas dimensiones fueron de dos centímetros de ancho por once de largo, teniendo especial cuidado en no mezclar las láminas.

Con la finalidad de obtener la mayor precisión posible en las dimensiones de las probetas, se utilizó una fresa de control numérico que por sus características provee gran precisión dimensional.

Es importante mencionar que por el número de probetas que se utilizaron fue necesario reducir a la mitad el tamaño de las mismas ya que no se contaba con el material suficiente para obtener probetas del tamaño establecido por la norma [21].

A continuación se muestra la imagen de una probeta de tracción, haciendo énfasis en las partes que la componen y en sus dimensiones para el tamaño reducido.

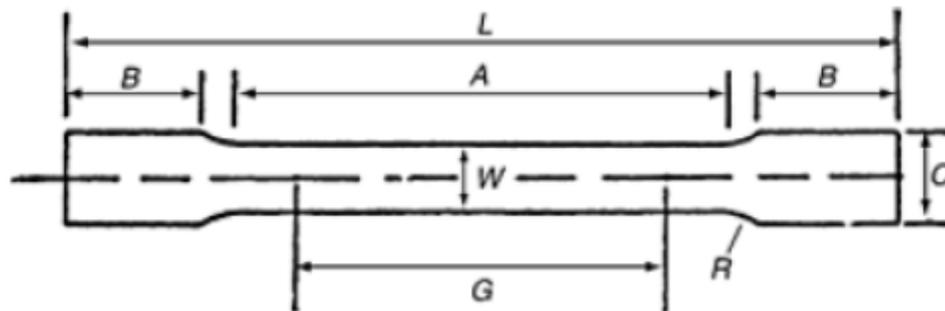


Imagen 3.1. Esquema de una probeta de tracción [22].

Denominación	Significado	Dimensiones [mm]
L	Longitud total	100
B	Longitud de la zona de agarre	15 c/u
A	Distancia entre zonas de agarre	32
G	Longitud de la zona de prueba	25
W	Ancho de la zona de prueba	6
C	Ancho de la zona de agarre	10
R	Radio	5

3.3 Tratamiento térmico

El tratamiento térmico aplicado a las probetas de tracción previamente laminadas fue un recocido a diferentes temperaturas y tiempos para cada una de las deformaciones, lo anterior basado en experimentación previa donde se han observado efectos en la microestructura del material.

La tabla 3.1 muestra la deformación, tiempo y temperatura a la que se aplicó el recocido.

ϵ	T[°C]	t[minutos]
3	200	10
		30
		60
	300	10
		30
		60
	400	10
		30
		60
3.5	200	10
		30
		60
	300	10
		30
		60
	400	10
		30
		60
4	200	10
		30
		60
	300	10
		30
		60
	400	10
		30
		60

Tabla 3.1. Tiempo de tratamiento térmico para cada probeta.

Por cada deformación se aplicaron recocidos a 200°C, 300°C y 400°C, así mismo para cada una de las temperaturas de recocido se tuvieron tres intervalos de tiempo, los cuales fueron; 10, 30 y 60 minutos.

Cabe destacar que por cada tiempo de recocido se tuvieron dos probetas de tracción, lo que da un total de 54 probetas a las que se les aplicó el tratamiento térmico.

3.4 Ensayos de tracción

Parte fundamental del presente trabajo de investigación son los ensayos de tracción, ya que gracias a ellos es posible conocer los parámetros en la metodología de superficie de respuesta y su relación con cada una de las deformaciones y tratamientos térmicos aplicados.

Las probetas fueron ensayadas en una máquina para pruebas universal marca Instron modelo 4206, con una celda de carga de 15kN a una velocidad de 5 mm/min. Como ya se mencionó, la geometría de las probetas y las características del ensayo se realizaron de acuerdo a la norma ASTM E8M-00.

3.5 Metalografía

Uno de los principios básicos de la metalurgia es que la relación entre propiedades y microestructura es única y la optimización de las propiedades de una aleación se lleva a cabo a través del control de la microestructura. Por lo tanto, la caracterización metalográfica y su relación con el comportamiento de la aleación es una tarea importante para la comprensión del comportamiento mecánico y químico de las aleaciones tribológicas, como la estudiada en el presente trabajo [1].

Para la caracterización de las microestructuras se utilizó microscopía electrónica de barrido. Se obtuvieron cuatro imágenes por cada probeta de tracción, de las cuales dos fueron a 800X y dos a 1600X, esto con la finalidad de observar el comportamiento microestructural del material ante las deformaciones y el tratamiento térmico aplicados, así como para identificar las diversas fases que se encuentran en la microestructura.

Capítulo 4. Resultados

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de tracción, microscopía y análisis mediante el método de superficie de respuesta. Para lograr un correcto manejo de los datos obtenidos en laboratorio se han utilizado dos programas de cómputo: *Microsoft Excel*[®] y *Mathematica*[®], con la finalidad de presentar adecuadamente los resultados y con ello facilitar su interpretación. Las propiedades mecánicas que se han tomado en cuenta para la aplicación del método de superficies de respuesta son las siguientes:

- Esfuerzo máximo (σ_{\max})
- Deformación máxima (ϵ_{\max})
- Esfuerzo de cedencia ($\sigma_{0.2}$)
- Deformación homogénea (ϵ_{hom})
- Tenacidad

En la primera parte de este capítulo se muestran los valores obtenidos para cada una de las propiedades mecánicas antes mencionadas, así como las gráficas esfuerzo–deformación y las imágenes obtenidas con el microscopio electrónico de barrido. En la segunda parte se presenta un análisis de los datos, así como sus gráficas en tres dimensiones, utilizando el método de superficies de respuesta. En la tercera parte se presentan las propiedades mecánicas maximizadas.

Cabe destacar que el valor de las deformaciones se ha calculado según Von Mises; la expresión utilizada es: $\epsilon = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln\left(\frac{h_0}{h_f}\right)$ donde h_0 y h_f son los espesores iniciales y finales respectivamente de cada muestra sometida a reducción mediante laminado.

4.1. Propiedades mecánicas, Microestructuras y Curvas esfuerzo–deformación

A continuación se presentan las tablas donde se muestran los valores obtenidos para cada una de las propiedades separadas por deformación y temperaturas de recocido; de igual forma se muestran las micrografías y las curvas esfuerzo-deformación.

Es importante mencionar que el material que no fue sometido a tratamiento térmico se compara con el que fue recocido a 200°C porque se ha considerado que la diferencia

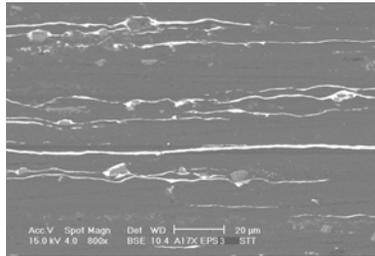
entre ambos no debe ser muy significativa, sobre todo porque el estaño, que es el segundo elemento en cantidad dentro de la aleación, funde por encima de dicha temperatura.

4.1.1 Deformación 3 ($\epsilon=3$) Sin tratamiento térmico

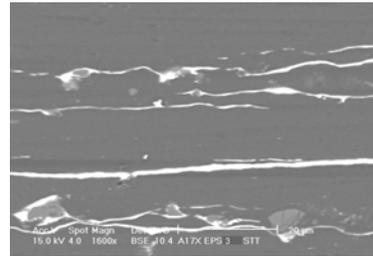
t [min]	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max}	$\sigma_{0.2}$ [MPa]	ϵ_{hom}	Tenacidad [MJ/m ³]
STT	229.43	0.00954	220.82	0.00954	0.8017

Tabla 4.1. Resultados para probetas $\epsilon = 3$ sin tratamiento térmico.

En la micrografía a 800X se pueden observar listones de estaño cuya trayectoria se ve modificada por la presencia de intermetálicos; a 1600X se observan con mayor claridad las partículas intermetálicas (imagen 4.1).

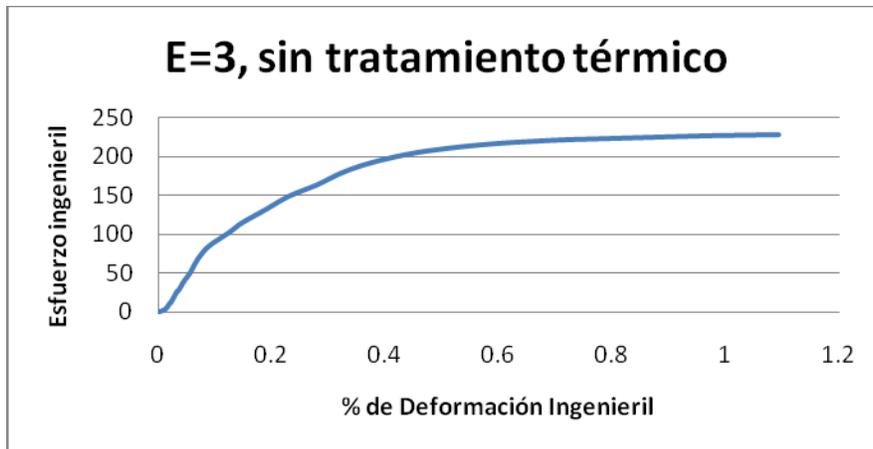


a) 800X



b) 1600X

Imagen 4.1. Microestructuras de las probetas con $\epsilon=3$ sin tratamiento térmico.



Gráfica 4.1. Esfuerzo-Deformación $\epsilon=3$. STT.

4.1.2 Deformación 3 ($\epsilon=3$) Recocido a 200°C

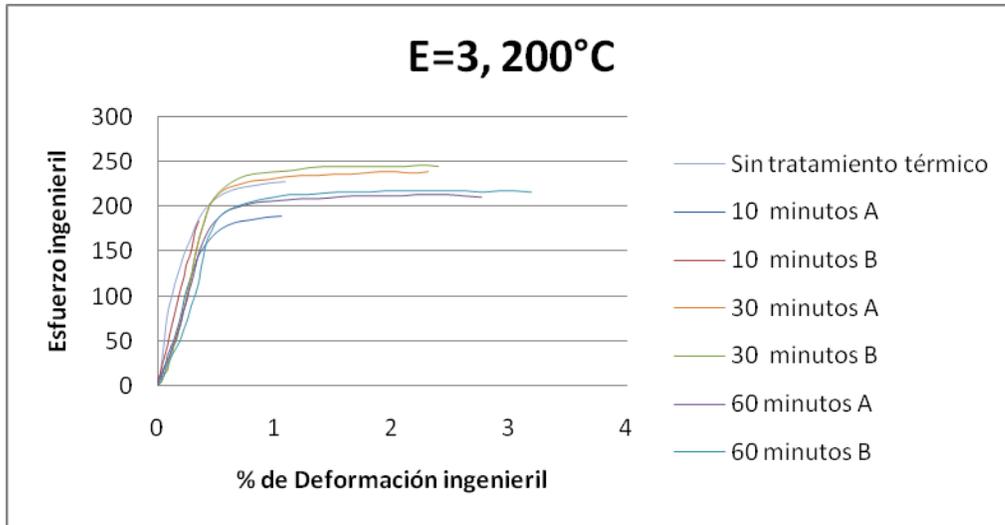
Se esperaría que los valores de esfuerzo (máximo y de cedencia) fueran mayores en las probetas donde no se aplicó tratamiento térmico ya que solamente han sido sometidas a un proceso de endurecimiento por trabajo en frío. Sin embargo, en las tablas 4.1 y 4.2 se puede apreciar que tanto el esfuerzo de cedencia como el esfuerzo máximo presentan valores mayores en las probetas cuyo tiempo de recocido fue de 30 minutos, una explicación para estos resultados puede ser el fenómeno de envejecimiento que es común en las aleaciones Al-Si.

En lo relativo a la deformación se han obtenido los resultados esperados, siendo esta **mayor** en las probetas que se sometieron a 60 minutos de recocido, mientras que las probetas sometidas a 10 minutos tuvieron el menor valor de deformación. Entre las probetas que fueron recocidas durante 10 minutos se puede observar una marcada diferencia en los valores de deformación máxima y tenacidad que se puede atribuir a la aglomeración de fase intermetálica en una zona específica de la probeta y que generó una menor deformación (tabla 4.2).

t [min]	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max}	$\sigma_{0.2}$ [MPa]	ϵ_{hom}	Tenacidad [MJ/m ³]
10	188.84	0.0143	164.52	0.0092	2.0106
10	183.79	0.0083	183.79	0.0031	0.9118
30	239.22	0.0244	205.67	0.0230	5.7580
30	246.90	0.0297	216.22	0.0225	6.1773
60	213.66	0.0325	181.458	0.0233	5.8517
60	217.33	0.0390	172.11	0.0290	7.4240

Tabla 4.2. Resultados para el recocido a 200°C con $\epsilon = 3$.

Lo expuesto anteriormente también es posible apreciarlo en la gráfica esfuerzo–deformación (gráfica 4.2).



Gráfica 4.2. Esfuerzo-deformación $\epsilon=3$. Recocido a 200°C.

Microestructuralmente no se aprecian cambios significativos entre las probetas con diferentes tiempos de recocido y las que no fueron sometidas a tratamiento térmico, aunque es posible ver que los listones en las probetas que no fueron recocidas son ligeramente más gruesos, esto porque la temperatura de recocido fue menor a la temperatura de fusión del estaño (imagen 4.2). Sin embargo, basados en los valores de deformación se puede asumir que el recocido afectó las propiedades mecánicas del material.

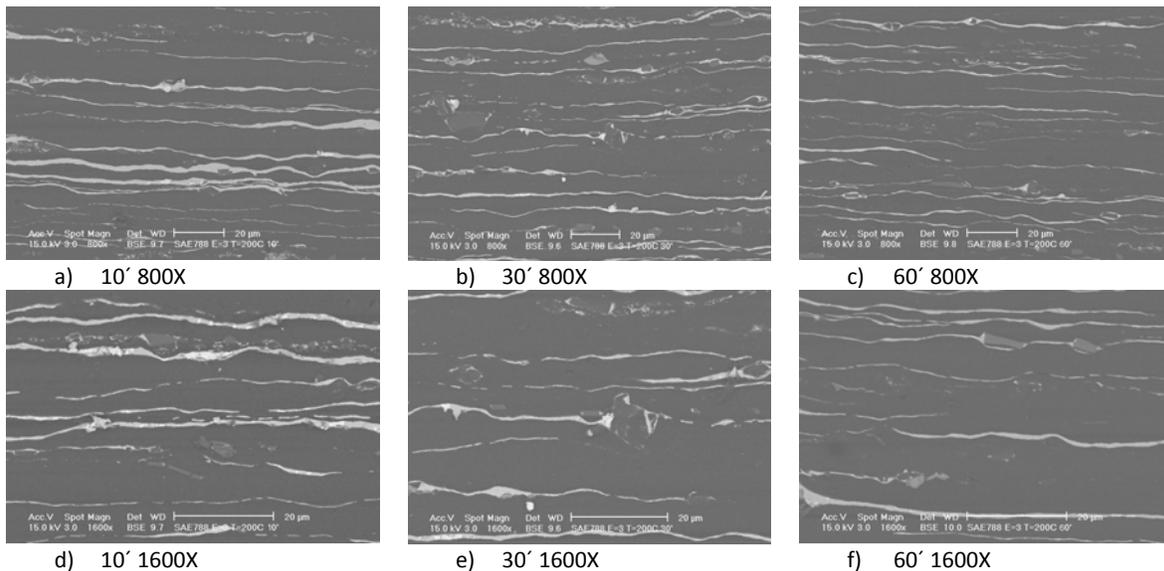


Imagen 4.2. Microestructuras de las probetas con $\epsilon=3$ recocidas a 200°C.

4.1.3 Deformación 3 ($\epsilon=3$) Recocido a 300°C

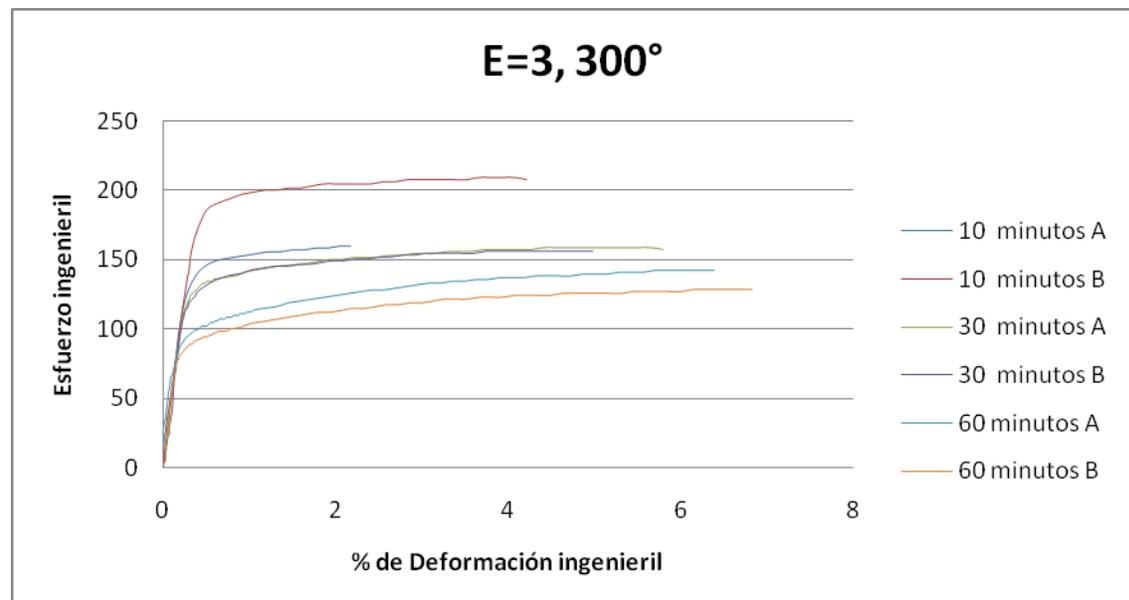
En lo relativo a las probetas que se les aplicó una deformación de $\epsilon = 3$ y se recocieron a 300°C se puede observar tanto en la tabla 4.3 como en la gráfica 4.3 que el mayor esfuerzo (máximo y de cedencia) lo presentaron los especímenes sometidos a 10 minutos de recocido, mientras que el menor lo tuvieron las probetas cuyo tiempo de recocido fue de 60 minutos.

La mayor deformación se presentó en las probetas que se recocieron durante 60 minutos, mientras que la menor la tuvieron las probetas sometidas a solamente 10 minutos de recocido.

Lo anterior concuerda perfectamente con lo esperado.

t [min]	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max}	$\sigma_{0.2}$ [MPa]	ϵ_{hom}	Tenacidad [MJ/m ³]
10	159.60	0.0295	142.17	0.0203	3.9613
10	209.13	0.0493	175.54	0.0393	9.0046
30	158.39	0.0658	128.42	0.0551	9.4003
30	155.64	0.0595	123.44	0.0484	8.0814
60	142.03	0.0776	98.13	0.0625	9.1871
60	128.54	0.0782	88.88	0.0668	9.0246

Tabla 4.3. Resultados para el recocido a 300°C con $\epsilon = 3$.



Gráfica 4.3. Esfuerzo-deformación con $\epsilon=3$. Recocido a 300°C.

De igual forma que en el recocido a 200°C, no es posible apreciar grandes cambios en la microestructura de las diferentes probetas. Sin embargo, las muestras cuyo tiempo de recocido fueron de 30 y 60 minutos presentan ligeros cambios microestructurales ya que es posible observar la fragmentación de los listones de estaño, siendo estos cambios más marcados en las probetas sometidas a 60 minutos de recocido (imagen 4.3).

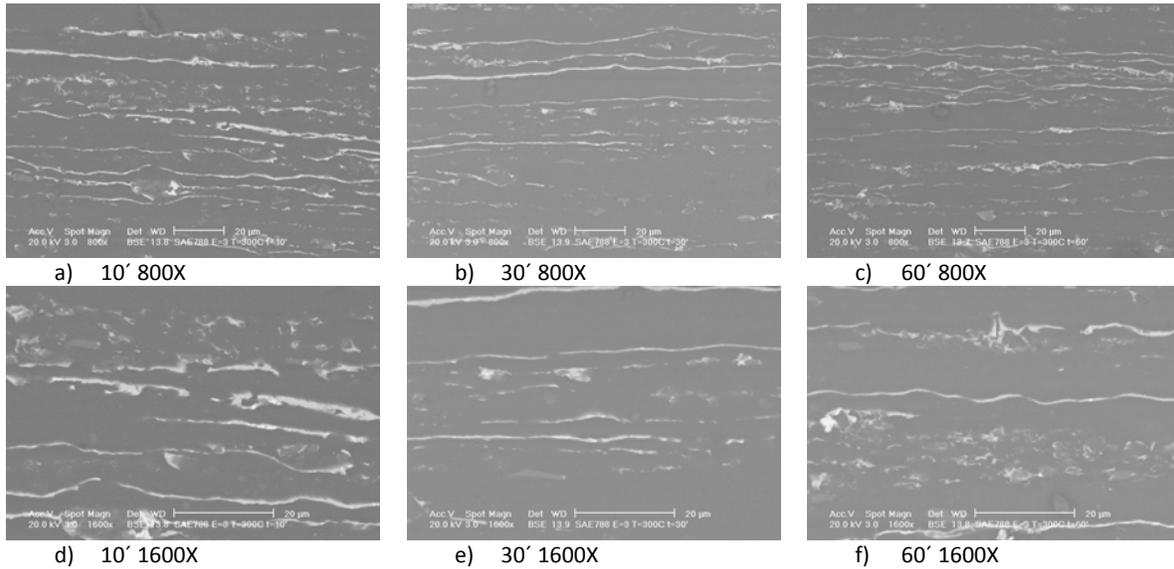


Imagen 4.3. Microestructuras de las probetas con $\epsilon=3$ recocidas a 300°C.

4.1.4 Deformación 3 ($\epsilon=3$) Recocido a 400°C

A continuación se presenta la tabla 4.4 y la imagen 4.4 donde se muestran los valores de las propiedades mecánicas obtenidas para las probetas que tuvieron una deformación $\epsilon=3$ y una temperatura de recocido de 400°C.

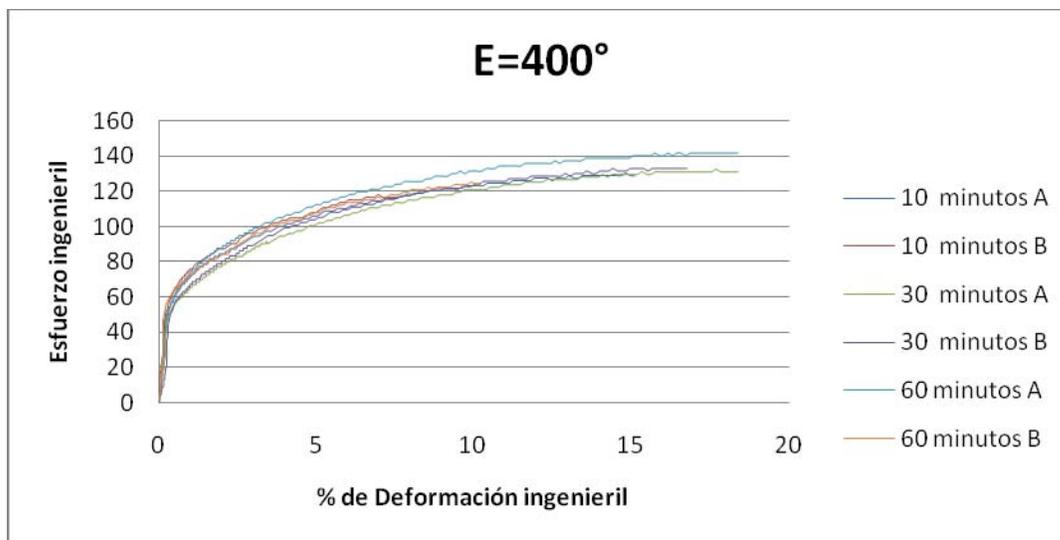
t [min]	σ_{max} [MPa]	ϵ_{max}	$\sigma_{0.2}$ [MPa]	ϵ_{hom}	Tenacidad [MJ/m³]
10	130.18	0.1649	50.07	0.1480	17.6180
10	118.15	0.0913	52.51	0.0739	8.3843
30	132.73	0.1972	39.38	0.1827	22.1666
30	132.95	0.1849	36.52	0.1664	20.1280
60	141.95	0.1941	49.75	0.1824	24.0666
60	125.44	0.1274	56.88	0.0992	12.4700

Tabla 4.4. Resultados para el recocido a 400°C con $\epsilon = 3$.

En el caso de estas probetas los valores de esfuerzo obtenidos no muestran diferencias significativas, salvo en el valor de la deformación entre las probetas recocidas durante 10 minutos donde nuevamente se puede atribuir la diferencia a la aglomeración de partículas de fase intermetálica en una zona específica de la probeta; lo anterior se puede apreciar mejor en la gráfica 4.4.

Se esperaría que de igual forma que en los tratamientos térmicos a 200°C y 300°C los valores más elevados de deformación se presentarían en las probetas con mayor tiempo de recocido. Sin embargo, es posible observar que en general los valores de deformación son muy similares para todas las probetas, y aunque en las recocidas durante 30 y 60 minutos aumenta el valor de la deformación, esta diferencia no es significativa.

Cabe destacar que a esta temperatura de recocido se pueden observar pequeños “escalones” durante la zona plástica de la deformación, los cuales son atribuibles a la dispersión de partículas que actúan como barreras durante el deslizamiento de las dislocaciones.



Gráfica 4.4. Esfuerzo-deformación para $\epsilon=3$. Recocido a 400°.

Debido a la mayor temperatura de recocido que se aplicó a estas probetas es posible observar una recristalización prácticamente completa en las sometidas a tratamiento térmico durante 60 minutos, situación que no se observa a 300°C. Sin embargo, todavía se observan algunos listones generados durante el proceso de laminado. La microestructura de las probetas con 30 minutos de recocido es muy similar a las de 60 minutos, mientras que las recocidas durante diez minutos no presentan gran diferencia con respecto a las anteriores temperaturas (200°C y 300°C) pero es posible observar que se comienzan a

presentar efectos provocados por el tratamiento térmico tales como la fragmentación de los listones de estaño (imagen 4.4).

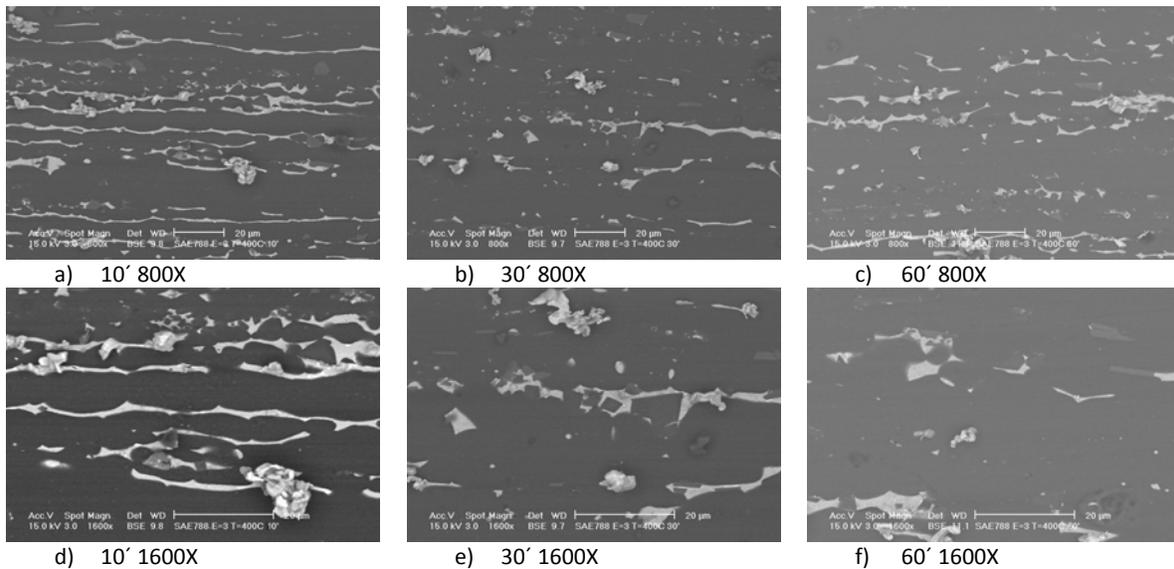


Imagen 4.4. Microestructuras de las probetas con $\epsilon=3$ recocidas a 400°C.

4.1.5 Deformación 3.5 ($\epsilon=3.5$) Sin tratamiento térmico

Propiedades de las probetas sin tratamiento térmico:

t [min]	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max}	$\sigma_{0.2}$ [MPa]	ϵ_{hom}	Tenacidad [MJ/m ³]
STT	230.94	0.0061	217.61	0.0053	0.5007

Tabla 4.5. Resultados para probetas $\epsilon = 3.5$ sin tratamiento térmico.

En las micrografías del material que no fue sometido a tratamiento térmico es posible observar gruesos listones de estaño producto del proceso de laminado, además de partículas de fase intermetálica las cuales se pueden apreciar mejor en la imagen a 1600X

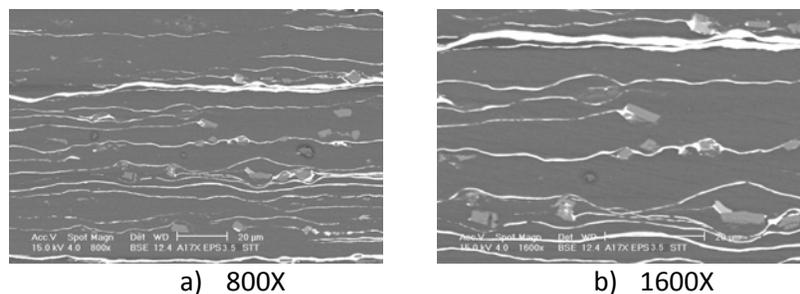
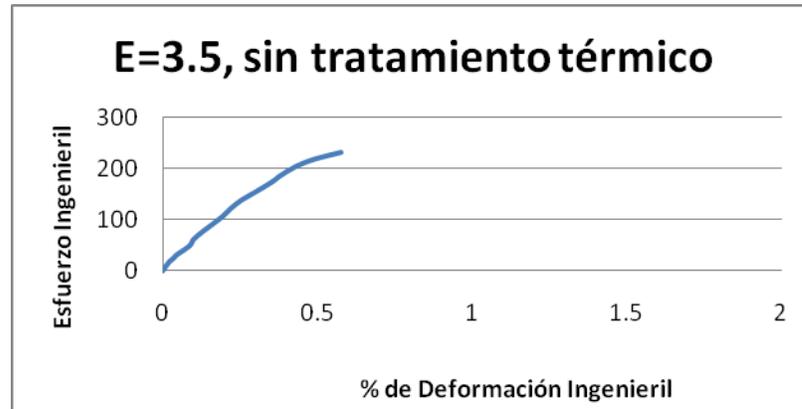


Imagen 4.5. Microestructuras de las probetas con $\epsilon=3.5$ sin tratamiento térmico.

En la curva esfuerzo–deformación se aprecia que el material sin tratamiento térmico prácticamente no se deformó plásticamente (gráfica 4.5).



Gráfica 4.5. Esfuerzo - Deformación para deformación 3.5 STT.

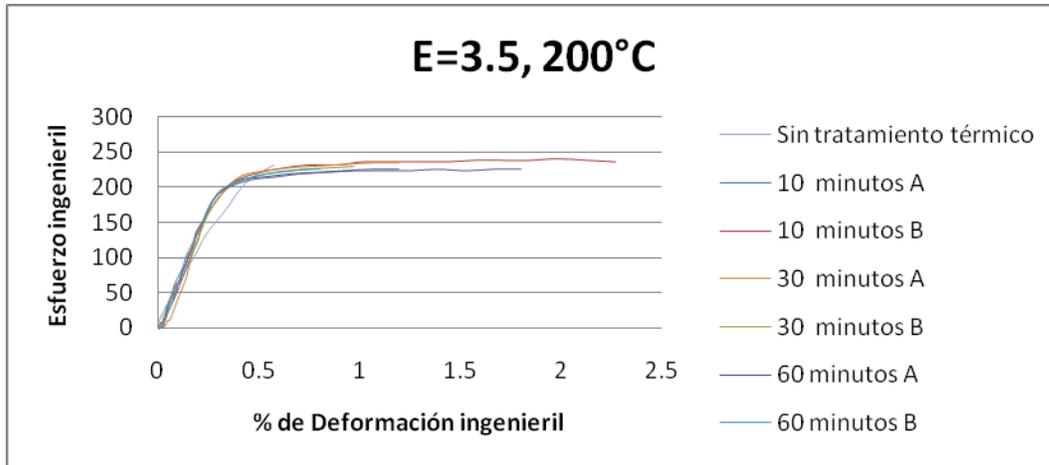
4.1.6 Deformación 3.5 ($\epsilon=3.5$) Recocido a 200°C

A continuación se presentan los resultados obtenidos para las probetas que se les aplicó una deformación de $\epsilon=3.5$ y que fueron recocidas a 200°C (tabla 4.6).

t [min]	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max}	$\sigma_{0.2}$ [MPa]	ϵ_{hom}	Tenacidad [MJ/m ³]
10	225.33	0.0154	214.59	0.0105	3.0605
10	240.67	0.0343	220.98	0.0197	5.7261
30	234.11	0.0191	223.17	0.0105	3.2812
30	230.11	0.0166	214.77	0.0084	2.7573
60	226.09	0.0215	210.73	0.0166	4.5270
60	225.36	0.0124	218.79	0.0066	2.1860

Tabla 4.6. Resultados para el recocido a 200°C con $\epsilon = 3.5$.

Como se ha podido apreciar en la tabla 4.6 y en la gráfica 4.6 los valores de resistencia y de deformación no presentan diferencias significativas. Sin embargo, en la curva esfuerzo–deformación se aprecia que la deformación plástica es mucho mayor con respecto al material que no fue recocido (gráfica 4.6).



Gráfica 4.6. Esfuerzo-deformación para $\epsilon=3.5$. Recocido a 200°C .

Microestructuralmente se puede observar que en las probetas sin tratamiento térmico y en las recocidas durante diez minutos se tienen listones que son producto del proceso de laminado; dichos listones también se presentan en las microestructuras de las probetas sometidas a 30 y 60 minutos, pero con discontinuidades. Cabe destacar que los listones en las probetas que no fueron sometidas a tratamiento térmico son ligeramente más delgados que en el resto (imagen 4.6).

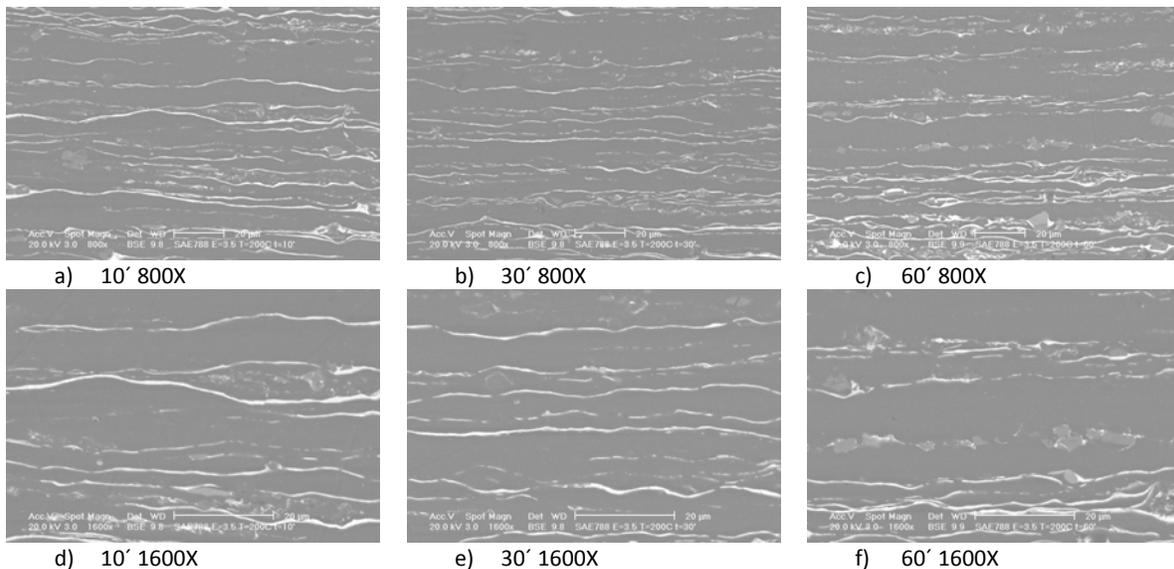


Imagen 4.6. Microestructuras de las probetas con $\epsilon=3.5$ recocidas a 200°C .

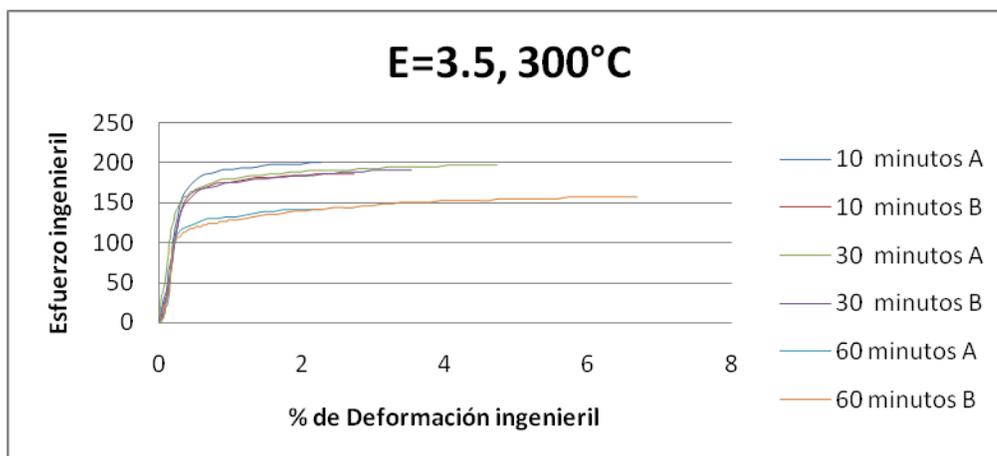
4.1.7 Deformación 3.5 ($\epsilon=3.5$) Recocido a 300°C

De igual forma que en los resultados anteriores ($\epsilon=3.5$ recocido a 200°C) se puede observar el efecto de la deformación plástica y del tratamiento térmico en la resistencia del material, ya que los mayores valores se presentan en las probetas que fueron recocidas durante diez minutos y treinta minutos, disminuyendo substancialmente para las probetas sometidas a 60 minutos (tabla 4.7).

t [min]	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max}	$\sigma_{0.2}$ [MPa]	ϵ_{hom}	Tenacidad [MJ/m ³]
10	199.57	0.0326	167.38	0.0211	5.3259
10	185.97	0.0360	157.53	0.0259	5.6870
30	196.91	0.0560	161.90	0.0459	10.045
30	190.66	0.0474	159.98	0.0339	7.6682
60	140.49	0.0346	116.33	0.0215	3.8196
60	157.53	0.0820	113.77	0.0655	11.2283

Tabla 4.7. Resultados para el recocido a 300°C con $\epsilon = 3.5$.

En lo relativo a la deformación se observa que el valor mayor corresponde a una probeta recocida durante 60 minutos, lo cual deriva en un mayor valor de tenacidad, mientras que los valores menores los tienen las muestras que se recoció durante únicamente 10 minutos (gráfica 4.7).



Gráfica 4.7. Esfuerzo-deformación $\epsilon=3.5$. Recocido a 300°C.

En las microestructuras se observa que la recrystalización producto del tratamiento térmico comienza a darse desde las probetas tratadas durante 10 minutos, los efectos van aumentando hasta ser bastante marcados en las muestras recocidas durante 60 minutos. En estas últimas se puede apreciar una estructura casi totalmente recrystalizada (imagen 4.7).

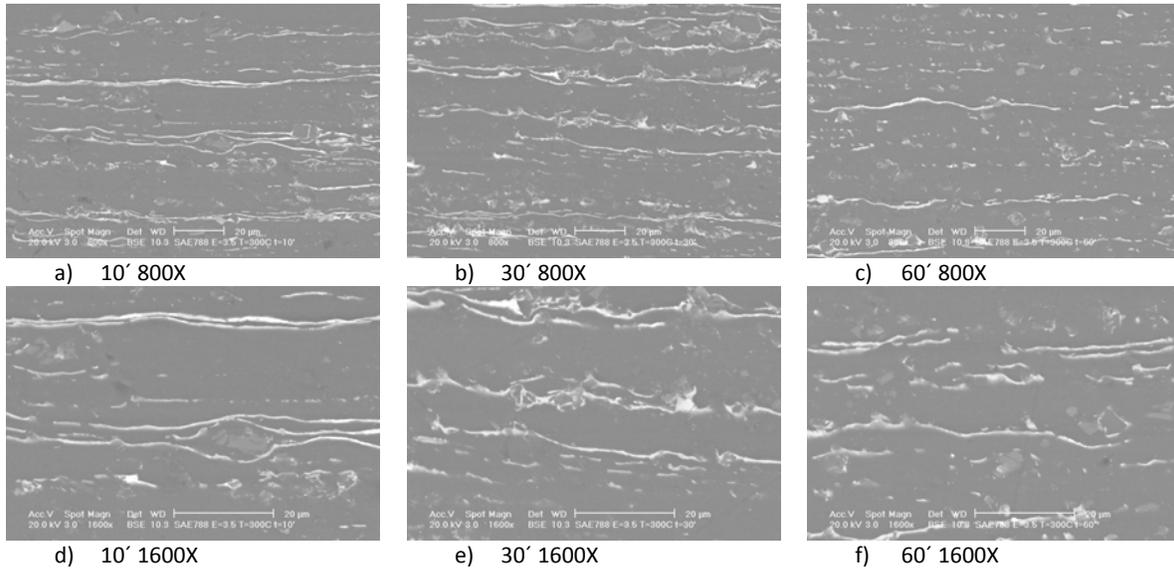


Imagen 4.7. Microestructuras de las probetas con $\epsilon=3.5$ recocidas a 300°C .

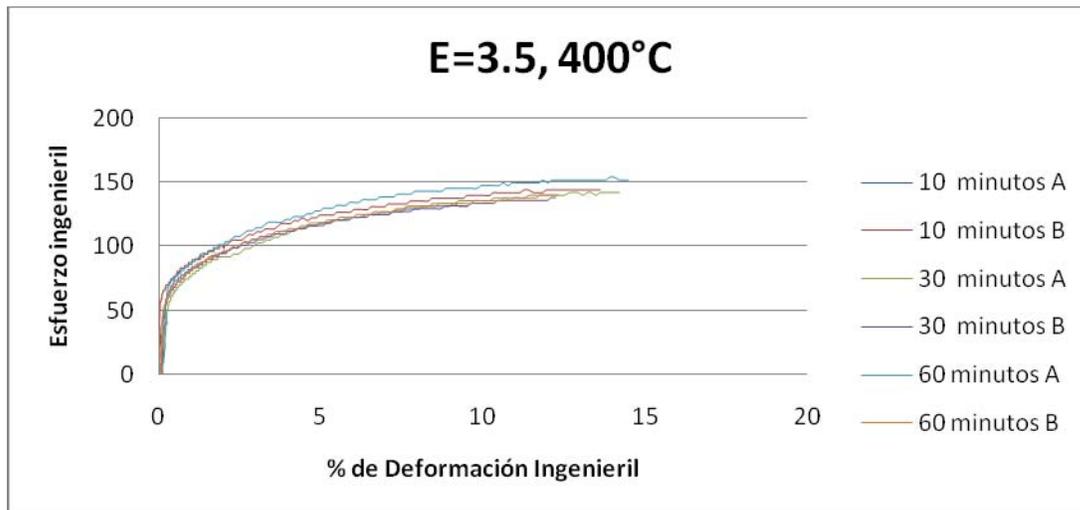
4.1.8 Deformación 3.5 ($\epsilon=3.5$) Recocido a 400°C

En el caso del material sometido a deformación $\epsilon=3.5$ y recocido a 400°C las propiedades mecánicas muestran valores bastante dispersos pero muy similares por lo que no es posible mencionar en qué caso se tuvo un valor de resistencia o deformación mayor. Lo anterior puede atribuirse a que al aplicar el tratamiento térmico a una temperatura mayor se obtienen resultados más rápidamente, por lo que se puede concluir que la recrystalización está más ligada con la temperatura de recocido que con el tiempo al que se someten las probetas a dicho tratamiento térmico. Las variaciones que se presentan en la deformación de cada probeta derivan en un cambio en el valor de la tenacidad (tabla 4.8).

t [min]	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max}	$\sigma_{0.2}$ [MPa]	ϵ_{hom}	Tenacidad [MJ/m ³]
10	133.05	0.1185	62.23	0.0939	12.3147
10	144.40	0.1560	72.20	0.1349	18.8897
30	142.22	0.1421	56.89	0.1349	18.5156
30	138.07	0.1389	61.36	0.1212	15.3234
60	153.66	0.1601	68.05	0.1435	20.4870
60	140.03	0.1414	63.45	0.1217	16.8038

Tabla 4.8. Resultados para el recocido a 400°C con $\epsilon = 3.5$.

En la gráfica 4.8 se puede apreciar que las diferencias de valores para las propiedades mecánicas no son significativas. Sin embargo, cabe destacar que nuevamente se observan los “escalones” mencionados en la gráfica para la deformación $\epsilon=3$ con temperatura de recocido de 400°C. los cuales se presentan por obstáculos que tienen las dislocaciones durante la deformación plástica.



Gráfica 4.8. Esfuerzo-deformación $\epsilon=3.5$. Recocido a 400°C.

En las microestructuras se puede observar que se tuvieron granos recristalizados desde los 10 minutos de recocido ya que hay fragmentación de los listones de estaño; no se aprecia gran diferencia entre los diferentes tiempos. Es interesante observar que en todas las microestructuras se tiene una dirección preferencial que es la del laminado; también es posible apreciar que hay zonas donde se está dando la formación de nuevos granos, ya que el estaño comienza a delimitar los granos de aluminio (imagen 4.8).

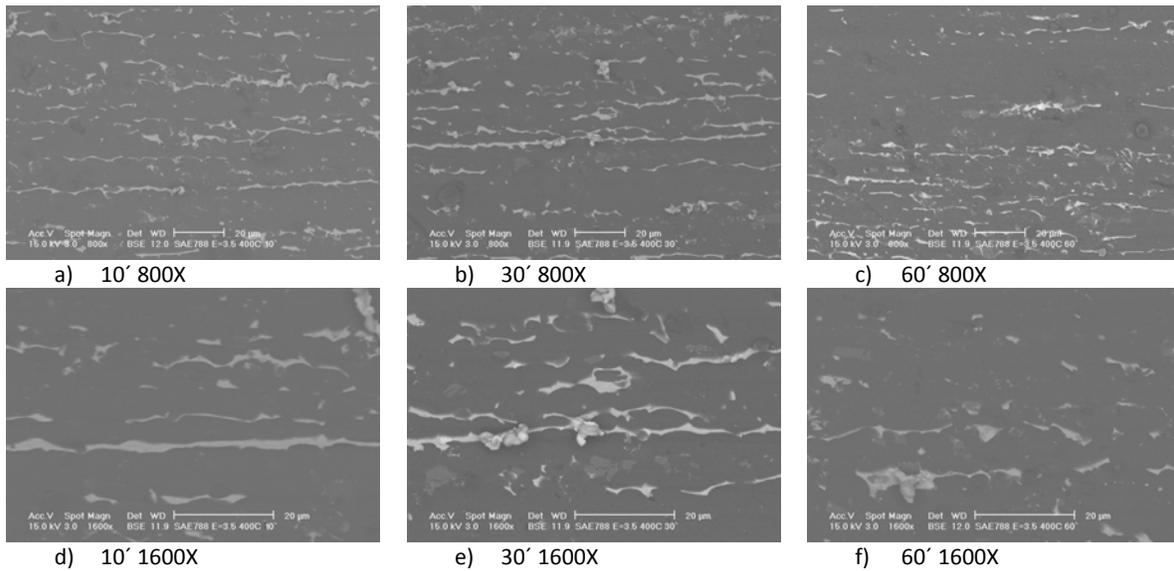


Imagen 4.8. Microestructuras de las probetas con $\epsilon=3.5$ recocidas a 400°C .

4.1.9 Deformación 4 ($\epsilon=4$) sin tratamiento térmico

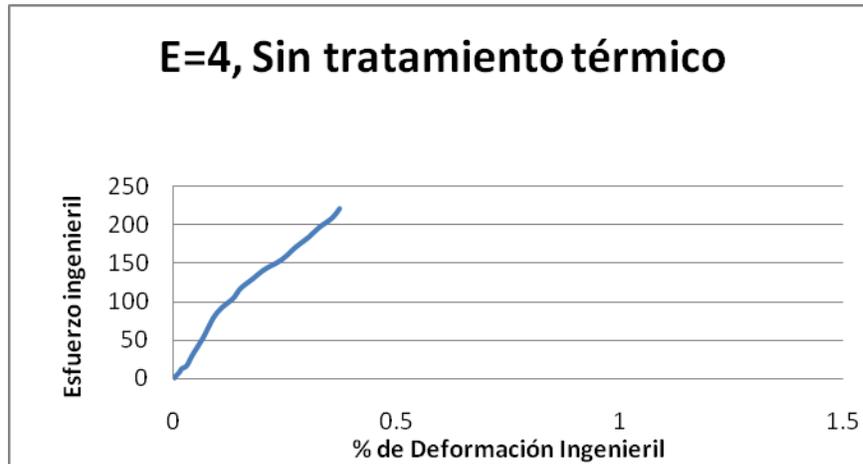
A continuación se presenta el último grupo de resultados el cual corresponde a la deformación $\epsilon=4$. Se comenzará con las probetas que no fueron sometidas a tratamiento térmico.

Propiedades de las probetas sin tratamiento térmico:

t [min]	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max}	$\sigma_{0.2}$ [MPa]	ϵ_{hom}	Tenacidad [MJ/m ³]
STT	221.77	0.0063	196.67	0.0052	0.6627

Tabla 4.9. Resultados para probetas $\epsilon = 4$ sin tratamiento térmico.

En la curva esfuerzo–deformación (gráfica 4.9) se aprecia la nula deformación plástica que sufrió la probeta que no se sometió a tratamiento térmico.



Gráfica 4.9. Esfuerzo-Deformación $\epsilon=4$. STT.

En la microestructura se pueden observar nuevamente listones de estaño pero más delgados respecto a las probetas correspondientes a menores deformaciones sin tratamiento térmico (imagen 4.9).

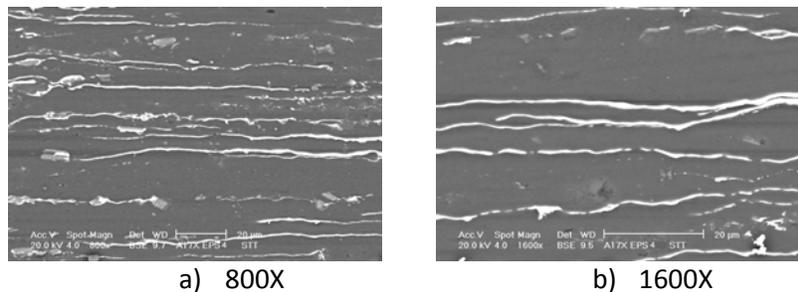


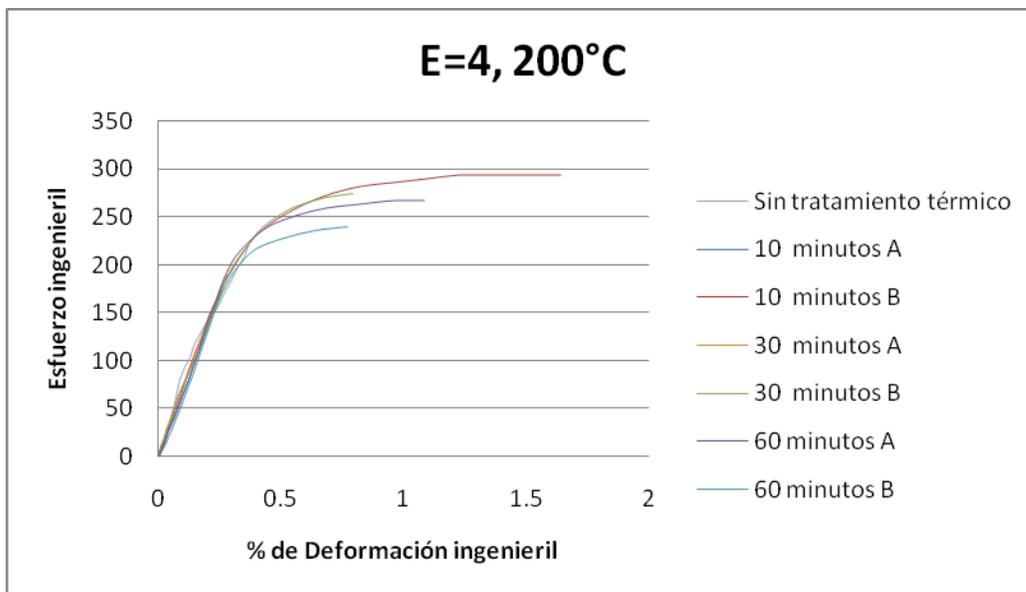
Imagen 4.9. Microestructuras de las probetas con $\epsilon=4$ sin tratamiento térmico.

4.1.10 Deformación 4 ($\epsilon=4$) Recocido a 200°C

Los valores de resistencia son nuevamente muy dispersos y distintos, esta situación es atribuible a la gran cantidad de intermetálicos que se presentan en esta aleación, los cuales se pueden aglomerar en ciertas partes de la probeta provocando cambios significativos en los valores obtenidos a partir del ensayo de tracción (tabla 4.10 y gráfica 4.10).

t [min]	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max}	$\sigma_{0.2}$ [MPa]	ϵ_{hom}	Tenacidad [MJ/m ³]
10	189.34	0.0028	177.98	0.0026	1.2375
10	293.44	0.0164	262.56	0.0150	4.5816
30	189.18	0.0028	189.18	0.0028	1.0842
30	274.58	0.0079	262.98	0.0068	2.7531
60	267.28	0.0108	251.78	0.0096	3.2008
60	239.39	0.0077	227.81	0.0064	2.0958

Tabla 4.10. Resultados para el recocido a 200°C con $\epsilon = 4$.



Gráfica 4.10. Esfuerzo-deformación para $\epsilon=4$. Recocido a 200°C.

Entre cada una de las microestructuras (incluyendo las que no fueron sometidas a recocido) no es posible observar diferencias significativas ya que la temperatura de recocido fue muy baja (imagen 4.10).

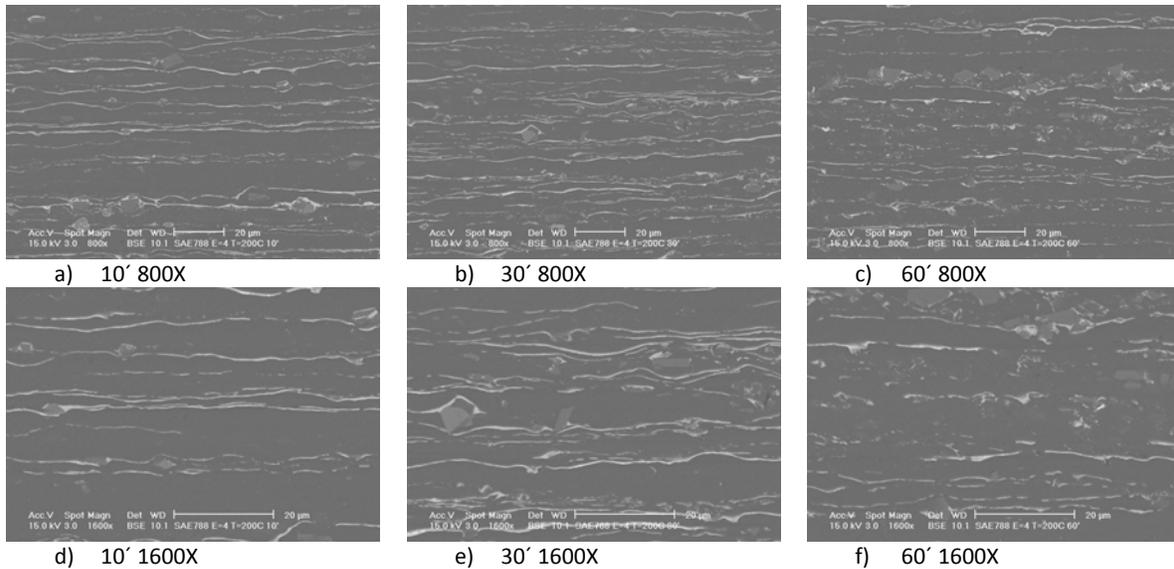


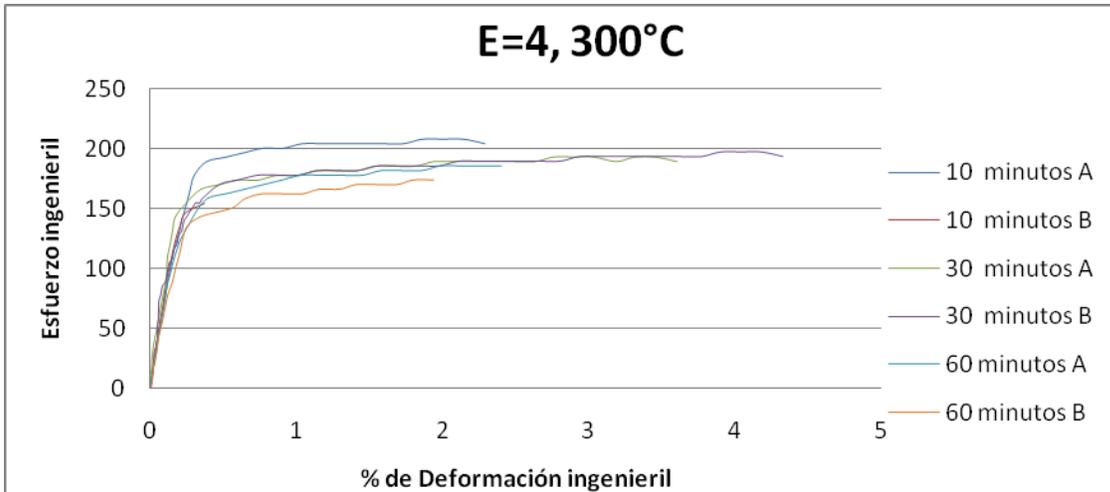
Imagen 4.10. Microestructuras de las probetas con $\epsilon=4$ recocidas a 200°C.

4.1.11 Deformación 4 ($\epsilon=4$) Recocido a 300°C

Se observan datos dispersos con diferencias no muy significativas a excepción de una probeta recocida durante 10 minutos la cual presenta valores menores en la resistencia y deformación que deriva en un menor valor de tenacidad, lo cual se puede atribuir a que debido al tamaño reducido de las probetas y su espesor la aglomeración de partículas intermetálicas provoca cambios significativos en las propiedades mecánicas (tabla 4.11 y gráfica 4.11).

t [min]	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max}	$\sigma_{0.2}$ [MPa]	ϵ_{hom}	Tenacidad [MJ/m³]
10	208.27	0.0228	193.13	0.0200	5.0895
10	154.44	0.0036	154.44	0.0023	1.0145
30	193.06	0.0360	169.89	0.0331	7.5219
30	197.23	0.0432	170.17	0.0403	8.8084
60	185.93	0.0240	158.82	0.0226	5.0400
60	173.74	0.0193	146.71	0.0179	4.7164

Tabla 4.11. Resultados para el recocido a 300°C con $\epsilon = 4$.



Gráfica 4.11. Esfuerzo-deformación para $\epsilon=4$. Recocido a 300°C.

En las micrografías es posible observar listones que se deforman cuando pasan cerca de un intermetálico; a 1600X es evidente que en todos los tiempos de recocido hay recristalización aunque más marcada para 60 minutos, lo cual concuerda con lo esperado (imagen 4.11).

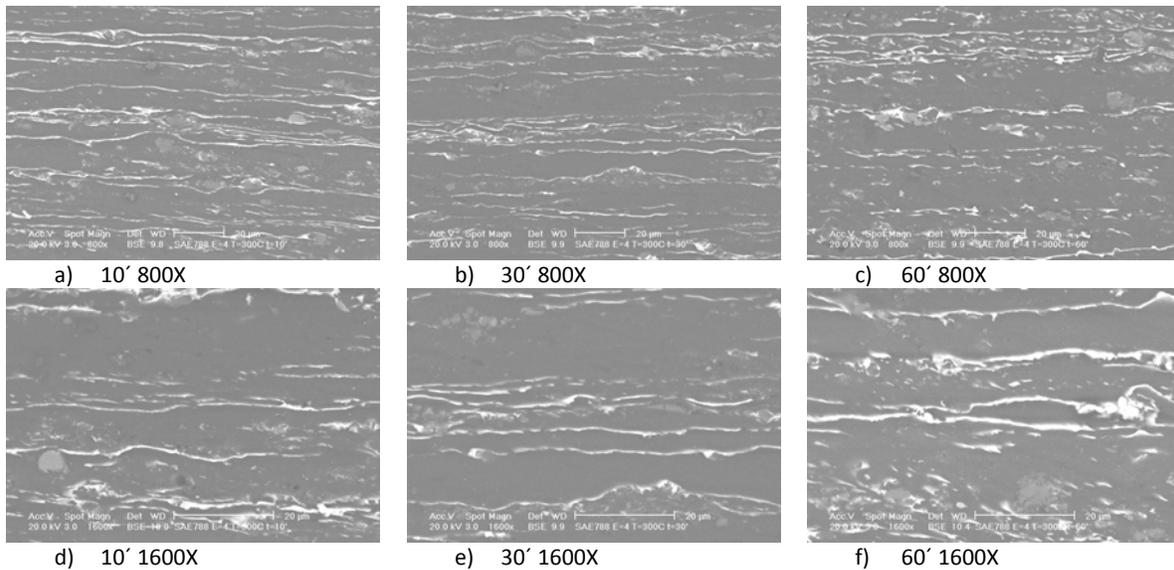


Imagen 4.11. Microestructuras de las probetas con $\epsilon=4$ recocidas a 300°C.

4.1.12 Deformación 4 ($\epsilon=4$) Recocido a 400°C

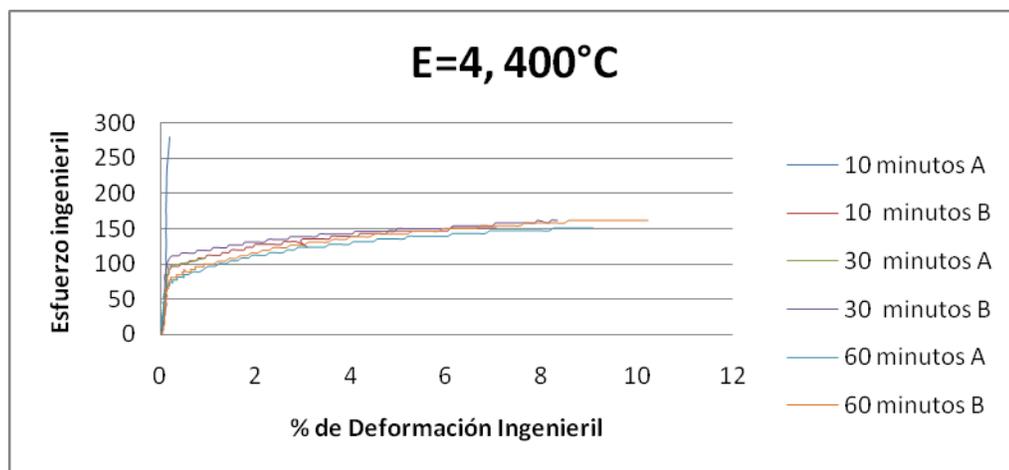
Finalmente se muestran en la tabla 4.12 y en la gráfica 4.12 los valores de las propiedades mecánicas que se obtuvieron para las muestras cuya deformación fue $\epsilon=4$ y que se sometieron a tratamiento térmico con temperatura de 400°C.

Los valores de esfuerzo máximo son muy similares para cuatro de las seis probetas ensayadas. Sin embargo para la primera con recocido durante 10 minutos se observa una resistencia muy superior al resto y a su vez la deformación fue mucho menor, mientras que en la primer probeta recocida durante 30 minutos se observa lo contrario. Esta situación se discutirá en el siguiente capítulo. En el caso de la primera probeta recocida durante 30 minutos ocurre lo contrario en términos de la resistencia. Sin embargo, el valor de la deformación es menor al del resto de probetas.

t [min]	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max}	$\sigma_{0.2}$ [MPa]	ϵ_{hom}	Tenacidad [MJ/m ³]
10	280.241828	0.00208555	34.0828203	0.00186915	1.79220587
10	150.583484	0.07048125	96.5330936	0.06909271	11.9075523
30	108.105047	0.00915175	100.384781	0.00915175	1.58129459
30	162.433214	0.0833022	112.152402	0.0819052	14.4408931
60	151.077634	0.09095097	77.4821976	0.08955397	14.0326296
60	162.168234	0.1022886	81.0841168	0.10090006	16.0802521

Tabla 4.12. Resultados para el recocido a 400°C con $\epsilon=4$.

Nuevamente es posible observar los “escalones” en la zona plástica de la curva esfuerzo deformación, los cuales son característicos en el recocido a 400°C.



Gráfica 4.12. Esfuerzo-deformación para $\epsilon=4$. Recocido a 400°C.

La microestructura observada en las micrografías cuyas probetas fueron recocidas durante 10 minutos muestra listones y el comienzo del proceso de recrystalización, esto debido a que por la temperatura y deformación aplicada el recocido tiene efecto más rápidamente. En las imágenes para 30 minutos se puede observar una estructura recrystalizada orientada, de igual forma que en las imágenes de las probetas recocidas durante 60 minutos, donde es aún más marcado el efecto del recocido.

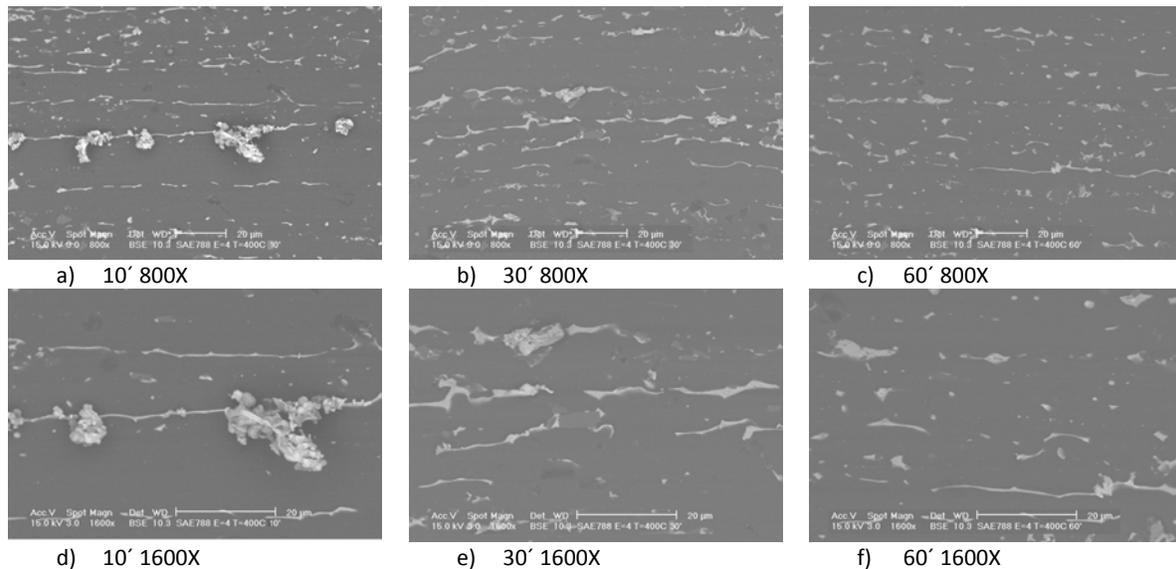


Imagen 4.12. Microestructuras de las probetas con $\epsilon=4$ recocidas a 400°C.

4.2 Superficie de respuesta para las propiedades mecánicas de la aleación SAE – 788

A continuación se muestran las gráficas en tres dimensiones de las propiedades mecánicas mostradas en la parte anterior del presente capítulo. Para la correcta interpretación de las gráficas es necesario aclarar que en cada uno de los parámetros del tratamiento termomecánico se ajustó el valor para que todos se encontraran en un intervalo cerrado de -1 a +1.

Para la temperatura de recocido se consideró un valor de -1 para 200°C y +1 para 400°C, de esta forma la temperatura de 300°C adoptó un valor de cero. En el caso del tiempo de recocido el valor de -1 le corresponde las probetas que no fueron sometidas a tratamiento térmico, mientras que +1 le corresponde a 60 minutos de recocido; 10 minutos adquiere un valor de -0.6666 (2/3) y 30 minutos es 0. La deformación de $\epsilon=3$ adquiere el valor de -1 y $\epsilon=4$ de +1, para $\epsilon=3.5$ se tiene un valor de 0.

A continuación se presentan las ecuaciones con las cuales es posible obtener el valor leído en la gráfica (subíndice g) a partir del valor real (subíndice real).

Para la temperatura:

$$T_g = \frac{T_{real} - 800}{100} \quad (4.1)$$

Donde T_g representa el valor de temperatura leído en la gráfica y T_{real} representa el valor de la temperatura en grados Celsius

Para el tiempo:

$$t_g = \frac{t_{real}}{30} - 1 \quad (4.2)$$

Para la deformación:

$$\epsilon_g = 2(\epsilon_{real} - 3.5) \quad (4.3)$$

Vale la pena aclarar que para cada una de las propiedades mecánicas se presentan tres gráficas, las cuales no representan superficies de respuesta separadas, sino secciones a una temperatura constante de una sola superficie definida en las tres dimensiones (ϵ , t , T) y que obedece a la ecuación que las describe en cada caso.

4.2.1 Deformación homogénea

En la superficie correspondiente a la temperatura de recocido de 200°C se puede observar que la deformación homogénea tiene un valor máximo ligeramente menor a 0.03 y se presenta a bajas deformaciones; en la gráfica para 300°C el rango de deformación homogénea es mayor, aunque no llega a 0.06, en contraste a lo que se puede observar en la gráfica para 400°C donde la deformación homogénea llega a presentar valores cercanos a 0.15.

En las tres superficies de respuesta es evidente que el parámetro que tomó mayor importancia para la obtención de los valores de deformación homogénea mostrados fue el tiempo de recocido ya que aunque la deformación influyó en el resultado no fue de manera muy significativa (imagen 4.13).

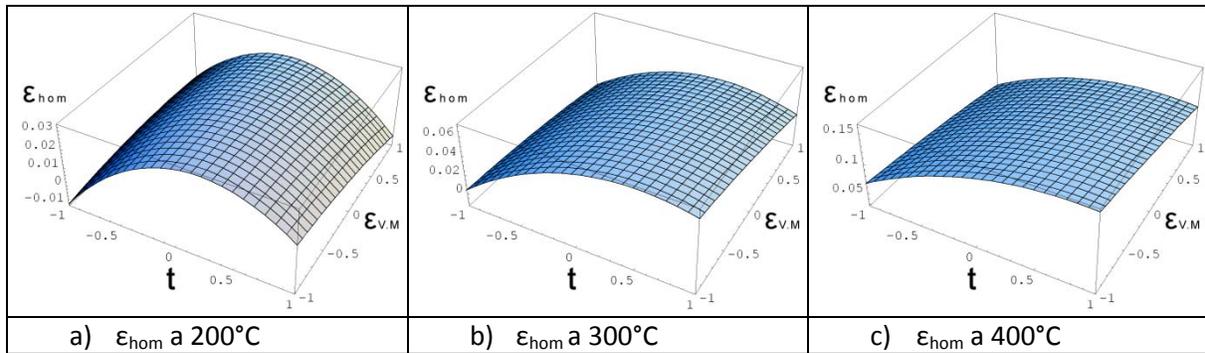


Imagen 4.13. Superficie de respuesta para deformación homogénea.

La ecuación que mejor describe el comportamiento mostrado en las gráficas para la deformación homogénea es la siguiente:

$$\epsilon_{\text{hom}} = 0.05 + 0.023t - 0.028t^2 + 0.045T + 0.016tT + 0.024T^2 - 0.014s - 0.006ts - 0.010Ts - 0.003s^2$$

(4.4)

4.2.2 Deformación máxima

La deformación máxima presenta un comportamiento muy similar a la deformación homogénea, incluso en los valores obtenidos. También es evidente que el tiempo de recocido influyó más que la deformación aplicada al material; esto se puede observar más claramente en la gráfica correspondiente a una temperatura de recocido de 200°C (imagen 4.14).

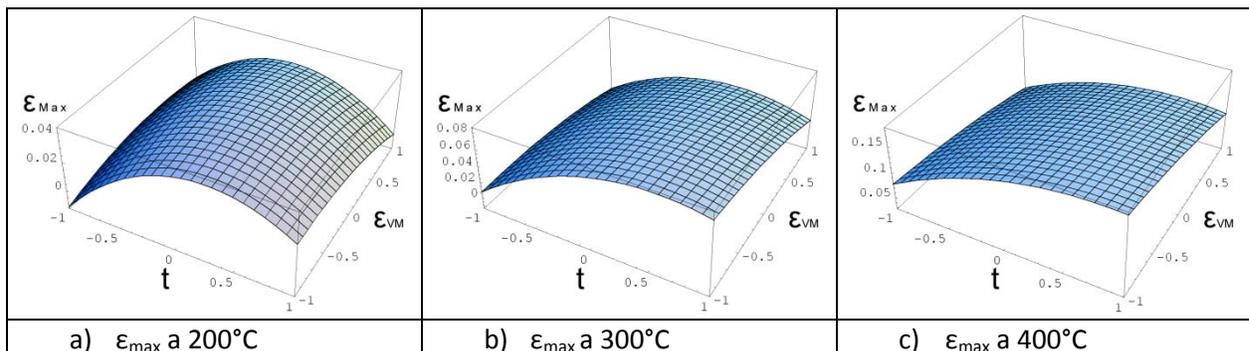


Imagen 4.14. Superficie de respuesta para deformación máxima.

La ecuación que mejor describe el comportamiento mostrado en las gráficas para la deformación máxima es la siguiente:

$$\sigma_{\max} = 0.633 + 0.026t - 0.031t^2 + 0.047T + 0.172tT + 0.025T^2 - 0.017s - 0.008ts - 0.013Ts - 0.007s^2$$

(4.5)

4.2.3 Esfuerzo máximo

En las tres gráficas de esfuerzo máximo (imagen 4.15) se obtiene un valor mayor cuando la deformación es $\varepsilon=4$ y no se aplicó recocido. Nuevamente el tiempo es el parámetro que más influye en el comportamiento de la superficie. Es interesante observar que en las gráficas para 300°C y 400°C el menor valor de esfuerzo máximo se presenta en el material que fue recocido durante una hora y que además se le aplicó una deformación de $\varepsilon=3$. En contraste, se tiene que en la gráfica para 200°C el menor valor de esfuerzo máximo se tiene cuando el tiempo de recocido es de 0.4 (42 minutos según la ecuación 4.2).

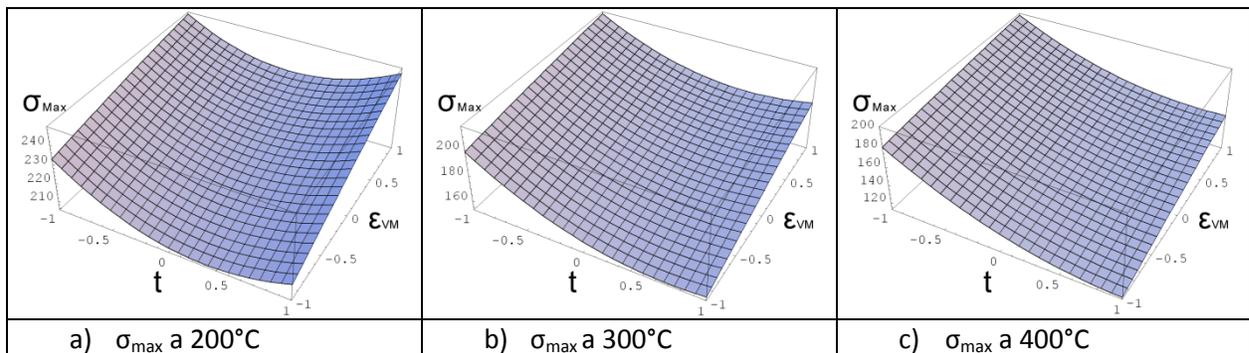


Imagen 4.15. Superficie de respuesta para esfuerzo máximo.

La ecuación que mejor describe el comportamiento mostrado en las gráficas para esfuerzo máximo es la siguiente:

$$\sigma_{\max} = 175.2 - 17.2t + 15.5t^2 - 36.8T - 12.03tT + 8.47T^2 + 12.9s + 4.31ts + 0.887s - 0.758s^2$$

(4.6)

4.2.4 Tenacidad

El valor de la tenacidad varía bastante entre las tres gráficas (imagen 4.16); mientras que en el material que se le aplicó un recocido a 200°C el valor máximo de esta propiedad no llega a 6 MJ/m³, en el que se recoció a 300°C casi llega a 10 MJ/m³ y en el de 400°C está cerca de 20 MJ/m³. De igual forma que en las propiedades anteriores, el tiempo fue el

parámetro más importante. Sin embargo, la diferencia que marcó la deformación aplicada es casi imperceptible.

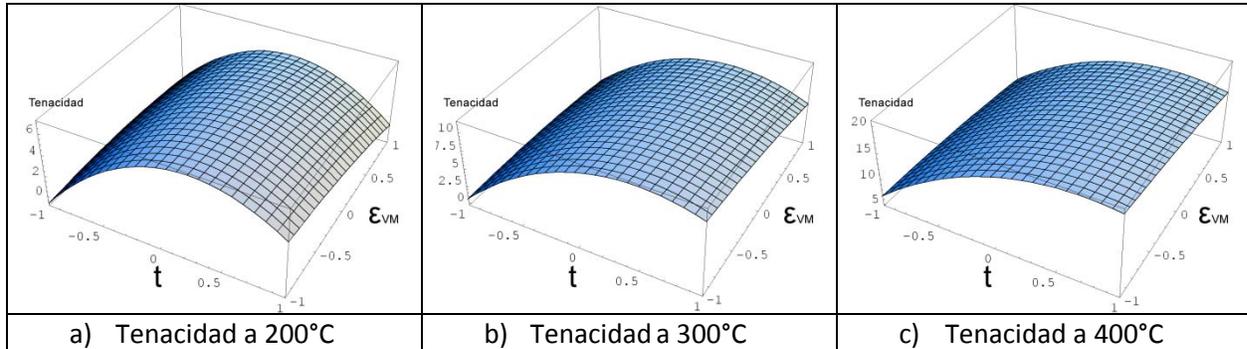


Imagen 4.16. Superficie de respuesta para tenacidad.

La ecuación que mejor describe el comportamiento mostrado en las gráficas para la tenacidad es la siguiente:

$$\text{Tenacidad} = 9.38 + 3.73t - 4.91t^2 + 5.39T + 2.07tT + 2.36T^2 - 1.24s - 0.89ts - 0.13Ts - 0.491s^2$$

(4.7)

4.2.5 Esfuerzo de cedencia

En el caso del esfuerzo de cedencia es posible observar que en la gráfica que corresponde al recocido a 200°C se tienen valores máximos para el material al que no se le aplicó tratamiento térmico y para el que se recoció durante 60 minutos. En las superficies correspondientes a 300°C y 400°C los valores máximos se tienen para el material que no fue recocido. Aunque en el caso de la gráfica correspondiente a la temperatura de 200°C y específicamente para el tiempo de recocido de 60 minutos la deformación jugó un papel importante, en general se sigue el mismo patrón que en las superficies anteriores donde el tiempo es el parámetro que marca mayor diferencia en las propiedades mecánicas (imagen 4.17).

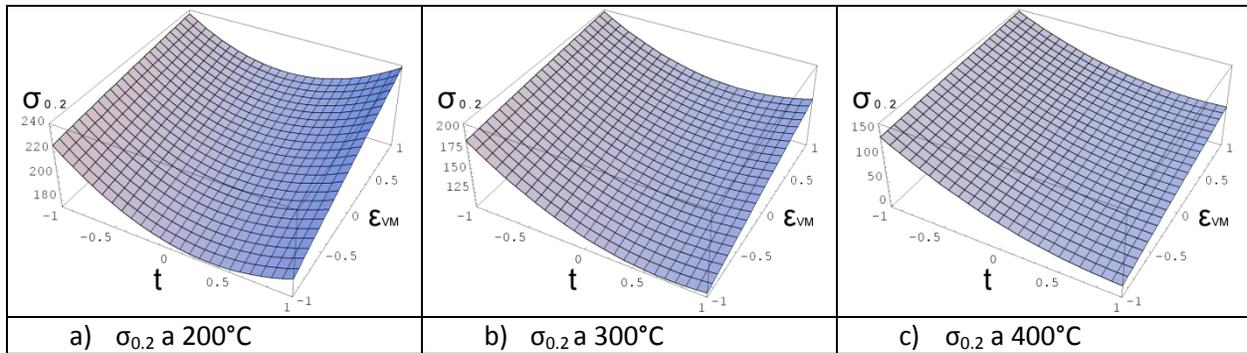


Imagen 4.17. Superficie de respuesta para esfuerzo de cedencia.

La ecuación que mejor describe el comportamiento mostrado en las gráficas para el esfuerzo de cedencia es la siguiente:

$$\sigma_{0.2} = 139.9 - 29.3t + 28.4t^2 - 61.4T - 20.6tT - 5.99T^2 + 18.2s + 9.46ts + 2.05Ts - 0.722s^2$$

(4.8)

4.3 Propiedades mecánicas maximizadas

En esta última parte del presente capítulo se muestran los valores maximizados de algunas propiedades mecánicas con restricción en otras. Como es lógico, no se pueden mostrar dichos valores gráficamente ya que se requeriría un gráfico en cuatro dimensiones. Sin embargo, se muestran las superficies que se obtienen a partir de dicha maximización en función de los parámetros que se controlaron y normalizaron para la obtención de las superficies de respuesta.

4.3.1 Tenacidad limitada por el esfuerzo de cedencia

En este caso el valor que se tomó como limitante para el esfuerzo de cedencia fue de 160 MPa. A partir de la ecuación 4.7 se obtuvo un valor máximo de tenacidad de 8.51735 MJ/m³ y se presenta cuando se ha recocido durante un tiempo normalizado de 0.372, que corresponde según la ecuación 4.2 a 41.16 minutos; una temperatura normalizada de 0.349, es decir 335°C y una deformación normalizada de 0.164, que según la ecuación 4.3 corresponde a una $\epsilon_{VM} = 3.58$.

4.3.2 Tenacidad limitada por la deformación máxima

El valor limitante para este caso fue una deformación máxima mayor a 0.08; los resultados según la ecuación 4.7 muestran que el valor máximo de tenacidad que se puede obtener al limitar la deformación máxima es de 20.59 MJ/m^3 y se tiene con un tiempo normalizado de 0.682, es decir 50.46 minutos; una temperatura de 400°C , cuyo valor normalizado es de 1 y una $\sigma_{YM} = 5$, que corresponde a un valor normalizado de -1.

4.3.3 Esfuerzo de cedencia limitado por la deformación máxima

Se limitó el valor de la deformación máxima para que no fuera menor a 0.14. Los resultados obtenidos fueron que el valor máximo del esfuerzo de cedencia es de 74.73 MPa y se obtiene cuando el tiempo normalizado es de 0.287 que corresponde a un tiempo de recocido de 38.61 minutos; una temperatura normalizada de 1, que corresponde a 400°C y una deformación normalizada de -0.805, cuyo valor real es $\sigma_{YM} = 3.09$.

4.3.4 Deformación máxima limitada por el esfuerzo de cedencia

Se propuso un esfuerzo de cedencia mayor o igual a 160 MPa y se obtuvo que el valor máximo de la deformación máxima según esta limitante es de 0.043 unidades de deformación. Este valor se logra al aplicar un recocido durante 36.39 minutos que corresponde a un valor normalizado de 0.213. La temperatura para lograr el valor máximo de deformación máxima es de 381°C ; es decir un valor normalizado de -0.817 y la deformación normalizada que se debe aplicar es de -0.257, que según la ecuación 4.3 corresponde a $\sigma_{YM} = 3.37$.

Capítulo 5. Discusión

En el capítulo anterior se mostraron los valores obtenidos para cada una de las propiedades mecánicas que se toman en cuenta al caracterizar un material para ser utilizado en cojinetes de deslizamiento. Los datos obtenidos resultaron ser dispersos y con poca variación entre los diferentes tiempos de recocido a una misma temperatura y deformación.

En algunos casos se presentaron fenómenos que influyeron considerablemente en el valor de las propiedades mecánicas; uno de los más importantes fue el endurecimiento por envejecimiento el cual se esperaba en la aleación SAE-788, ya que al tener silicio como elemento aleante y como las probetas se enfriaron a temperatura ambiente se promueve la presencia de dicho fenómeno, el cual es acelerado por el estaño. Lo anterior no ocurre en la aleación SAE – 783 y con ello se puede explicar la diferencia entre algunos parámetros obtenidos en trabajos previos donde se han estudiado aleaciones aluminio–estaño.

En general, el valor de la deformación se vio influenciado por el tratamiento térmico; inclusive en el material que fue sometido a bajas temperaturas de recocido se puede observar un aumento en la deformación homogénea y máxima. Lo anterior se debe a que aun a 200°C el material entra en la etapa de recuperación, que aunque no es posible observarla con el microscopio electrónico de barrido por presentarse a nivel de dislocaciones, se puede apreciar al comparar las propiedades mecánicas del material para cada uno de los tiempos y temperaturas a las que se les aplicó el tratamiento térmico. Cabe destacar que según los datos obtenidos de los ensayos de tracción se puede afirmar que a 200°C se ha comenzado el proceso de recuperación. Es importante señalar que a pesar de la diferencia en los valores de la deformación obtenida para la aleación SAE – 788 no se puede hablar de un material dúctil ya que no se llega a una deformación siquiera de 0.17, mientras que en la aleación SAE – 783 se logran deformaciones de hasta 40% dependiendo del proceso termomecánico que se le aplique.

En algunos casos se obtienen valores muy elevados de resistencia que derivan en deformaciones muy pequeñas, lo cual es atribuible a la gran cantidad de elementos intermetálicos que se pueden observar en las micrografías obtenidas. Al haber concentración de fase intermetálica en una determinada zona del material se eleva la resistencia, pero se promueve una elevada fragilidad. Esto se aprecia fuertemente en el ensayo de tracción, específicamente para las probetas delgadas y de tamaño reducido

usadas en la experimentación para el presente trabajo. En el uso de los cojinetes donde la aleación trabaja en compresión y está respaldada por una lámina de acero, el efecto de la concentración de intermetálicos es menos importante.

Microestructuralmente no se observan diferencias entre el material recocido a 200°C y el material que no fue sometido a tratamiento térmico ya que el estaño que es el elemento aleante en mayor cantidad no llega a fundir por lo que no hay cambios en la microestructura que puedan ser apreciables con el microscopio electrónico de barrido.

A temperatura de 300°C es posible observar diferencias entre los distintos tiempos de recocido para cada una de las deformaciones ya que el estaño al comenzar a fundirse se posiciona en la frontera de grano del aluminio por lo que es posible ver su segregación. Lo anterior no se aprecia claramente en el material que fue recocido durante solamente 10 minutos, pero conforme se aumentó el tiempo del tratamiento térmico se hace más evidente, siendo muy marcado para las probetas que se recoció durante 60 minutos.

En general para las probetas que fueron sometidas un recocido a 400°C se puede observar un gran aumento en la ductilidad, además que desde los 10 minutos de recocido es posible apreciar lo que se considera que son las fronteras de grano del aluminio, gracias a que el estaño se ha fundido completamente y se ha segregado a estos sitios.

Las superficies de respuesta obtenidas para cada uno de los casos muestran que aunque la deformación aplicada a las probetas es sumamente importante para la obtención de las propiedades mecánicas, el parámetro que más influye es el tiempo de recocido, seguido por la temperatura. Sin embargo cabe destacar que las mejores propiedades se logran en las probetas que fueron sometidas a pequeñas reducciones; lo cual no concuerda con lo descrito en la literatura, donde se menciona que un menor tamaño de grano deriva en mejores propiedades. Esta situación se ha hecho evidente también en la aleación SAE – 783, y aunque a pesar de que se ha observado una cinética de recristalización distinta en ambas aleaciones (la aleación SAE – 783 recristaliza a 200°C, mientras que la SAE – 788 lo hace a 400°C) se puede establecer que en general para ambas aleaciones un tamaño de grano pequeño no garantiza mejores propiedades.

La metodología de superficies de respuesta ha mostrado gran utilidad en el presente trabajo y en anteriores donde se aplicó a la aleación SAE – 783. Gracias a este método matemático ha sido posible modelar la obtención de propiedades mecánicas en las aleaciones utilizadas en cojinetes de deslizamiento bimetálicos. El principal beneficio se hace evidente en la maximización de las propiedades mecánicas que se deben optimizar en aleaciones tribológicas, pues gracias a ello será posible aplicar un tratamiento termomecánico que derive en las mejores propiedades posibles.

En el presente trabajo se ha utilizado un modelo polinomial de segundo orden, el cual solamente permite la obtención de las propiedades mecánicas y tiene como limitante la imposibilidad de describir el proceso de recristalización, lo cual sería de gran interés en el campo de la metalurgia física. Sin embargo, para fines industriales y tecnológicos no hay duda de que el modelo aquí planteado es de gran utilidad.

Gracias a los datos obtenidos y a su optimización con la metodología de superficies de respuesta, ha sido posible establecer una comparación entre la aleación SAE – 788 y la SAE – 783, donde es importante mencionar que con un adecuado tratamiento termomecánico es posible lograr valores de resistencia superiores en la aleación SAE - 788. Sin embargo, la aleación SAE – 788 muestra una clara imposibilidad de lograr los niveles de ductilidad que se tienen en la aleación SAE – 783 y que sin duda son de gran utilidad para su aplicación en cojinetes de deslizamiento. Por lo anterior es que ambas aleaciones son indispensables dependiendo de las condiciones de operación a las que se sometan los cojinetes de deslizamiento.

Conclusiones

La metodología de superficies de respuesta ha resultado una herramienta que al ser utilizada correctamente sin duda traerá grandes beneficios a la industria, ya que ayudará a la optimización de los procesos termomecánicos a los que se someten materiales tribológicos con aplicaciones específicas, como es el caso de las aleaciones dúctiles para cojinetes de deslizamiento.

En el presente trabajo se ha podido observar que hay parámetros que influyen de manera más significativa que otros en las propiedades mecánicas que interesan en la fabricación de cojinetes de deslizamiento; basados en ello se puede lograr una optimización idónea con la finalidad de reducir los factores de seguridad que usualmente son elevados ya que aunque el material tribológico como tal no suele presentar fallas, se le considera parte de un sistema el cual es susceptible a éstas.

Parte fundamental de las superficies de respuesta es la obtención de las funciones que las generan, ya que éstas permiten una buena optimización del proceso termomecánico al que se somete el material con la finalidad de lograr las propiedades mecánicas deseadas, tal como se realizó en el capítulo cuatro donde se maximizan dichas funciones partiendo de restricciones que se obtienen basándose en el conocimiento de ciertos valores que son suficientes para el correcto funcionamiento del material tribológico en los cojinetes de deslizamiento

A diferencia de la aleación SAE – 783, el material estudiado en la presente tesis presenta en su microestructura gran cantidad de fase intermetálica lo cual modifica sus propiedades mecánicas durante el ensayo de tracción. Es importante mencionar que el ensayo de tracción es una prueba tecnológica en la que se consideran los promedios de los datos obtenidos por lo que no se reproduce durante el funcionamiento de los cojinetes de deslizamiento; por ende la presencia de dichos intermetálicos no afecta de manera significativa al material sometido a compresión que es la forma como trabajan los cojinetes.

Ya obtenidas las funciones de respuesta y los valores maximizados de las propiedades mecánicas que se consideran más importantes, sería interesante la aplicación de los parámetros obtenidos en el proceso termomecánico para la obtención del material optimizado y posteriormente realizar pruebas de desgaste y fatiga para comparar los resultados con los obtenidos en estudios anteriores, y de esta manera determinar las ventajas de la aplicación del método de superficie de respuesta a nivel industrial.

Bibliografía

1. Schouwenaars Franssens, R. (2004). *Análisis de la deformación plástica durante el desgaste de cojinetes de deslizamiento*. Tesis, Doctorado en Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
2. Stolarsky, T. A. (1990). *Mechanical engineering tribology in machine design*. London: Butterworth Heinemann.
3. Durán Cortés, H. A. (2007). *Superficie de respuesta para el proceso termomecánico de la aleación SAE 783*. Tesis, Licenciatura en Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
4. Deutschman, Aaron D. (1991). *Diseño de máquinas: teoría y práctica*. México: CECSA.
5. Bravo Bernard, A. E. (2006). *Uso de materiales nanoestructurados, amorfos y cuasicristalinos para aplicaciones tribológicas*. Tesis, Licenciatura en Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
6. Faires, V. M. (1992). *Diseño de elementos de máquinas*. 4ª. ed. México: Limusa: Noriega.
7. Ramírez Díaz, E. I. (2004). *Evolución de la microestructura de la aleación SAE 788 durante su fundición y tratamiento térmico*. Tesis, Licenciatura en Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
8. Torres Castillo, J. A. (2006). *Optimización del proceso termomecánico de la aleación SAE 783 para cojinetes de deslizamiento*. Tesis, Licenciatura en Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
9. Chamorro Alva, E. O. y Guarneros Gutiérrez, R. A. (2007). *Análisis microestructural y mecánico de la aleación SAE 788 durante su tratamiento térmico y laminación*. Tesis, Licenciatura en Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.

10. Goover, M. (2004). *Fundamentals of modern manufacturing*. 2nd. ed., USA: John Wiley and Sons.
11. Kearney, A. y Rooy, E. (1992). Aluminum foundry products. En *ASM Handbook*. Cleveland, Ohio: ASM International.
12. Campbell, J. (2003). *Castings*. 2nd. ed. Birmingham: Butterworth Heinemann.
13. Meyers, M. A. y Chawla, K. K. (1984). *Mechanical metallurgy: principles and applications*. New Jersey: Prentice–Hall.
14. Reyes Ruiz, C. A. (2008). *Efecto del modificador en la estructura y propiedades mecánicas de la aleación SAE – 788 (A17 - X)*. Tesis, Licenciatura en Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
15. Smallman, R. E. y Bishop, R. J. (1999). *Modern physical metallurgy and materials engineering science, process, applications*. 6th. ed. London: Butterworth Heinemann.
16. Cisneros Hernández, R. *Efecto de las condiciones de enfriamiento y de la presencia de inoculantes en la formación de intermetálicos en una aleación SAE – 788*. Maestría en Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería (En proceso).
17. Dieter, G.E. (1988). *Mechanical metallurgy*. New York: McGraw–Hill.
18. Callister, W. D. (2003). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Barcelona: Reverté.
19. Humphreys, F. J., y Hatherly, M. (1995). *Recrystallization and related annealing phenomena*. London: Pergamon.
20. Peregrina Peña, P. M. (2000). *Empleo de superficies de respuesta para la solución de problemas inventarios estocásticos*. Licenciatura en Ingeniería Industrial, UDLAP.
21. *ASTM E8M – 00 Standard test methods of testing metallic materials [Metric]* (2002). West Conshohocken, PA: ASTM International.

-
22. Dieter, G. E. (1992). Mechanical behavior under tensile and compressive loads. En *ASM Handbook*. Cleveland, Ohio: ASM International.
 23. Abel, P. y Ferrante, J. (2001). Surface physics in tribology. En Bhushan, B. (Ed.), *Modern tribology handbook*. Columbus, Ohio: CRC Press LLC.
 24. González, C. y Juárez, J. (1999). Tratamiento de modificación en el molde de aleaciones Al-Si. *Información Tecnológica (México)*, núm. 10.
 25. Stachowiak, G. (2001). *Engineering tribology*. 2nd. ed. Boston: Butterworth Heinemann.