UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERÍA



DIVISIÓN DE INGENIERÍAS MECÁNICA E INDUSTRIAL



Edgar Isaac Ramírez Díaz Osvaldo Ruiz Cervantes Armando Ortiz Prado





Queremos agradecer el apoyo de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) por el apoyo económico proporcionado a través del proyecto PAPIME PE100113.

También agradecemos a las siguientes personas: M. en I. Efraín Ramos Trejo, M. en I. Ignacio Cueva Güitrón, M. en C. Carlos Arturo Reyes Ruiz, Abraham Rosas Alcántara, Dr. Rafael Schouwenaars Franssens, Dr. Víctor Hugo Jacobo Armendariz, Ing. Jorge Luis Romero Hernández, Ing. Roberto Cisneros Hernández, Ing. José Manuel Pineda Nicolás, Ing. Luis Alberto Guerrero Vázquez, Ing. Alan Rodrigo Saucedo Osorno y al Biol. Germán Álvarez Lozano, por el apoyo brindado en las diferentes etapas del desarrollo de este trabajo.

Finalmente, agradecemos el apoyo más importante brindado en la Unidad de Apoyo Editorial de la Facultad de Ingeniería por su valiosa participación en la edición de esta obra, de manera especial a la maestra en letras María Cuairán Ruidíaz, jefa de la Unidad; a la Lic. Patricia Eugenia García Naranjo por la revisión editorial, a Ana María Sánchez Téllez por el formato del material, digitalización y retoque de figuras, y la Lic. Nismet Díaz Ferro por la elaboración de la portada.

> M. EN C. EDGAR ISAAC RAMÍREZ DÍAZ M. EN C. OSVALDO RUIZ CERVANTES DR. ARMANDO ORTIZ PRADO

Para complementar los métodos de solución presentados en la teoría de la asignatura de *Modelado de Procesos de Manufactura*, se cuenta con un laboratorio cuyo objetivo es que el alumno aprenda a simular procesos de manufactura mediante paquetería de elementos finitos y obtener una solución utilizando técnicas numéricas.

Las instrucciones presentadas en cada práctica se escribieron detalladamente con el objetivo de que el profesor presente al alumno instrucciones simples y que éste aprenda, de manera clara y sencilla, el manejo de la paquetería de elemento finito Abaqus®, y así homogeneizar los laboratorios; es decir, que todos los alumnos reciban la misma información acerca de la paquetería y de los procesos de manufactura, sin importar qué profesor imparta la materia.

Al final de cada práctica se incluye una actividad para que el alumno desarrolle sus habilidades dentro del programa. En este *Manual de práctica*

s de Abaqus® se brinda una guía con informacion más detallada al profesor, esto con el fin de enriquecer los contenidos de su clase y tener más herramientas para resolver las dudas que puedan surgir.

En el manual de prácticas solo se tienen las instrucciones acerca de lo que el alumno debe desarrollar, ya que anteriormente se explicaron todas y cada una de las herramientas con las que cuenta el programa y es parte del desarrollo del alumno que mejore su capacidad de análisis para utilizar de manera efectiva el programa.

Al concluir el manual, el alumno será capaz de desarrollar proyectos orientados a procesos de manufactura. En este manual se abordan ocho prácticas, cada práctica está enfocada a que el alumno aprenda herramientas específicas con el fin de que pueda emplearlas al momento de realizar sus proyectos y que además, tenga la capacidad de explorar nuevas herramientas de Abaqus® no contempladas en este manual.

Índice

PRACTICA 1	1	
INDENTACION	1	
1.1 Objetivos	1	
1.2 INTRODUCCIÓN	1	
1.3 DESARROLLO	2	
Módulo Part	2	
Módulo Property	6	
Módulo Assembly	6	
Módulo Step	7	
Módulo Interaction	8	
Módulo Load	8	
Módulo Mesh	10	
Módulo Job	12	
Módulo Visualization	12	
Actividad para el alumno	12	
PRÁCTICA 2	15	
FORJA CON ESTAMPA	15	
2.1 Objetivos	15	
2.2 Introducción	15	
2.3 Desarrollo	16	
Módulo Part	16	
Módulo Property	18	
Módulo Assembly	19	
Módulo Step	19	
Módulo Interaction	19	
Módulo Load		
Módulo Mesh	21	
Módulo Job		
Módulo Visualization	21	
Actividad para el alumno	22	

PRÁCTICA 3	23
	23
3.1 OBJETIVOS	23
3.2 INTRODUCCION	23
3.3 DESARROLLO	24
Módulo Part	24
Módulo Property	26
Módulo Assembly	27
Módulo Step	28
Módulo Interaction	29
Módulo Load	30
Módulo Mesh	31
Módulo Job	32
Módulo Visualization	32
Actividad para el alumno	33
PRÁCTICA 4	35
EXTRUSIÓN DIRECTA	35
4.1 Objetivos	35
4.2 INTRODUCCIÓN	35
4.3 DESARROLLO	37
Módulo Part	37
Módulo Property	39
Módulo Assembly	44
Módulo Step	44
Módulo Interaction	45
Módulo Load	45
Módulo Mesh	
Módulo de Job	47
Módulo Visualization	47
Actividad para el alumno	

Conclusiones

PRÁCTICA 5

EXTRUSIÓN INVERSA	53
5.1 Objetivos	53
5.2 INTRODUCCIÓN	53
5.3 DESARROLLO	55
Módulo Part	55
Módulo Property	57
Módulo Assembly	57
Módulo Step	58
Módulo Interaction	58
Módulo Load	59
Módulo Mesh	59
Módulo de Job	63
Módulo Visualization	64
Actividad para el alumno	64

PRÁCTICA 6 67

EMBUTIDO AXISIMÉTRICO	67
6.1 Objetivos	67
6.2 Introducción	67
6.3 DESARROLLO	68
Módulo Part	68
Módulo Property	71
Módulo Assembly	72
Módulo Step	73
Módulo Interaction	74
Módulo Load	75
Módulo Mesh	76
Módulo Job	77
Módulo Visualization	77
Actividad complementaria	80

<u>53</u>

PRÁCTICA 7	87
EMBUTIDO 3D	87
7.1 Objetivos	87
7.2 INTRODUCCIÓN	87
7.3 DESARROLLO	88
Módulo Part	88
Módulo Property	91
Módulo Assembly	93
Módulo Step	94
Módulo Interaction	95
Módulo Load	97
Módulo Mesh	99
Módulo Job	101
Módulo Visualization	101
Actividad para el alumno	109
PRÁCTICA 8	111
FUNDICIÓN POR GRAVEDAD	111
8.1 Objetivos	111
8.2 INTRODUCCIÓN	111
8.3 DESARROLLO	113
Módulo Part	113
Módulo Property	120
Módulo Assembly	121
Módulo Step	123
Módulo Interaction	123
Módulo Load	125
Módulo Mesh	126
Módulo de Job	131
Módulo Visualization	131
Actividad para el alumno	131
REFERENCIAS	134

134

PRÁCTICA 1

INDENTACIÓN

1.1 OBJETIVOS

- Modelar el ensayo de dureza.
- Mostrar las diferencias entre modelos 2D, 3D y axisimétricos.
- Permitir que el alumno modele por sí solo, el proceso de forja abierta.

1.2 INTRODUCCIÓN

El primer ensayo de dureza que fue completamente aceptado y estandarizado fue realizado por J. A. Brinell en 1900. El ensayo consiste en la indentación de la superficie de un metal con una esfera de acero de 10 mm con una carga de 3000 Kg, en metales suaves la carga se reduce a 500 Kg para evitar una perforación muy profunda y cuando se utilizan metales muy duros se hace uso de indentadores de carburo de tungsteno para minimizar la distorsión del indentador. La carga es aplicada en un tiempo de 30 s, y el diámetro de la huella es medido con un microscopio óptico tradicional, una vez removida la carga. La superficie donde se realiza la indentación debe estar lisa y libre de suciedad. La dureza Brinell se expresa como la carga P, dividida por el área de la superficie de indentación de la siguiente forma:

$$BHN = \frac{P}{\left(\frac{\pi D}{2}\right)\left(D - \sqrt[2]{D^2 - d^2}\right)} = \frac{P}{\pi Dt}$$

Donde:

- P : carga aplicada en Kg
- D : diámetro del indentador en mm
- *d* : diámetro de la indentación en mm
- *t* : profundidad de la indentación en mm

Debe notarse que las unidades de la dureza Brinell son Kg/mm²; sin embargo, la dureza Brinell no satisface el concepto físico de presión, ya que la expresión no da un significado de presión sobre la superficie de indentación. Si bien el ensayo de dureza no es un proceso de manufactura, sí es una práctica didáctica que permitirá al alumno entender el manejo del programa.

1.3 DESARROLLO

Módulo Part

Para esta práctica se generan seis modelos diferentes: *axisimétrico, 3D, 2D deformación plana con media geometría, 2D deformación plana con geometría completa, 2D esfuerzo plano con media geometría, y 2D esfuerzo plano con geometría completa.*

Se asignarán cada una de las opciones descritas a 2 o 3 alumnos. En el **módulo Part** se generan dos piezas independientes, la *probeta* y el *indentador*.

Para los modelos 2D (deformación plana y esfuerzo plano), se generan las piezas de la siguiente manera:

Para la *probeta* se genera un modelo 2D, deformable, con un área de dibujo de 0.1; en el **sketch** se dibuja un rectángulo con las siguientes dimensiones:





Para el *indentador* se genera un modelo 2D, analíticamente rígido, con un área de dibujo de 0.1; en el **sketch** se dibuja una circunferencia con un radio de 5 mm. Para finalizar, el *indentador* tendrá su nodo de referencia en el centro de la circunferencia.



FIGURA 1.2 INDENTADOR 2D

Para los modelos 2D (deformación plana y esfuerzo plano) con media simetría, modelo 3D y modelo axisimétrico, las piezas se generarán con las mismas medidas de las figuras 1.3 y 1.4 para la *probeta* y el *indentador* respectivamente. En el caso de la *probeta* se trata de una pieza deformable y para el *indentador* se generará una semicircunferencia analíticamente rígida.



FIGURA 1.3 PROBETA

Para el *indentador* se genera un modelo 2D, analíticamente rígido, con un área de dibujo de 0.1; en el **sketch** se dibuja media circunferencia con un radio de 5 mm. Para finalizar, el *indentador* tendrá su nodo de referencia en el centro de la media circunferencia.



FIGURA 1.4 INDENTADOR

Para el modelo 3D se utilizarán sólidos de revolución tanto para la *probeta* como para el *indentador*. Además a la *probeta* del modelo 3D se le harán tres particiones con el fin de que el mallado pueda ser estructurado, dichas particiones se realizan mediante un corte de tres puntos y la *probeta* quedará dividida en cuatro secciones iguales.

Punto	X	Y	Z
1	20E-3	0	0
2	20E-3	20E-3	0
3	-20E-3	20E-3	0

Τ ΔΒΙ Δ 1.1	PUNTOS PARA	GENERARIA	PRIMERA	PARTICIÓN
				ARTIOION

En la figura 1.5 se muestran los puntos de donde se generará la partición.



FIGURA 1.5 CONSTRUCCIÓN PROBETA 3D

Punto	x	Y	z
1	0	0	20E-3
2	0	20E-3	20E-3
3	0	20E-3	-20E-3

TABLA 1.2 PUNTOS PARA GENERAR LA SEGUNDA PARTICIÓN

En la figura 1.6 se muestran los puntos para generar la segunda partición.



FIGURA 1.6 CONSTRUCCIÓN PROBETA 3D

En la figura 1.7 se muestra la *probeta* finalizada.



FIGURA 1.7 PROBETA 3D

En la figura 1.7 se muestra el resultado final del *indentador* 3D.



FIGURA 1.8 INDENTADOR 3D

Módulo Property

En este módulo se crea un nuevo material que tendrá las siguientes propiedades:

Elásticas: módulo de Young = 200 GPa y relación de Poisson = 0.3.

Plásticas: Utilizar los datos de la tabla 1.3.

 TABLA 1.3 PROPIEDADES PLÁSTICAS DEL MATERIAL

Esfuerzo	Deformación Plástica	
Ра	mm/mm	
3.8E8	0	
5.8E8	0.35	

Después de crear el material se genera una sección sólida homogénea, a la cual se le asocia el material creado. Por último, se asigna la sección a alguna de las piezas creadas, en ésta se asigna a la *probeta*, que es la única pieza deformable del modelo.

Módulo Assembly

En este módulo lo único que se realiza es agregar las piezas generadas. Nota: Las piezas fueron generadas con el fin de que coincidan en el ensamble sin necesidad de orientarlas de otra manera y se mantienen como dependientes, ya que se quieren mallar las piezas y no el ensamble.



FIGURA 1.9 ENSAMBLE DEL MODELO DE INDENTACIÓN 2D



FIGURA 1.10 ENSAMBLE DEL MODELO DE INDENTACIÓN 2D CON MEDIA SIMETRÍA



FIGURA 1.11 ENSAMBLE DEL MODELO DE INDENTACIÓN AXISIMÉTRICA



FIGURA 1.12 ENSAMBLE DEL MODELO DE INDENTACIÓN 3D

Módulo Step

En este módulo se establece el tiempo de simulación (**Step**). Se le asigna el nombre de *indentacion* y será estático general, tendrá un tiempo de 1 s y sin activar la opción de no linealidad geométrica. Las demás opciones no se modifican.

Módulo Interaction

Para comenzar se debe generar un par de contacto el cual será: **Surface-to-Surface contact (Standard)**, se eligen la superficie maestra que será el *indentador*, y la superficie esclava que será la superficie superior de la *probeta*.

En la figura 1.13 se muestra cómo seleccionar la superficie maestra, después se definen las propiedades de la interacción, se elige la opción **Contact**, con comportamiento tangencial y sin fricción.



FIGURA 1.13 SELECCIÓN DE SUPERFICIE MAESTRA

Módulo Load

En este módulo se generaran las condiciones de frontera:

- Restricción de giro del *indentador* con respecto del eje Z y de desplazamiento en el eje X.
- 2. Desplazamiento nulo de la superficie inferior de la *probeta*.
- 3. Aplicar un desplazamiento sobre el *indentador* de 2.5 mm.
- 4. Desplazamiento nulo de la arista izquierda de la *probeta*. Esta condición de frontera solo será aplicada en los modelos: *Axisimétrico, 2D deformación plana con media simetría y 2D esfuerzo plano con media simetría*.



FIGURA 1.14 CONDICIONES DE FRONTERA DE LOS MODELOS 2D



FIGURA 1.15 CONDICIONES DE FRONTERA DE LOS MODELOS 2D CON MEDIA SIMETRÍA



FIGURA 1.16 CONDICIONES DE FRONTERA DEL MODELO AXISIMÉTRICO



FIGURA 1.17 CONDICIONES DE FRONTERA DEL MODELO 3D

Módulo Mesh

En el menú principal, en la ventana **Mesh** se selecciona **Controls**, se elige un mallado con elementos cuadráticos y éste será estructurado. En la misma ventana se selecciona la opción **Element Type**, se elige el tipo de familia, es decir, si se trata de un modelo 3D se selecciona la familia 3D Stress, para los modelos 2D deformación plana la familia que les corresponde es Plane Strain, a los modelos 2D de esfuerzo plano les corresponde la familia Plane Stress, por último al modelo axisimétrico le corresponde la familia Axisymmetric Stress.

A continuación en la opción de **Seed** se selecciona **Part**, para los modelos 2D, axisimétrico y 2D con media simetría, el tamaño del elemento es 0.002; y para el modelo 3D el tamaño del elemento es de 0.0028. Para finalizar, dentro de la misma opción **Mesh**, se selecciona **Part** y se da clic en el *tocho* para mallarlo.



FIGURA 1.18 PROBETA MALLADA MODELOS 2D



FIGURA 1.19 PROBETA MALLADA MODELOS 2D Y AXISIMÉTRICO



FIGURA 1.20 PROBETA MALLADA MODELO 3D

Módulo Job

En este módulo solo se crea un **Job**, se asignará el nombre que el alumno desee y que pueda identificar, una vez creado en el **Job Manager** se somete a análisis el Job creado y dentro del mismo manager se seleccionan los resultados.

Módulo Visualization

En este módulo se observará el resultado final del modelo, con la opción de presentar los resultados en contorno de colores. A continuación con los datos obtenidos en el grupo se llenará la siguiente tabla del tiempo de cómputo.

TABLA 1.4 TIEMPO DE CÓMPUTO POR MODELO

Modelo	Tiempo
	S
Axisimétrico	
Deformación Plana media Simetría	
Deformación Plana	
Esfuerzo Plano media Simetría	
Esfuerzo Plano	
Modelo 3D	

Actividad para el alumno

El alumno realizará el modelado de un proceso de forja abierta, mediante un modelo axisimétrico con media simetría en el eje X. Se crearán dos nuevas piezas una será llamada *tocho* y la otra será llamada *dado*. En la figura 1.21 se muestran las dimensiones del *tocho*.



FIGURA 1.21 TOCHO

En la figura 1.22 se muestran las dimensiones del dado para el modelo de forja.



FIGURA 1.22 DADO

Para el ensamble solo se agregan las piezas y para el módulo de propiedades se utilizan las mismas que fueron ocupadas en el modelo de indentación, en el **Módulo Step** se genera un paso estático general y se le asigna el nombre de *Forja Abierta*.

En el **módulo Interaction** se debe generar un par de contacto. En las propiedades de interacción se tiene un comportamiento tangencial y se usaran diferentes condiciones de fricción. Para comenzar se hará sin fricción y se irá incrementando desde 0.1 hasta llegar a 0.5, con esto se evaluará el efecto del coeficiente de fricción en la fuerza de reacción en el nodo de referencia del dado.

En el módulo de carga se asignarán las condiciones necesarias para generar el modelo de forja abierta con una deformación del tocho del 25%. En el **módulo Mesh** se generará una malla estructurada con elementos cuadráticos de tamaño 0.02, como se muestra en la figura 1.23.



FIGURA 1.23 TOCHO MALLADO

Como se mencionó, esta actividad consiste en ver el efecto del coeficiente de fricción en el proceso de forja abierta, así que se crearán distintos Jobs cada uno asignado a un diferente coeficiente de fricción. Para finalizar, el alumno graficará la fuerza de reacción del nodo de referencia del dado contra el desplazamiento, y analizará la relación de la fuerza de reacción máxima contra el coeficiente de fricción.

PRÁCTICA 2

FORJA CON ESTAMPA

2.1 OBJETIVOS

- Mostrar el modelado del proceso de forja con estampa mediante un modelo axisimétrico.
- Mostrar el efecto del factor de escalamiento de masa en el tiempo de cálculo y en los resultados del proceso.
- Mostrar el efecto en los resultados del proceso de forja con estampa, al utilizar un remallado ALE.

2.2 INTRODUCCIÓN

El forjado es un proceso en el que por medio de fuerzas de compresión sucesivas aplicadas a través de matrices, dados o herramientas, se conforma la pieza. Se puede realizar la forja de forma tradicional con un marro y un yunque. Sin embargo, la mayor parte de las forjas requieren un conjunto de matrices, prensas o martinetes. Los productos más típicos que se pueden obtener a través del forjado son: tornillos, remaches, ejes de turbinas, discos para engranajes, bielas y piezas estructurales para maquinaria diversa. Para que las piezas forjadas tengan buena resistencia y tenacidad es necesario controlar el flujo del metal y la estructura del grano, y así puedan ser usadas en aplicaciones donde se requieran grandes resistencias. El modelo aquí presentado corresponde a una estampa de forja, este proceso consiste en colocar la pieza entre dos matrices que al cerrarse forman una cavidad con la geometría y dimensiones que se desean obtener para la pieza. A medida que avanza el proceso, ya sea empleando martillos o prensas, el material se va deformando y adaptando a las matrices hasta que adquiere la geometría deseada. Este proceso debe realizarse con un cordón de rebaba que sirve para adoptar la

presión necesaria al llenar las zonas finales de la pieza. Se utiliza para fabricar grandes series de piezas cuyas dimensiones pueden variar ampliamente.



FIGURA 2.1 FORJA CON ESTAMPA

2.3 DESARROLLO

Módulo Part

En el **Módulo Part** se generan dos piezas independientes, una será el *tocho* y la otra será el *dado de forja*.

Para el *tocho* se genera un modelo axisimétrico, deformable, con un tamaño de área de dibujo de 0.1; en el sketch se dibuja un rectángulo con las siguientes medidas:





Para el *dado* se genera un modelo axisimétrico, analíticamente rígido, con un tamaño de área de dibujo de 0.1; en el **sketch** se dibuja una curva senoidal con la unión de líneas que son formadas con los siguientes puntos:

	x	Y		x	Y
1	0.025	0.01	12	0.02225	0.01289
2	0.02475	0.01003	13	0.022	0.01327
3	0.0245	0.01012	14	0.02175	0.01363
4	0.02425	0.01027	15	0.0215	0.01397
5	0.024	0.01047	16	0.02125	0.01426
6	0.02375	0.01073	17	0.021	0.01452
7	0.0235	0.01103	18	0.02075	0.01473
8	0.02325	0.01136	19	0.0205	0.01488
9	0.023	0.01172	20	0.02025	0.01497
10	0.02275	0.0121	21	0.02	0.015
11	0.0225	0.0125			

 TABLA 2.1
 COORDENADAS DE LOS PUNTOS PARA GENERAR EL DADO

Una vez generada la línea se debe realizar un **mirror** a partir de una línea vertical de apoyo generada en el último punto de la curva, repitiendo la instrucción hasta llegar a la siguiente figura.



FIGURA 2.3 CURVA SENOIDAL QUE GENERA AL DADO

Por último se genera una línea a partir del primer punto de la curva senoidal y el punto (0.04, 0.01). Una vez terminado el dado se deberá generar el nodo de referencia de la pieza, el cual estará en el punto (0.01, 0.02).



FIGURA 2.4 DADO TERMINADO CON SU PUNTO DE REFERENCIA

Módulo Property

En este módulo se crea un nuevo material que tendrá las siguientes propiedades:

Densidad = 7800 Kg/m^3

Elásticas: módulo de Young = 200 GPa y relación de Poisson = 0.3.

Plásticas: Utilizar los datos que se presentan en la tabla 2.2.

Esfuerzo Pa	Deformación Plástica mm/mm
1E8	0
3.1E8	2

Después de crear el material se genera una sección, la cual será sólida y homogénea, y a esta se le asocia el material creado. Por último se asigna la sección al *tocho*, que es la única pieza deformable del modelo.

Módulo Assembly

En este módulo lo único que se hace es agregar las piezas generadas. Nota: Las piezas deberán ser generadas con el fin de que coincidan en el ensamble sin necesidad de orientarlas de otra manera.



FIGURA 2.5 ENSAMBLE DEL MODELO DE FORJA CON ESTAMPA

Módulo Step

En este módulo se genera un paso con el nombre de *Forja* que será dinámico explícito y tendrá un tiempo de 0.00038, activando la **No linealidad geométrica**. Las demás opciones no se modifican.

Módulo Interaction

Para comenzar se debe generar un par de contacto el cual será: **Surface-to-Surface contact (Explicit)**; la superficie maestra será la superficie interna del *dado* y la superficie esclava será la superficie superior del *tocho*.



FIGURA 2.6 SELECCIÓN DE SUPERFICIE MAESTRA

Después de definir las propiedades de la interacción se elige la opcion **Contact**, con comportamiento tangencial y sin friccion.

Módulo Load

En este módulo se generaran las condiciones de frontera:

- Restricción de giro del dado con respecto del eje Z, además de una restricción de desplazamiento en el eje X.
- 2. Desplazamiento nulo de la superficie interior del tocho.
- 3. Condición de simetría en la arista izquierda del tocho.
- 4. Velocidad vertical en el dado de -20 m/s



FIGURA 2.7 CONDICIONES DE FRONTERA DEL MODELO

Módulo Mesh

En este módulo, como primer paso, se cambia el modo de mallar de ensamble a pieza. Se debe seleccionar el tocho y elegir un mallado estructurado con elementos cuadráticos y se verifica que en la familia se encuentre seleccionada la opción **Axisymmetric Stress**. En el menú principal de la herramienta **Seed** se selecciona **Part**, asignando un tamaño aproximado del elemento = 0.0008, y después se malla.



FIGURA 2.8 TOCHO MALLADO

Módulo Job

En este módulo solo se crea un trabajo de simulación (Job) y se somete a análisis.

Módulo Visualization

En este módulo se mostrará el resultado final del modelo, en este primer Job se observarán algunos errores a simple vista, los cuales se corregirán más adelante.

Una vez corregidos los errores en el **módulo Step** se activará el factor de escalamiento de masa y se asignará un valor de 1, 10, 100, 1000, 10000 (según el valor asignado por el profesor). En cada caso se correrá un Job.

En la siguiente tabla se anotará el tiempo que el equipo tardó en resolver el modelo (aunque el programa aborte se deberá anotar el tiempo).

Factor de escalamiento de masa	Tiempo de cómputo s	Número de incrementos calculados	Estatus Job
1			
10			
100			
1000			
10000			
100000			

TABLA 2.4 RESULTADOS DE LA PRÁCTICA

Se obtendrán curvas de energía interna total del modelo y energía cinética del modelo, además de las gráficas de fuerza de reacción en el nodo central del dado, y serán comparadas con los resultados del resto del grupo.

Para finalizar la práctica se deberá generar del modelo axisimétrico una vista con un sólido de revolución en el módulo de visualización, además de presentar un espejo con respecto al plano XZ.

Actividad para el alumno

Del modelo anterior (con todas las correcciones hechas), el alumno deberá generar dos modelos diferentes, en ellos deberá considerar la velocidad del proceso = -10 m/s y la velocidad del proceso = -1 m/s. El resto de las condiciones permanecerán igual con el fin de tener resultados comparativos entre procesos.

¿Qué proceso sería el más adecuado y por qué? Justifique su respuesta analizando las gráficas de energía y fuerza de reacción.

PRÁCTICA 3

LAMINACIÓN

3.1 OBJETIVOS

- Modelar el proceso de laminado plano.
- Determinar las diferencias entre modelos de media simetría, 2D de deformación plana y 3D.
- Calcular la fuerza de reacción variando el coeficiente de fricción.

3.2 INTRODUCCIÓN

El laminado de piezas con sección transversal rectangular, con un ancho mucho mayor que el espesor [10:1], se conoce como *laminado plano*. En el caso de que se produzcan varias operaciones de laminado, la reducción de espesor total es la suma de las reducciones de espesor parciales dividida entre el espesor inicial. En la operación de laminado, al reducirse el espesor, aumenta la longitud del material de trabajo mientras que el incremento en el ancho es mínimo en comparación a los anteriores, de tal forma que se considera constante. Como tal, existe una relación respecto a las dimensiones iniciales debido a la conservación de volumen, de modo que el volumen inicial es igual al volumen final. En el laminado plano también permanece constante el flujo volumétrico del material, por lo tanto, la velocidad de entrada y salida del material están relacionadas.

A lo largo de la superficie de contacto con los rodillos, la velocidad del material va cambiando gradualmente y hay un punto a lo largo del arco en el que la velocidad del material es la misma que la de los rodillos. Este recibe el nombre de punto neutro. A ambos lados de dicho punto se produce deslizamiento entre el material y los rodillos debido al cambio de sentido de las cargas asociadas a la fricción.

Los materiales que son laminados van desde metales puros como el aluminio, hasta aleaciones de CuZn (latones), CuAl (cuproaluminios), bronces, aleaciones de aluminio, aceros, aleaciones de níquel, aleaciones de titanio, entre otros muchos materiales.

En esta práctica se desarrolla la simulación de un proceso de laminado plano con propósitos didácticos, debido a las dimensiones con las que se trabaja, las cuales corresponden a las de la laminadora experimental instalada en esta Facultad de Ingeniería; condiciones que no corresponden con un proceso industrial en lo que se refiere a cargas, energía y potencia demandadas. De forma independiente a la capacidad del sistema que se modela los resultados son útiles para mostrar la relación existente entre condiciones de procesos y presiones demandadas.

3.3 DESARROLLO

Módulo Part

Para esta práctica el grupo se divide en dos equipos y se generan dos modelos: un modelo 2D con deformación plana y un modelo 3D.

En el **módulo Part** se genera la herramienta y el tocho de trabajo. Para el modelo 2D con deformación plana las piezas se generan de la siguiente manera:

Para el *tocho* se genera un modelo 2D, deformable, shell, con un tamaño de área de dibujo de 0.2; en el sketch se dibuja un rectángulo con los siguientes puntos:

 TABLA 3.1 PUNTOS PARA GENERAR EL TOCHO

Punto	X	Y
1	0.06	0.0
2	0.2	0.03



FIGURA 3.1 TOCHO 2D

Para el *rodillo* se genera un modelo 2D, analíticamente rígido, con un tamaño de área de dibujo de 0.2; en el sketch se dibuja una circunferencia con centro en (0, 0.07) y un radio de 5 cm. Finalmente agregar el nodo de referencia en el centro.



Para el modelo 3D se generan las piezas de la siguiente manera:

El *tocho* se genera como un modelo 3D, deformable y sólido de extrusión, siguiendo la misma secuencia para el trazo del dibujo del modelo 2D, y utilizando los mismos valores de la tabla 3.1.

Una vez generado el rectángulo se asigna una profundidad de 0.25.



FIGURA 3.3 TOCHO 3D

Para el *rodillo* se crea un modelo 3D, analíticamente rígido, y se elige un elemento shell extruido. Nuevamente se sigue la secuencia de pasos del modelo 2D. Una vez terminado, se asigna una profundidad de 0.3 al modelo. Por último se asigna un nodo de referencia con coordenadas (0, 0.071, 0).



FIGURA 3.4 RODILLO 3D

Módulo Property

En este módulo se crea un nuevo material, el cual será el mismo para ambos modelos. El material a generar será un aluminio de la serie 1000, llevará el nombre *Aluminio 1050* y tendrá las siguientes propiedades:
Densidad = 2700 Kg/m^3

Elásticas: módulo de Young = 69 GPa y relación de Poisson = 0.33.

Plásticas: Utilizar los datos de la tabla 3.2.

TABLA 3.2 PROPIEDADES PLÁSTICAS DEL MATERIAL (ALUMINIO)

Esfuerzo	Deformación Plástica	
Ра	mm/mm	
28E6	0	
76E8	0.39	
97E6	1.55	

Para el modelo 2D con deformación plana, después de crear el material se genera una sección, la cual será sólida y homogénea, a esta se le asocia el material creado y se le da un espesor de deformación plana de 0.5. Por último se asigna la sección al *tocho* creado. El *tocho* será la única pieza del modelo deformable.

Para el caso del modelo 3D se genera una sección sólida y homogénea. A esta sección se le asocia el material creado y por último se asigna al *tocho 3D* creado.

Módulo Assembly

En este módulo, para ambos modelos lo único que se hace es agregar las piezas generadas. Para el modelo 3D tan sólo hay que trasladar al *rodillo* para que coincida con el *tocho*.



FIGURA 3.5 ENSAMBLE DEL MODELO DE LAMINACIÓN 2D CON DEFORMACIÓN PLANA



FIGURA 3.6 ENSAMBLE DEL MODELO DE LAMINACIÓN 3D

Módulo Step

En este módulo se crean los pasos. En ambos modelos se generarán dos pasos dinámicos explícitos. El primero se llamará *posicionamiento* y será solo la colocación del *tocho* en los *rodillos* para su laminación. El segundo paso se llamará *laminación* y comprende el proceso del laminado del tocho. La duración de cada paso y el valor del factor de escalamiento de masa de ambos modelos se indican en las tablas 3.3 y 3.4.

 TABLA 3.3 DURACIÓN DE CADA PASO Y FACTOR DE ESCALAMIENTO DE MASA EN EL MODELO DE LAMINADO

 2D

Step	Tiempo s	FEM
1. Posicionamiento	0.3	5000
2. Laminado	0.5	5000

TABLA 3.4 DURACIÓN DE CADA PASO Y FACTOR DE ESCALAMIENTO DE MASA EN EL MODELO DE LAMINADO
3D

Step	Tiempo s	FEM
1. Posicionamiento	0.15	500
2. Laminado	0.5	4500

Una vez asignados los factores de escalamiento, se asigna un remallado en el paso del *laminado*, el cual aplica para los dos modelos. Se edita el paso 2 correspondiente a la

laminación. Se selecciona la región correspondiente al *tocho*, y se asignan los parámetros que se indican en la tabla 3.5.

Parámetro	Valor
Frecuencia	10
Barridos de remallado por incremento	10

TABLA 3.5 PARÁMETROS DEL REMALLADO ALE DE LOS MODELOS 3D Y 2D DEFORMACIÓN PLANA

Módulo Interaction

Para ambos modelos de laminación se debe generar una interacción, la cual será: **Surface-to-Surface contact (Standard)**, y se llamará *Contacto Rodillo-Tocho*. La superficie maestra será el contorno del *rodillo* y la superficie esclava será la región superior *tocho* de aluminio.

En las figuras 3.7 y 3.8 se muestra la superficie maestra en rojo, y en magenta, la región que estará en contacto del elemento deformable.



FIGURA 3.7 SUPERFICIE MAESTRA Y SUPERFICIE ESCLAVA DEL MODELO 2D



FIGURA 3.8 SUPERFICIE MAESTRA Y SUPERFICIE ESCLAVA DE MODELO 3D

Después de seleccionar las superficies, se asigna un valor de fricción entre ambas de 0.5. Una vez creada la interacción, se crea una más con un valor de 0.4. Esta nueva fricción servirá para comparar resultados una vez terminado el modelo.

Módulo Load

En este módulo se generarán las condiciones de frontera del modelo. A continuación se enlistan para cada caso.

Modelo 2D deformación plana:

- Se restringe la cara inferior (línea) del *tocho* a partir del primer paso (YSYMM: U2
 = UR1 = UR3 = 0).
- 2. Se restringe el nodo de referencia del *rodillo* (U1=U2=0) en el paso número 1.
- Se asigna una velocidad angular en el nodo de referencia del *rodillo* de 91 RPM.
 (VR3 = -9.57) en el paso 1.
- 4. Se asigna una velocidad en la línea vertical derecha del *tocho* (V1=-0.2) en el paso
 1. Posteriormente se desactiva en el paso 2.

Modelo 3D:

- Se restringe la cara inferior (superficie) del *tocho* a partir del primer paso (YSYMM: U2 = UR1 = UR3 = 0).
- Se restringe el nodo de referencia del *rodillo* (U1=U2=U3=UR1=UR2=0) en el paso número 1.

- Se asigna una velocidad angular en el nodo de referencia del *rodillo* de 91 RPM.
 (VR3 = -9.57) en el paso 1.
- 4. Se asigna una velocidad en todo el *tocho* (V1=-0.2) en el paso 1, seleccionando toda la geometría del *tocho*. Posteriormente se desactiva en el paso 2.
- 5. Se restringe la cara lateral del *tocho* (superficie) paralela con el plano XY, a partir del primer paso (**ZSYMM: U3 = UR1 = UR2 = 0**).

Módulo Mesh

Para el modelo 2D con deformación plana se elige un mallado con **elementos cuadráticos**, este será **estructurado** y de la familia de deformación plana (**Plane Strain**).

Se asigna un tamaño de elemento de 0.005 y posteriormente se malla la pieza.





Para el modelo 3D se elige un mallado con **elementos hexaédricos** y este será **estructurado** dentro de la familia esfuerzo 3D (**3D Stress**). Se asigna un tamaño de elemento de 0.01 y se malla el *tocho*.



FIGURA 3.10 TOCHO MALLADO 3D

Módulo Job

Para ambos modelos, en este módulo sólo se crea un trabajo de simulación **(Job)** con el nombre de *Laminación de un paso*. Una vez creado se somete a análisis. Dentro del mismo manager se selecciona la opción para observar los resultados.

Módulo Visualization

En este módulo se observará el resultado final del modelo. Se extruyen los elementos con una profundidad de 0.5 en el caso del modelo 2D deformación plana y se activan las condiciones de simetría.



FIGURA 3.11 LAMINACIÓN DE UN PASO. MODELO 2D CON DEFORMACIÓN PLANA



FIGURA 3.12 LAMINACIÓN DE UN PASO. MODELO 3D

Se debe obtener la curva de desplazamiento del *tocho* para visualizar la reducción alcanzada. Asimismo, obtenga la deformación logarítmica en dirección X, Y y Z y compare los resultados entre ambos modelos. Posteriormente genere un nuevo **Job** con el valor de fricción de 0.4 creado y compare las fuerzas de reacción en el *rodillo* con diferentes valores de fricción (0.5 y 0.4). Por último, obtenga las curvas de energía interna y energía cinética y corrobore que el modelo sea válido.

Actividad para el alumno

Una vez finalizado el proceso de laminación de un paso, se propone como actividad al alumno implementar un segundo paso al modelo ya creado para alcanzar una reducción total del 50%. Establezca las formas para llevarlo a cabo. Una vez finalizado el modelo, verifique que sea válido, obteniendo las curvas de energía cinética y energía interna. Asimismo corrobore que la reducción del segundo paso y la reducción total fueron las solicitadas y compare las curvas de deformación logarítmica entre modelos 2D y 3D en las direcciones X, Y y Z. Por último obtenga las fuerzas de reacción en el o los rodillos y realice los comentarios pertinentes.

PRÁCTICA 4

EXTRUSIÓN DIRECTA

4.1 OBJETIVOS

- Modelar el proceso de extrusión directa en forma axisimétrica.
- Modelar el proceso de extrusión directa a 200 °C para observar el efecto termomecánico en el proceso.
- Analizar el efecto térmico ocurrido en el tocho debido al calentamiento por fricción y el enfriamiento posterior.

4.2 INTRODUCCIÓN

El proceso consiste en colocar un tocho de metal en la cámara de compresión, de tal forma que el pistón aplicará carga en el tocho para comprimirlo, forzando a que el material fluya a través de una o más aberturas en un dado al extremo opuesto del recipiente. Al finalizar la carrera del pistón, una porción del material permanece y no puede forzarse a través del dado (remanente del lingote), lo que obliga a detener el proceso y separar esa sección del perfil deseado, esta operación se hace justo después de la salida del dado. El proceso se caracteriza por la gran carga de fricción que existe entre la superficie de trabajo y la superficie interna del recipiente, este fenómeno causa la carga necesaria para que el pistón se desplace y se eleve. En particular este fenómeno causa mayores problemas si se trabaja en caliente el material en comparación con los demás procesos, ya que genera una capa de óxido en la superficie donde ocurre la fricción, esto se evita colocando un recubrimiento cerámico (vidrio) entre el recipiente y el tocho (Groover, 1993).



FIGURA 4.1 A) TOCHO B) RECIPIENTE PARA EL PROCESO DE EXTRUSIÓN C) BLOQUE DE CERÁMICO D) REGIÓN CON ÓXIDO

En la figura 4.1, el bloque de cerámico tiene un gradiente de sinterizado y la intercara *bc* es la sección más sólida y resistente, la intercara *ac* es la sección menos resistente y su consistencia es casi polvo. La región *d* es la sección del tocho con óxidos debidos a la alta temperatura, esa porción del tocho se queda en el bloque de cerámico, dejando limpio el perfil final.

La extrusión directa permite hacer perfiles huecos o semi-huecos, gracias a que el perfil final se obtiene mediante el dado cuyo cambio permite obtener una gran variedad de perfiles con relativa sencillez. La facilidad depende de si se cuenta o no con un dado previamente diseñado para el perfil que se requiere o si la máquina donde se hará el intercambio de dados no presenta complicaciones para este fin, así como si el proceso industrial en planta permite el paro de un equipo el tiempo suficiente para que se haga el cambio sin que se tengan pérdidas superiores a lo aceptado. A continuación se presenta el esquema de extrusión directa para generar perfiles huecos y semi-huecos.



FIGURA 4.2 A) ESQUEMA DE EXTRUSIÓN DIRECTA PARA PERFILES HUECOS Y SEMI-HUECOS B) PERFIL COMÚN HUECO C) PERFIL COMÚN SEMI-HUECO (GROOVER, 1993)



FIGURA 4.3 A) VARIEDAD DE PERFILES OBTENIDOS POR EXTRUSIÓN DIRECTA (SCHEY, 2002), B) Y C) ALETAS DE ALUMINIO EXTRUIDO (ALIEXPRESS.COM)

En México existen diversas compañías dedicadas a la extrusión simple y conformado de metales, estas tienen capacidades de las prensas de extrusión, pudiendo producir perfiles de varios metros de largo, en una extensa variedad de aleaciones (http://extrusion.mexicored.com.mx/).

4.3 DESARROLLO

Módulo Part

Para este modelo las piezas se generan de la siguiente manera. El *tocho* o material a deformar se genera con un **modelo axisimétrico**, deformable, shell, usando un área de **dibujo de 0.8**, con las dimensiones mostradas en la figura 4.4. El punto en azul indica el origen.



FIGURA 4.4 TOCHO

Para el *dado o cámara de extrusión* se genera una pieza **deformable**, **axisimétrica**, **shell, con un área de dibujo de 1**, con filetes en los vértices centrales de la superficie izquierda de la herramienta de 75 E-3, y usando una línea formada por varios puntos con las siguientes coordenadas:

TABLA 4.1 PUNTOS PARA GENERAR LA CÁMARA

Punto	X	Y
1	0.25	-0.18
2	0.0866	-0.18
3	0.0666	-0.18
4	0.0666	-0.17
5	0.0666	-0.15
6	0.0666	-0.1
7	0.0999	-0.05
8	0.0999	0
9	0.0999	0.3
10	0.0999	0.31
11	0.2	0.41
12	0.25	0.41
13	0.25	-0.18



FIGURA 4.5 HERRAMIENTA

Módulo Property

En este módulo se crean dos materiales.

El primero tiene las siguientes propiedades:

- Nombre: Acero
- Densidad = 7800 Kg/m³ a 20 °C y 7640 Kg/m³ a 500 °C.
- Elásticas: módulo de Young = 215 GPa a 20 °C y 176 GPa a 500 °C y relación de Poisson = 0.3 para cada temperatura (aunque se presentan variaciones debidas al calentamiento, estas pueden considerarse despreciables para el modelo).
- Plásticas: Utilizar los datos que se muestran en la tabla 4.2.

Dato	Esfuerzo MPa	Deformación Plástica mm/mm	Temperatura °C
1	1400	0	20
2	1200	0	300
3	1050	0	400
4	900	0	500
5	600	0	600
6	400	0	650

TABLA 4.2 ESFUERZOS DE FLUENCIA A DISTINTAS TEMPERATURAS

Conductividad:

Dato	Conductividad J/sm°C	Temperatura °C
1	22	20
2	24	100
3	26	200
4	27	300
5	27	400
6	27	500

TABLA 4.3 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA

• Expansión térmica:

Dato	Coeficiente de expansión 1/°C	Temperatura °C
1	1E-5	20
2	1.15E-5	100
3	1.2E-5	200
4	1.22E-5	300
5	1.25E-5	400
6	1.29E-5	500

- Inelastic Heat Fraction = 0.9 (valor por defecto), dicho coeficiente indica la cantidad de calor que es generado por la deformación plástica.
- Calor específico = 460 J/Kg°C a 20 °C y 550 J/Kg°C a 500 °C.

El segundo material tiene las siguientes propiedades:

- Nombre: Aluminio
- Densidad = 2700 Kg/m³ a 20 °C y 2600 Kg/m³ a 500 °C.
- Elásticas: relación de Poisson = 0.3 para cada temperatura (aunque se presentan variaciones debidas al calentamiento, estas pueden considerarse despreciables para este modelo).

Dato	Módulo de Young [GPa]	Temperatura [°C]
1	68.9	21
2	66.1	93
3	63.4	149
4	59.9	204

TABLA 4.5 MÓDULO DE YOUNG EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA

• Plásticas: Utilizar los datos que se presentan en la tabla 4.6.

 TABLA 4.6 PROPIEDADES PLÁSTICAS DEL MATERIAL

Dato	Esfuerzo Pa	Deformación Plástica mm/mm	Temperatura °C
1	6000000	0	20
2	90000000	0.125	20
3	113000000	0.25	20
4	124000000	0.375	20
5	133000000	0.5	20
6	165000000	1	20
7	166000000	2	20
8	6000000	0	50
9	80000000	0.125	50
10	9700000	0.25	50
11	110000000	0.375	50
12	120000000	0.5	50
13	150000000	1	50
14	151000000	2	50
15	50000000	0	100
16	65000000	0.125	100
17	81500000	0.25	100
18	91000000	0.375	100
19	10000000	0.5	100
20	125000000	1	100

21	126000000	2	100
22	45000000	0	150
23	63000000	0.125	150
24	75000000	0.25	150
25	89000000	0.5	150
26	110000000	1	150
27	111000000	2	150
28	4000000	0	210
29	6000000	0.125	210
30	7000000	0.25	210
31	85000000	0.5	210
32	100000000	1	210
33	110000000	2	210
34	38000000	0	250
35	55000000	0.125	250
36	63000000	0.25	250
37	83000000	0.5	250
38	97000000	1	250
39	99000000	2	250
40	3000000	0	290
41	38000000	0.125	290
42	45000000	0.25	290
43	7000000	1	290
44	25000000	0	325
45	28000000	0.125	325
46	3000000	0.25	325
47	4000000	1	325

Conductividad:

Dato	Conductividad J/sm°C	Temperatura °C
1	204	20
2	225	300

• Expansión térmica:

TABLA 4.8 EXPANSIÓN TÉRMICA EN FUNCIÓN DE TEMPERATURA

Dato	Coeficiente de expansión 1/°C	Temperatura °C
1	2.1E-005	20
2	2.36E-005	100
3	2.45E-005	200
4	2.64E-005	400
5	2.85E-005	600

- Inelastic Heat Fraction = 0.9 (valor por defecto).
- Calor Especifico = 880 J/Kg°C.

Después de crear los dos materiales se genera una sección para el tocho que se llama *barra*, esta es sólida y homogénea, se le asocia el material *aluminio*. Se genera una segunda sección, que se llama *herramienta*, también es sólida y homogénea y esta se asocia al material *acero*. La primera sección se asigna al *tocho* y la segunda a la *herramienta*.

Módulo Assembly

En este módulo lo único que se realiza es llamar las piezas generadas, con la herramienta Instance Part. Nota: Las piezas fueron generadas con el fin de que coincidan en el ensamble sin necesidad de orientarlas de otra manera y se mantienen como dependientes. Esto tiene la finalidad de mallar las piezas y no el ensamble.



FIGURA 4.6 ENSAMBLE PARA EL MODELO DE EXTRUSIÓN

Módulo Step

En este módulo se generan los diversos pasos para el modelo.

- *Estabilización*: es dinámico, temperatura-desplazamiento, explícito. Su duración es de 1 s y se le asigna un factor de escalamiento de masa con un valor de 1E5.
- *Extrusión*: es dinámico, temperatura-desplazamiento, explícito. Su duración es de 10 s y se le asigna un factor de escalamiento de masa con un valor de 1E5. En la barra de menú se oprime Other > ALE Adaptative mesh Domain > Create > *Extrusión* (Paso 2) y se selecciona el *tocho*, dejando los valores por defecto.
- Remover el contacto: es dinámico, temperatura-desplazamiento, explícito. Su duración es de 0.1 s y se le asigna un factor de escalamiento de masa con un valor de 1E5.
- *Enfriamiento1*: es dinámico, temperatura-desplazamiento, explícito. Su duración es de 10 s y se le asigna un factor de escalamiento de masa con un valor de 4E4.

Módulo Interaction

La interacción se llama *fricción* y es del tipo contacto mecánico tangencial con un coeficiente de fricción, $\mu = 0.1$. Para la misma interacción se asignan propiedades térmicas, usando coeficientes de 1 y de 0.5, el primero indica el porcentaje de energía que se transforma en calor por efecto de la fricción; y el segundo corresponde al porcentaje de la energía que se transforma en calor y que se transmitirá a la superficie esclava.

Ya con la propiedad completamente definida se asignan a las superficies que tendrán contacto durante el proceso.

Este modelo requiere la generación de superficies para disipar el calor *film condition* y se crea para cada una de las piezas. Estas se definen durante el paso *Enfriamiento 1*, la primera se llama *película-herramienta*, es del tipo condición de película superficial, tiene un coeficiente convectivo de película con valor de 10 y una amplitud que se aplica al tiempo total del proceso, la cual se describe en la tabla 4.9, con una temperatura de referencia de 20 °C y se aplica en todo el contorno de la herramienta.

TABLA 4.9 AMPLITUD PARA EL COEFICIENTE DE PELÍCULA Y LA TEMPERATURA DE REFERENCIA

Dato	Tiempo	Amplitud
1	0	0
2	11.1	0
3	21.1	1

Para el tocho se realiza el mismo procedimiento, pero esta condición de película se llama *película-tocho*, tiene una temperatura de referencia de 200 °C y se asigna a las superficies exteriores del tocho.

Módulo Load

Aquí se generan las cargas, condiciones de frontera y campos de variables para que el sistema quede bien restringido. Para este modelo se generan una carga, siete condiciones de frontera y un campo de temperatura para cada pieza.

- Carga: se denomina *presión*, se aplica en el enfriamiento, tipo presión viscosa con magnitud 1E8 y amplitud instantánea, se aplica en las mismas superficies donde se aplicó la *film condition*.
- > Condiciones de frontera (se indica el nombre de la condición y sus propiedades).
- Eje de simetría: **XSYMM** se aplica sobre el eje de simetría del *tocho* y se crea en el paso inicial.

- *Empotramiento_Dado*: es de tipo **encastre**, se aplica en la base y superficie derecha de la herramienta.
- Descenso: V2 = -0.000125 m/s, se aplica en el eje superior del tocho durante el paso uno y se desactiva para el paso dos.
- Esquina: U1 = 0, se aplica sobre la esquina superior derecha del tocho en el paso inicial.
- *Descenso2*: V2 = -0.0249875 m/s, se aplica en la misma superficie que el descenso anterior, durante el paso 2 y se desactiva para el paso 3.
- Alto: V2 = 0 m/s, se emplea en la misma superficie donde se aplicaron los descensos, en el paso 3.
- *Empotramiento_Tocho*: es de tipo *encastre*, se aplica al eje inferior del tocho durante el paso 4.

Una vez aplicadas todas las condiciones de frontera, el manager de condiciones de frontera lucirá como en la figura 4.7.

 ✓ Alto ✓ Descenso ✓ Descenso ✓ Created ✓ Inactive ✓ Propagated ✓ P	d Move Left Move Righ
✓ Descenso Created Inactive	Move Righ
✓ Descenso2 Created Inactive	Move Righ
✓ Empotramient Created Propagated Propagate	2.5
✓ Empotramient ✓ Esquina Created Propaga	d Activate
Esquina Created Propagated Propagated Propagated Propagated	d Department
	d
XSimetria Created Propagated Propagated Propagated Propagated Propagated	d
ep procedure: Dynamic, Temp-disp, Explicit sundary condition type: Velocity/Angular velocity	

FIGURA 4.7 CONDICIONES DE FRONTERA CON TODAS LAS CONDICIONES APLICADAS AL MODELO

Campo: se denomina campo-herramienta y campo-tocho según la pieza a la cual se esté asignando, ambas se aplican en el paso inicial, tipo temperatura T_{herramienta} = 20 °C y T_{tocho} = 200 °C, y ambas tienen una distribución Direct specification.

Módulo Mesh

En este modelo se usará un tipo de elemento con capacidad para calcular desplazamientos y temperaturas, para realizarlo se coloca en pantalla la pieza a la que se le aplicará la malla.

La malla para el dado tiene las siguientes características:

- Tipo de elemento: librería explícita, orden geométrico lineal, familia couple temperature-displacement. Controles de elemento hourglass control se activa enhanced.
- Proceso de mallado: Estructurado y geometría predominantemente cuadrática.
- Tamaño del elemento: para el tocho 20E-3 y para la herramienta 11E-3.



FIGURA 4.8 PIEZAS MALLADAS MOSTRADAS EN ENSAMBLE

Módulo Job

En este módulo sólo se crea un archivo para análisis completo con el nombre *ExtDirM200*, m200 significa material a 200 °C.

Módulo Visualization

Los resultados que se obtienen son:

- Distribución de esfuerzos: mediante la visualización completa del proceso determinar en qué región se presenta el máximo absoluto en el nivel de esfuerzo para el *tocho* y para la *herramienta* a lo largo de todo el proceso; así mismo indicar a que paso de simulación Step corresponden los máximos encontrados. Obtener una figura de cada estado.
- Distribución de la temperatura:

- Graficar la temperatura nodal de superficie y el interior del *tocho* en la región indicada (figura 4.9).
- Figura de la escala cromática de distribución de temperatura cuando se presente el máximo absoluto en la herramienta, a lo largo de todo el proceso (acercamiento a los nodos de la *herramienta* que se vean afectados).
- Figura del instante donde se presenta el máximo absoluto de temperatura, a lo largo de todo el proceso (considerando temperatura del *tocho* y la *herramienta*).
- Video de todo el proceso mostrando el comportamiento de la temperatura, desde el inicio del paso uno hasta el final del paso 4.



FIGURA 4.9 NODOS EMPLEADOS PARA GRAFICAR LA TEMPERATURA NODAL SUPERFICIAL Y AL INTERIOR DEL TOCHO

- Energía interna total y cinética del modelo, se deben verificar para validar los factores de escalamiento de masa.
- Porcentaje de deformación plástica: Determinar el valor máximo absoluto durante el proceso de la deformación plástica, el nivel de esfuerzo asociado a este valor de deformación plástica y la temperatura en dicho instante (obtener una figura para cada variable). ¿El esfuerzo asociado a la deformación plástica máxima encontrado

durante este análisis coincide con el valor máximo de esfuerzo determinado durante la visualización de esfuerzos?

- Perfil de velocidades:
 - Campo de velocidades para el inicio de cada Step definido.
 - o Máxima velocidad de los nodos indicados (figura 4.10) al final del paso dos.
 - o Gráfica de la velocidad de dichos nodos a lo largo de todo el proceso.



FIGURA 4.10 ZONA DE LA MALLA SELECCIONADA PARA MEDIR LA VELOCIDAD DEL MATERIAL AL FINAL DEL PASO DE EXTRUSIÓN

 Visualización de la pieza sólida en corte de 180° con segmentos de 18° en posición isométrica, con visualizaciones al inicio del proceso y final de cada Step definido en el modelo (obtener una figura de cada visualización).

Actividad para el alumno

Esta actividad consiste en modificar el modelo a uno que usa una pieza analíticamente rígida para la *herramienta* y agregar un segundo enfriamiento más prolongado para analizar el comportamiento de la temperatura, así como hacer variaciones en el coeficiente de película para observar y analizar el efecto de este sobre los pasos de enfriamientos.

Modificaciones al modelo original:

- Módulo Part: construir la herramienta rígida con las mismas coordenadas de la herramienta deformable usando los puntos 1 a 11, respetar los filetes aplicados y agregar un nodo de referencia en (141.6E-03,-122.689E-03).
- Módulo Assembly: eliminar la herramienta deformable y agregar la rígida.
- **Módulo Step**: agregar un *Enfriamiento2*, dinámico, temperatura-desplazamiento, duración 20000 s, con un factor de escalamiento de masa con valor de 6E8.
- Módulo Interaction: se regenera la condición de contacto y se reasigna la superficie de película únicamente a las superficies del tocho, cambiando el coeficiente de película de 10 a 15 para la primera modificación sobre este coeficiente y de 15 a 100 para la segunda modificación (mantener el *Enfriamiento2* y generar un Job para cada uno de los cambios). Asegurar que el tiempo definido en la amplitud de los coeficientes de película corresponda para el tiempo con el *Enfriamiento2* agregado.
- Módulo Load: se reasignan las superficies asociadas con la presión a los contornos externos del tocho. Para la herramienta se reasigna el empotramiento al nodo de referencia de esta y se define una temperatura inicial de T = 20 °C. Se elimina el campo de temperatura creado para la herramienta.
- Módulo Mesh: verificar que la malla no haya sufrido modificaciones
- Módulo Job: En este módulo se generan los análisis para cada variación del modelo, se presenta una tabla describiendo la modificación del modelo y el nombre del análisis respectivo.

Variación	Tipo de variación	Nombre del análisis
1	Crear dado rígido	ExtDirRigido
2	Creación del segundo enfriamiento	ExtDirE2
3	Coeficiente de película 15	ExtDirP15
4	Coeficiente de película 100	ExtDirP100

TABLA 4.10 VARIACIONES DEL MODELO

- Obtenga:
 - Distribución de esfuerzos: determinar si los modelos deformables y con el dado rígido son comparativos, mediante el análisis del nivel máximo de esfuerzo en el tocho, siga la misma metodología que en la visualización del modelo original.
- Distribución de la temperatura:
 - Graficar la temperatura nodal de superficie y el interior del tocho en la región indicada (figura 4.11), para los pasos uno a cuatro cuando el coeficiente de película sea 10; para todo el proceso, cuando el coeficiente de película sea 15 y 100.



FIGURA 4.11 NODOS DE LOS CUALES SE OBTIENE LA GRÁFICA DE TEMPERATURA

- Figura del instante donde se presenta el máximo absoluto de temperatura a lo largo de todo el proceso.
- Video de todo el proceso mostrando el comportamiento de la temperatura desde el inicio del paso 1 hasta el final del paso 5.
- Deformación logarítmica de los mismos nodos donde se obtuvo el perfil de temperatura a lo largo de todo el proceso.

Conclusiones

¿Qué efecto causó el uso de la herramienta rígida en el modelo?

¿Qué modelo es más adecuado para simular el proceso? Considere que se necesita diseñar todo el dispositivo para este tipo de extrusión.

¿Qué efectos causa el coeficiente de fricción usado para este modelo?

Con base a las curvas de enfriamiento durante el paso *Enfriamiento2* (véase Modificaciones al modelo original, módulo **Step**) ¿Qué puede decir del efecto que tiene el coeficiente de película sobre el modelo y sobre el significado físico de este?

• Conclusión opcional:

En el modelo con herramienta rígida en condiciones originales (**Film Condition** = 10) varíe el orden de magnitud del factor de escalamiento de masa y observe el comportamiento de las curvas de energía ¿Se afectan por la modificación de este factor?, ¿son sensibles a dicho cambio?

PRÁCTICA 5

EXTRUSIÓN INVERSA

5.1 OBJETIVOS

- Modelar el proceso de extrusión inversa para piezas axisimétricas.
- Estudiar el efecto de emplear diferentes tipos de mallas aplicadas al mismo modelo.
- Usar y presentar las ventajas del remallado automático ALE.

5.2 INTRODUCCIÓN

La extrusión inversa también es conocida como extrusión hacia atrás. La principal característica de este proceso es la posición en la que se coloca el dado, este va montado sobre el pistón y no en el recipiente, produciendo que el material se desplace a través del claro entre el recipiente y el pistón, obligando a que el flujo del material sea contrario al desplazamiento del dado.

El hecho de que el tocho no presente movimiento relativo respecto a la cámara donde se está llevando a cabo el proceso, provoca que el fenómeno de fricción no aparezca y consecuentemente la carga respecto al proceso de extrusión directa sea menor.

Los principales problemas asociados al proceso son: la menor rigidez del pistón hueco o de menor sección, según sea el caso, la dificultad de sostener el producto final cuando ha salido del recipiente y el límite de longitud de 4 a 5 m (dependiendo de la ductilidad del material) (Groover, 1993).



FIGURA 5.1 ESQUEMA DE EXTRUSIÓN INVERSA PARA PRODUCIR PERFILES SÓLIDOS. (GROOVER, 1993)



FIGURA 5.2 EJES PARA ROTOR DE HELICÓPTERO, MODELO CH46/CH47 COMPAÑÍA ELLWOOD (WWW.ELLWOODTEXASFORGE.COM)



FIGURA 5.3 CÁMARA PARA COMPRESORES, ACERO INOXIDABLE 410, 800 LIBRAS DE PESO, COMPAÑÍA ELLWOOD (WWW.ELLWOODTEXASFORGE.COM)

Este proceso es recomendable para piezas de poca extensión y un perfil sencillo como las mostradas en las imágenes 5.2 y 5.3, así como cuando se dispone de maquinaria con

poca potencia, ya que este proceso requiere menos carga que la extrusión directa. Es usado ampliamente para la extrusión de tubos sin costura y perfiles huecos de poca extensión, por ejemplo tanques de buceo, ollas de presión, perfiles para tarjas y en general, cualquier perfil que se requiera obtener sin costuras.

En México algunas empresas están enfocadas a la extrusión inversa (www.olx.com.mx).

5.3 DESARROLLO

Módulo Part

Para este modelo se necesitan tres piezas independientes, un *tocho*, una *cámara* y un *punzón*.

El *tocho* se genera con un modelo **axisimétrico**, **deformable**, con un tamaño de área de dibujo de 0.1 y las siguientes medidas, tomando como origen el punto grueso.





La *cámara* se genera como una pieza **analíticamente rígida, axisimétrica**, con área de dibujo de 0.1, con un filete de 1 mm y usando una línea formada por los siguientes puntos:

Punto	X	Y
1	16E-3	-1E-3
2	16E-3	30E-3
3	20E-3	30E-3

TABLA 5.1 PUNTOS PARA GENERAR LA CÁMARA

El nodo de referencia que le corresponde a esta pieza tiene por coordenadas (0, 20e-3).



FIGURA 5. 5 CÁMARA

El *punzón* se genera con un modelo axisimétrico, analíticamente rígido con un área de dibujo de 0.1, un filete de 1 mm y líneas formadas por los siguientes puntos:

TABLA 5.2 PUNTOS PARA GENERAR EL PUNZÓN

Punto	X	Y
1	0	8E-3
2	13.5E-3	8E-3
3	13.5E-3	37.17E-3

El nodo de referencia que le corresponde a esta pieza tiene por coordenadas (0, 20e-3).



FIGURA 5.6 PUNZÓN

Módulo Property

En este módulo se crea un nuevo material que tendrá las siguientes propiedades:

- Nombre: *Aluminio*
- Densidad = 2800 Kg/m³
- Elásticas: módulo de Young = 70 GPa y relación de Poisson = 0.3.
- Plásticas: Se utilizan los valores de la tabla 5.3.

Dato	Esfuerzo	Deformación Plástica	Dato	Esfuerzo	Deformación Plástica
	Pa	mm/mm		Pa	mm/mm
1	150000000	0	12	252130000	0.23
2	170520000	0.03	13	256200000	0.25
3	188090000	0.05	14	260010000	0.27
4	200650000	0.07	15	263610000	0.29
5	210570000	0.09	16	267000000	0.31
6	218840000	0.11	17	270230000	0.33
7	225970000	0.13	18	273290000	0.35
8	232260000	0.15	19	276260000	0.37
9	237910000	0.17	20	279030000	0.39
10	243050000	0.19	21	280390000	0.4
11	247760000	0.21			

 TABLA 5.3 PROPIEDADES PLÁSTICAS DEL MATERIAL

Después de crear el material, se genera una sección que será sólida y homogénea a la cual se le asocia el material creado. Por último se asigna la sección al *tocho* que es la única pieza deformable del modelo.

Módulo Assembly

En este módulo lo único que se realiza es agregar las piezas generadas. Nota: las piezas fueron generadas con el fin de que coincidan en el ensamble sin necesidad de orientarlas de otra manera y se mantienen como dependientes, y de esta manera mallar las piezas y no el ensamble.



FIGURA 5.7 ENSAMBLE PARA EL MODELO DE EXTRUSIÓN INVERSA

Módulo Step

En este módulo se genera un paso que tiene por nombre *extrusion*, este será **dinámico explícito** y tendrá un tiempo de 0.5 s, debe **activarse la no linealidad geométrica**, y usar un **factor de escalamiento de masa** de 0.1E6, con el fin de hacer más eficiente el cálculo.

Módulo Interaction

La interacción lleva por nombre *friccion*, es de tipo contacto, mecánico de tipo tangencial, con coeficiente de fricción μ = 0.1.

Esta interaccion debe de aplicarse a las superficies donde el punzón y el tocho tengan contacto, así como en la zona donde se tocan la cámara y el tocho; la primera lleva por nombre *punzon-tocho* y la segunda *camara-tocho*. Siempre se asignarán como superficies maestras a las piezas analíticamente rígidas, y superficies esclavas a las deformables.



FIGURA 5.8 ASIGNACIÓN DE LA INTERACCIÓN ENTRE LA CÁMARA Y EL TOCHO

Módulo Load

Para definir el modelo se requieren las siguientes condiciones de frontera:

- Base del *tocho*: U2 = 0.
- Desplazamiento del *punzon*: U2 = -0.007, con amplitud definida (ver tabla 5.4).
- Eje de simetría: U1 = 0
- Empotramiento: *camara*.
- Restricción en el plano xz del *punzon*: U1 = UR3 = 0.

 TABLA 5.4
 DATOS PARA LA AMPLITUD

Dato	Tiempo/Frecuencia	Amplitud %
1	0	0
2	0.5	1

Módulo mesh

En este módulo, como primera actividad se cambia la forma de mallar, de ensamble a pieza. Después de seleccionar la pieza (*tocho*), se elige un mallado estructurado con elementos cuadráticos y se verifica que en la familia se encuentre seleccionada la opción

axisymmetric stress. En el menú principal en el comando seed se selecciona part, se aplica un tamaño aproximado del elemento de 1.3E-3 y se malla la pieza.



FIGURA 5.9 MALLA ESTRUCTURADA APLICADA AL TOCHO

Una vez creada la malla estructurada se debe ir al **módulo Job** y correr un análisis con esta malla.

La segunda malla consiste en una malla direccionada, y para generarla se debe borrar la malla estructurada. El primer paso para generar la malla direccionada es crear una partición en el tocho desde el dibujo, de acuerdo a la figura 5.10.





La partición genera dos regiones, la inferior tiene por nombre *region1* y la superior *region2*.



FIGURA 5.11 PARTICIÓN EN LA CARA DEL TOCHO

En la línea superior horizontal de la *region 2* del tocho se hace una partición con la que se busca tener una sección de 8 mm al centro y 4 mm al final, con lo que se generan secciones en todo el contorno del tocho.



FIGURA 5.12 RESULTADO DE LAS PARTICIONES GENERADAS, INDICANDO EL NÚMERO QUE LE CORRESPONDE A CADA UNA

Cada sección tendrá diferente cantidad de elementos, a las secciones 2 y 4 se les asignarán elementos por tamaño con una medida de 0.13E-3, y a las secciones restantes se les asignarán elementos por cantidad de acuerdo a la tabla 5.5.

Sección	Cantidad elementos
1	30
3	8
5	9
6	9
7	30

 TABLA 5.5 CANTIDAD DE ELEMENTOS POR SECCIÓN

Según las instrucciones anteriores el tocho tiene elementos como en la figura 5.13



FIGURA 5.13 TOCHO CON LOS EJES DIVIDIDOS CON LA HERRAMIENTA ELEMENTOS POR EJE

Las propiedades de la malla para ambas regiones son:

- Librería estándar.
- Orden geométrico lineal.
- Familia axisimétrica.
- Estructurada.
- Elementos predominantemente cuadrangulares.

Al mallar como pieza puede ocurrir un error en la *region 1*, figura 5.14, si esto ocurre se debe mallar por regiones, iniciando en la *region 1*; de esa forma se corrige el error y se obtiene la malla mostrada en la figura 5.15.


FIGURA 5.14 MALLADO DIRECCIONADO USANDO LA FUNCIÓN MESH PART



FIGURA 5.15 MALLADO DIRECCIONADO

Una vez creada la malla direccionada se debe ir al **módulo Job** y correr un análisis con esta malla.

Módulo Job

Se crea un **Job** para cada malla, los nombres de cada uno de estos son:

- Para la malla estructurada: *extMS*.
- Para la malla direccionada: *extMD*.

Cada uno se somete a análisis.

Módulo Visualization

En cada modelo se obtendrán:

- Visualización de la malla deformada con escala de esfuerzo de von Mises.
- Visualización de porcentaje de deformación plástica.
- Gráfica de fuerza de reacción en el punzón y explicación del comportamiento de la curva obtenida.
- Curva comparativa de energía interna y energía cinética, para verificar la validez del escalamiento de masa.
- Visualización de las piezas deformables en 360° y de las superficies analíticamente rígidas en 90°.

Nota: sólo se obtendrán los resultados completos de los modelos que previo análisis de la malla deformada, se consideren como aceptables.

En cada modelo que presente deformación excesiva de elementos o aborte por esta razón se implementará la herramienta de **remallado ALE** en el módulo de **Step**, con una frecuencia de 5 y 10 remallados por incremento, y remallados iniciales de 100. A esta modificación se le asigna un nuevo **Job** cuyo nombre es *extMSALE* (malla estructurada) o *extMDALE* (malla direccionada), según el modelo que se haya modificado.

Actividad para el alumno

Con el modelo que presente los resultados más lógicos, según el análisis hecho, se deberán crear análisis nuevos para cámaras de diferentes tamaños.

Cámara	Reducción en altura [%]	Altura [mm]
1	25	22.5
2	50	15
3	66	10

TABLA 5.6 REDUCCIONES PARA LAS CÁMARAS

Para el modelo con cada cámara se obtendrá:

- Visualización de malla deformada con escala de von mises.
- Fuerza de reacción del punzón y comparación entre los modelos con cámara reducida y el original.
- Curva fuerza de reacción máxima en el punzón vs. tamaño de la cámara.
- Curva comparativa de energía interna y cinética para cada modelo.
- Curva de porcentaje de deformación máxima en el punto donde se presenta el máximo nivel en el plano principal vs. tiempo (use la escala que se muestra en la visualización).

Con base en las curvas y datos obtenidos, conteste:

- ¿La malla deformada sufre variaciones respecto al modelo original al disminuir el tamaño de la *camara*?
- Explique cómo se ve afectada la curva fuerza resultante vs. tiempo, según la reducción de la *camara*, ¿lo que se observa es algo esperado?
- ¿Qué relación tiene la fuerza de reacción máxima con el tamaño de la camara?
- En términos de energía, ¿los modelos son válidos?
- Según lo visto en el porcentaje de deformación máximo, ¿qué puede concluir?

PRÁCTICA 6

EMBUTIDO AXISIMÉTRICO

6.1 OBJETIVOS

- Mostrar el modelado del proceso de embutido profundo.
- Evaluar distintos tamaños de malla (optimización de la malla).
- Modelar y simular un proceso de reembutido.

6.2 INTRODUCCIÓN

El embutido es una operación de conformado de láminas metálicas que se usa para hacer piezas con forma de copa y otras formas huecas más complejas. Se realiza colocando una lámina de metal sobre la cavidad de un dado y empujando el metal hacia la cavidad de este con un punzón. La forma debe aplanarse contra el dado por un sujetador de formas.

El punzón aplica una fuerza F hacia abajo para realizar la deformación del metal y el sujetador de formas aplica una fuerza de sujeción hacia abajo. Conforme el punzón se desliza hacia abajo, hasta su posición final, la pieza de trabajo experimenta una serie compleja de esfuerzos y deformaciones al tomar gradualmente la forma definida por el punzón y la cavidad del dado.



FIGURA 6.1 EJEMPLOS DE PIEZAS OBTENIDAS MEDIANTE EMBUTIDO [1]

6.3 DESARROLLO

Módulo Part

En el **módulo Part** se generan los componentes del troquel (*matriz, pisador y punzon*) y la *placa* que será troquelada.

Para la *placa* se generará un modelo axisimétrico, deformable, con un tamaño aproximado de área de dibujo de 0.5; se dibujará un **Sketch** con los siguientes puntos: (0,0) y (0.1, 8.2 e-4).



Para la *matriz* se generará un modelo axisimétrico, analíticamente rígido, con un tamaño aproximado de área de dibujo de 0.5; en el **Sketch** se dibujará con los siguientes puntos:

X	Y
0.05125	-0.060
0.05125	-0.005

TABLA 6.1 PUNTOS PARA GENERAR LA PRIMERA RECTA DE LA MATRIZ

A continuación se genera un arco de circunferencia con los siguientes puntos:

	TABLA 6.2 PUNTOS PARA GENERAR EL	ARCO DE CIRCUNFERENCIA DE LA MATRIZ
--	----------------------------------	-------------------------------------

	X	Y
Centro	0.05625	-0.005
Punto 1	0.05125	-0.005
Punto 2	0.05625	0

Después se genera una segunda recta con los siguientes puntos:

TABLA 6.3 PUNTOS PARA GENERAR LA SEGUNDA RECTA DE LA MAT	RIZ
--	-----

x	Y
0.05625	0
0.1	0

Una vez terminada la *matriz* se asigna un nodo de referencia en las coordenadas (0.1, - 0.05).



FIGURA 6.3 MATRIZ

Para el caso del *pisador* se generará un modelo axisimétrico, analíticamente rígido, con un tamaño aproximado de 0.5; en el **Sketch** se dibujará una recta con los siguientes puntos:

x	Y
0.1	8.2e-4
0.0563	8.2e-4

A continuación se generará un arco de circunferencia con los siguientes puntos:

	X	Y
Centro	0.05630	8.7e-4
Punto 1	0.05630	8.2e-4
Punto 2	0.05625	8.7e-4

TABLA 6.5 PUNTOS PARA GENERAR EL ARCO DE CIRCUNFERENCIA DEL PISADOR

Y una segunda recta con los siguientes puntos:

X	Y
0.05625	8.7e-4
0.05625	0.06

Una vez terminado el *pisador* se genera el nodo de referencia en las coordenadas (0.1, 0.05).



FIGURA 6.4 PISADOR

Por último, para el *punzon* se generará un modelo axisimétrico, analíticamente rígido, con un tamaño aproximado de 0.5; en el **Sketch** se dibujará una recta con los siguientes puntos:

 TABLA 6.7 PUNTOS PARA GENERAR LA RECTA DEL PUNZÓN

x	Y
0.05	0.06
0.05	2.250782E-3

A continuación se generará un arco de circunferencia con los siguientes puntos:

	X	Y
Centro	0	1.001
Punto 1	0.05	2.250782e-3
Punto 2	0	0.001

 TABLA 6.8 PUNTOS PARA GENERAR EL ARCO DE CIRCUNFERENCIA DEL PUNZÓN

Para finalizar el **Sketch** se hará un filete entre el arco de circunferencia y la recta de 0.013 de radio. Una vez terminado el *pisador* se signa un nodo de referencia en las coordenadas (0, 0.05).



FIGURA 6.5 PUNZÓN

Módulo Property

En este módulo se crea un nuevo material que tendrá las siguientes propiedades:

Elásticas: módulo de Young = 2.1 GPa, relación de Poisson = 0.3.

Plásticas: Utilizar los valores de la tabla 6.9

TABLA 6.9 PROPIEDADES PLÁSTICAS

Esfuerzo Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación
----------------------	----------	-------------	----------	-------------

Ра	Plástica	Ра	Plástica	Ра	Plástica
91290000	0	261300000	0.047301	431300000	0.4573
101300000	0.00021052	271300000	0.05616	441300000	0.50696
111300000	0.0005269	281300000	0.066236	451300000	0.5607
121300000	0.00097685	291300000	0.07765	461300000	0.61881
131300000	0.001592	301300000	0.090516	471300000	0.6814
141300000	0.002409	311300000	0.1049	481300000	0.7489
151300000	0.003467	321300000	0.12114	491300000	0.8214
161300000	0.004812	331300000	0.1392	501300000	0.89928
171300000	0.006492	341300000	0.15919	511300000	0.9827
181300000	0.0085618	351300000	0.1814	521300000	1.072
191300000	0.01108	361300000	0.20588		
201300000	0.01411	371300000	0.2329		
211300000	0.01772	381300000	0.26252		
221300000	0.021991	391300000	0.29502		
231300000	0.02699	401300000	0.33054		
241300000	0.032819	411300000	0.36929		
251300000	0.03956	421300000	0.41147		

Después de crear el material se genera una sección que será sólida y homogénea, y a la cual se le asociará el material creado. Por último, se asignará esta sección en la *placa* que es la única pieza deformable del modelo.

Módulo Assembly

En este módulo la única acción que se realizará será llamar las piezas generadas. Nota: Las piezas fueron generadas con el fin de que coincidan en el ensamble sin necesidad de orientarlas de otra manera y se mantienen como dependientes, para mallar las piezas y no el ensamble.



FIGURA 6.6 ENSAMBLE DEL MODELO DE EMBUTIDO PROFUNDO

Módulo Step

En este módulo se generarán tres pasos para el proceso. Estos serán estáticos generales.

- Paso 1: mover el pisador hacia la lámina. Este paso durará un tiempo de 1 s y tendrá activada la no linealidad geométrica. Número de incrementos: 100. En la sección de incrementation usar los siguientes parámetros: Inicial: 1; mínimo: 1; máximo: 1. Asignar el nombre de *moverpisador*.
- Paso 2: Aplicar fuerza en el pisador y liberar el desplazamiento anterior. Este paso durará un tiempo de 1 s y tendrá activada la no linealidad geométrica. Número de incrementos: 100. En la sección de incrementation usar los siguientes parámetros: Inicial: 1; mínimo: 1e-5; máximo: 1. Asignar el nombre de aplicarfuerza.
- Paso 3: mover el punzón hacia abajo. Este paso durará un tiempo de 1 s y tendrá activada la no linealidad geométrica. Número de incrementos: 300. En la

sección de **incrementation** usar los siguientes parámetros: Inicial: 0.01; mínimo: 1e-6; máximo: 1. Asignar el nombre de *moverpunzon*.

Módulo Interaction

Se crearán dos propiedades de interacción, ambas serán interacciones con fricción. Dentro del **comportamiento tangencial** se elige la opción **penalty**, la primera tendrá un coeficiente de fricción de 0.1 (asignarle el nombre de *contacto01*), y la segunda, un coeficiente de fricción de 0.25 (asignarle el nombre *Contacto025*).

Se generarán tres interacciones, la primera será entre la lámina y la matriz (asignarle el nombre de *matrizPlaca*), la matriz será la superficie maestra, mientras que la superficie inferior de la lámina será la superficie esclava y se le asignará *contacto01* como propiedad de interacción.

Para continuar se generará la interacción entre el pisador y la lámina (asignarle el nombre de *PisadorPlaca*), el pisador será la superficie maestra, y la pieza superior de la lámina será la superficie esclava. Se le asignará *contacto01* como propiedad de la interacción.

Para finalizar se generará la interacción entre el punzón y la lámina (asignarle el nombre de *PunzonPlaca*), el punzón será la superficie maestra, y la lámina será la superficie esclava. Se le asignará *contacto025* como propiedad de interacción.

En este mismo módulo se asignará un valor de inercia a las piezas analíticamente rígidas. En el menú principal, en la pestaña **Special**, se elige la opción **Inertia** y se presiona la opción **Create**. Se desplegará una ventana en la cual se seleccionará el tipo **Point mass/inertia**. Se da continuar y se seleccionan los nodos de referencia de las piezas analíticamente rígidas.



Módulo Load

En este módulo se generarán las condiciones de frontera:

- Desplazamiento y rotación (U1=0) se restringe el eje vertical de la placa, se activa en el paso *moverpisador* y se deja activado durante todo el proceso (asignarle el nombre de *SimetriaPlaca*).
- Desplazamiento y rotación. (U1=U2=UR3=0) se restringe el punto de referencia de la matriz, se activa desde el paso *moverpisador* y se deja activado durante todo el análisis (asignarle el nombre de *EmpotramientoMatriz*).
- Desplazamiento y rotación. (U1=U2=UR3=0) se restringe el punto de referencia del punzón, se activa en el paso *moverpisador* y se modifica en el paso *moverPunzon*. Para modificar una condición de frontera se hace desde el manager, U2=-0.06, y los demás valores se mantienen igual (asignarle el nombre *BCPunzon*).
- Desplazamiento y rotación. (U1=UR3=0, U2=-1.75e-8) aplicado sobre el nodo de referencia del pisador, se activa en el paso *moverpisador* y se modifica en el paso *AplicarFuerza*, quitando la selección en U2, los demás valores se mantienen igual (asignarle el nombre *BCPisador*).

Se asignará una carga en el pisador:

5. En el paso *AplicarFuerza*, se aplicará una fuerza concentrada en la dirección 2 en el punto de referencia del pisador, con una magnitud de -100000 N (asignarle el nombre *CargaPisador*).



FIGURA 6.8 CONDICIONES DE FRONTERA DEL MODELO Y CARGA APLICADA SOBRE EL PISADOR

Módulo Mesh

En este módulo, como primera actividad se cambia el modo de mallar, de ensamble a pieza. Después de seleccionar la *placa*, en el menú principal en la ventana **Mesh** se selecciona **Controls** y se elige un mallado estructurado. Una vez más en el menú principal, en la herramienta de **Seed**, se selecciona **Part**, como tamaño aproximado se pone 0.0024, para finalizar en la misma opción **Mesh** se selecciona **Part** y se da clic en el *disco* para seleccionar ese elemento a mallar.

FIGURA 6.9 LÁMINA MALLADA CON UN TAMAÑO DE ELEMENTO DE 0.0024

Módulo Job

En este módulo sólo se crea un **Job**, al cual se le asignará el nombre de *Embutido*; una vez creado se somete a análisis. Después de esta primera simulación, se creará un nuevo **Job**, con el nombre de *EmbutidoRemallado0012*, para esto se regresará al módulo de **Mesh** y en la ventana de **Seed > Part** se asignará el valor de 0.0012 para el tamaño del elemento, y se someterá a un nuevo análisis.



Módulo Visualization

En este módulo se verá el resultado final del modelo, inmediatamente se analizará cuál es la fuerza de reacción en el nodo de referencia de la *matriz* y el *punzon*.



FIGURA 6.11 EMBUTIDO PROFUNDO CON UN MALLADO DE 0.0025 AL INICIO DEL PROCESO



FIGURA 6.12 EMBUTIDO PROFUNDO CON UN MALLADO DE 0.0025 AL FINAL DEL PROCESO



FIGURA 6.13 EMBUTIDO PROFUNDO CON UN MALLADO DE 0.0012 AL FINAL DEL PROCESO



FIGURA 6.14 FUERZA DE REACCIÓN PARA UN MALLADO DE 0.0025



FIGURA 6.15 FUERZA DE REACCIÓN PARA UN MALLADO DE 0.0012

En las figuras 6.14 y 6.15 se muestra la gráfica de la fuerza de reacción que se produce en la lámina, a diferencia de la gráfica 6.15, en la gráfica 6.14 se muestran los cambios de fuerza debidos a la cantidad de nodos que se tienen en la malla. En la gráfica 6.15 el número de nodos es mayor, por lo que los cambios de fuerza que la simulación muestra son menores debido a que la distancia entre nodos es menor; en cambio en la gráfica 6.14 los cambios de fuerza son mayores porque la distancia entre nodos es mayor y al punzón le toma una mayor fuerza mover a cada nodo.

Actividad complementaria

- Realizar un gráfico que muestre la fuerza aproximada de reacción pico contra el tamaño de elemento en la malla de los Jobs anteriores.
- A continuación se regresará al módulo Step para crear un nuevo paso que será nombrado *RetirarPunzon*, este paso durará un tiempo de 1 s y tendrá activado la no linealidad geométrica, como tiempo inicial tendrá 0.1 s, como mínimo 1e-6 y como máximo 1, tendrá 300 incrementos.
- Una vez creado el paso *RetirarPunzon*, se pasará al módulo Load y se modificará la condición de frontera *Punzon* en este paso, cambiando la dirección U2=0.06, para retirar la herramienta.

• Se regresará al Módulo Part y se crearán dos nuevas herramientas *Punzon2* y *matriz2*.

Para *Punzon2* se generará un modelo axisimétrico, analíticamente rígido, con un tamaño aproximado de 0.5, en el **Sketch** se dibujará una recta con los siguientes puntos:

TABLA 6.10 PUNTOS PARA GENERAR LA RECTA DEL PUNZÓN2

X	Y
0.028	-0.12
0.028	-0.065

A continuación se generará un arco de circunferencia con los siguientes puntos:

	X	Y
Punto 1	0	-0.0625
Punto 2	0.028	-0.065
Punto 3	0.015	-0.0628

TABLA 6.11 PUNTOS PARA GENERAR EL ARCO DE CIRCUNFERENCIA DEL PUNZON2

Para finalizar el **Sketch**, se hará un filete entre el arco de circunferencia y la recta de 0.004 de radio. Una vez terminado el *Punzon2* se deberá generar el nodo de referencia de la pieza, el cual estará en el punto (0, -0.10).



FIGURA 6.16 PUNZÓN2

Para la pieza *matriz2* se generará un modelo axisimétrico, analíticamente rígido, con un tamaño aproximado de 0.5; en el **Sketch** se dibujará una recta con los siguientes puntos:

TABLA 6.12 PUNTOS PARA GENERAR LA RECTA DE LA MATRIZ2

X	Y
0.05	0.06
0.05	14.694E-3

A continuación se generará un arco de circunferencia con los siguientes puntos:

	X	Y	
Centro	37E-3	14.694E-3	
Punto 1	50E-3	14.694E-3	
Punto 2	39.978E-3	2.04E-3	

TABLA 6.13 PUNTOS PARA GENERAR EL PRIMER ARCO DE CIRCUNFERENCIA DE LA MATRIZ2

Posteriormente se generará la forma del *Punzon2*, para que coincida cuando este suba. Se generará un arco de circunferencia con los siguientes puntos:

	X	Y	
Punto 1	0	0.0155	
Punto 2	0.031	0.013	
Punto 3	0.015	0.0153	

TABLA 6.14 PUNTOS PARA GENERAR EL SEGUNDO ARCO DE CIRCUNFERENCIA DE LA MATRIZ2

Después se generará una recta vertical entre el punto (0.031, 0.013) y el punto (0.031,7.689E-3). Se hará un filete entre esta recta y el segundo arco de circunferencia con un radio de 0.002.

A continuación se generará el último arco de circunferencia con los siguientes puntos:

	X	Y
Punto 1	31E-3	7.689E-3
Punto 2	39.978E-3	2.04E-3
Punto 3	33.227E-3	4.132E-3

TABLA 6.15 PUNTOS PARA GENERAR EL TERCER ARCO DE CIRCUNFERENCIA DE LA MATRIZ2

Para terminar la *matriz2* se hace un filete entre la segunda recta y el tercer arco de circunferencia con un radio de 0.006. Por último se asigna un punto de referencia en (0,0.02).



FIGURA 6.17 MATRIZ2

• Una vez generadas las dos nuevas herramientas, se pasa al módulo **Assembly** y se ensamblan las nuevas herramientas.



FIGURA 6.18 ENSAMBLE 2

A continuación se regresará al módulo Step para crear tres nuevos pasos, el primero será nombrado *moverMatriz2* con un tiempo de 1 s y tendrá activada la no linealidad geométrica, como tiempo inicial tendrá 1, como mínimo 1e-5 y como máximo 1.

El segundo paso será nombrado *moverPunzon2* con un tiempo de 1 s y tendrá **activado la no linealidad geométrica**, como tiempo inicial tendrá 0.1, como mínimo 1e-9 y como máximo 1. Tendrá 400 incrementos.

Por último, el tercer paso generado se nombrará *RetirarHerramientas* con un tiempo de 1 s y tendrá **activada la no linealidad geométrica**, como tiempo inicial tendrá 0.1, como mínimo 1e-6 y como máximo 1. Tendrá 300 incrementos.

 En el módulo Interaction, se generarán dos nuevas interacciones, la primera será entre la *placa* y la *matriz2* (asignarle el nombre de *PlacaMatriz2*), la *matriz2* será la superficie maestra y la superficie superior de la *placa* será la superficie esclava. Se le asignará *contacto01* como propiedad de interacción y estará activada desde el paso *moverMatriz2*.

Para continuar se generará la interacción entre el *Punzon2* y la *placa* (asignarle el nombre de *Punzon2Placa*), el *Punzon2* será la superficie maestra, y la pieza inferior de la *placa* será la superficie esclava. Se le asignará *contacto025* como propiedad de la interacción y estará activada desde el paso *moverPunzon2*.

Para finalizar en el primer manager, se editará la interacción *PunzonPlaca*, que a partir del paso *moverMatriz2*, se desactivará.

- En el módulo Load se crearán las condiciones de frontera para las nuevas herramientas:
 - Desplazamiento y rotación. (U1=UR3=0, U2=-0.06) asignado al punto de referencia de la matriz, se activa desde el paso *moverMatriz2* (asignarle el nombre de *matriz2*), en el paso *moverPunzon2* se modifica y se desactiva la opción U2, para finalizar en el paso *RetirarHerramientas* se modifica otra vez y en U2 se asigna el valor 0.06.
 - Desplazamiento y rotación. (U1=UR3=0, U2=0.017) se restringe el punto de referencia del *Punzon2*, se activa en el paso *moverPunzon2* (asignarle el nombre *Punzon2*), se modifica en el paso *RetirarHerramientas*, U2=-0.017, y los demás valores se mantienen igual.
 - 3. Se asignará una fuerza en la m*atriz2* (asignarle el nombre *FuerzaMatriz2*) en el nodo de referencia de esta herramienta con un valor de -76000 N en la

dirección 2, esta fuerza estará activa desde el paso *moverPunzon2* y se desactivará en el paso *RetirarHerramientas*.



FIGURA 6.19 CONDICIONES DE FRONTERA DEL ENSAMBLE 2

• Se generará un nuevo **Job**, con el nombre de *Embutido2Direcciones* que se someterá a análisis, y se verán los resultados en el módulo **Visualization**.

PRÁCTICA 7

EMBUTIDO 3D

7.1 OBJETIVOS

- Modelar el embutido 3D de una tarja.
- Hacer uso de herramientas deformables.
- Hacer uso de elementos Shell 3D.
- Comparar resultados entre modelos con herramientas deformables y herramientas analíticamente rígidas.

7.2 INTRODUCCIÓN

La elaboración de elementos embutidos de acero es una de las operaciones más importantes en la industria de manufactura de producción en serie. Este procedimiento logra la obtención de piezas de gran calidad, con buenos acabados y homogeneidad.

El proceso de embutido está involucrado en la fabricación de diversos elementos de uso domésticos, como lo son las ollas de cocina, las latas y las tarjas. Generalmente el material utilizado en la fabricación de estos elementos es el acero inoxidable, debido a sus buenas propiedades mecánicas, la resistencia a la corrosión y el buen aspecto y acabado final con el que las piezas quedan al terminar el proceso.

El buen resultado del proceso de embutido depende no sólo del cuidado con que se efectúa el proceso, sino también de las características del acero utilizado. Hoy en día existen las series 200 y 300 de acero inoxidable, entre las cuales se encuentran gran variedad de aceros adecuados para el proceso. La combinación de su bajo esfuerzo de cedencia y un alto alargamiento son factores importantes en la optimización de operaciones de embutido. Dentro de los parámetros involucrados en el embutido se

encuentran la velocidad, ya que con esta se regula el flujo de material y el espesor de la pieza final, y la fricción entre elementos.

Cuanto más complicadas sean las formas y más profundidad sea necesaria, más etapas de embutido serán incluidas en el proceso. La forma es un factor importante dentro del modelado, ya que a partir de esta puede complicarse o simplificarse. El modelar procesos de piezas sencillas simplifica considerablemente los cálculos, debido a las condiciones de simetría del elemento, las cuales se pueden tomar en cuenta para modelar tan solo una pieza del elemento y extrapolar los resultados, como es el caso de esta práctica, en donde se desea modelar el proceso de embutido de una tarja cuadrada, considerando un cuarto de simetría del elemento.

7.3 DESARROLLO

Módulo Part

Para esta práctica se generan dos modelos, un modelo 3D con herramientas deformables y un modelo 3D con herramientas discretamente rígidas. En el **Módulo Part** se generan las dos piezas correspondientes a la herramienta y el material a deformar.

Las herramientas para ambos modelos se generan de la siguiente manera:

Para el *dado* se genera un modelo 3D, si se trata del modelo 3D con herramientas deformables se selecciona el tipo deformable, si se trata del modelo 3D con herramientas no deformables se selecciona el tipo discretamente rígido. La forma base de generación del sólido será mediante extrusión, con un tamaño de área de dibujo de 1; en el sketch se dibuja un rectángulo con los siguientes puntos:

Punto	X	Y
1	0.25	0.5
2	0	0.05

TABLA 7.1 PUNTOS PARA GENERAR EL DADO DE AMBOS MODELOS 3D

Una vez generada la geometría, se le asigna una profundidad de 0.25. Se realizan los filetes de la pieza. Se genera un filete en una arista vertical con un radio de 0.08. En las aristas inferiores horizontales se generan filetes con un radio de 0.05.



FIGURA 7.1 DADO DEFORMABLE 3D

Para el caso de herramientas discretamente rígidas se realiza lo siguiente: Se transforma a elemento shell mediante la opción **Shape** de la barra de menús, donde se selecciona **Shell** y posteriormente la opción **From Solid**. Se selecciona la herramienta y se termina el proceso. Se le añade su nodo de referencia en la coordenada (0, 0.5, 0).

Para la *matriz* se genera un modelo 3D, si se trata del modelo con herramientas deformables se selecciona el tipo deformable, si se trata del modelo con herramientas no deformables se selecciona el tipo discretamente rígido. La forma de generación del sólido será mediante extrusión, con un tamaño de área de dibujo de 1.2; en el sketch se dibuja un rectángulo con las siguientes coordenadas:

Punto	X	Y
1	0	0
2	0.56	-0.1

TABLA 7.2 PUNTOS PARA GENERAR LA MATRIZ

Al terminar el rectángulo, se asigna una profundidad de 0.3, y un nuevo rectángulo generado mediante extrusión, además se selecciona la cara posterior de la pieza

generada, y se elige el eje vertical derecho con la opción **vertical and on the right** y se traza un rectángulo con las siguientes coordenadas:

Punto	X	Y
1	0.28	0.05
2	-0.02	-0.05

Se asigna una profundidad de 0.26 al rectángulo creado y se realizan los filetes de la pieza con un radio de 0.05 en las aristas interiores horizontales.



FIGURA 7.2 MATRIZ DEFORMABLE 3D

Para el caso del modelo con herramientas deformables, el *dado* permanece como se muestra en la figura 7.2. Para el caso de herramientas discretamente rígidas se transforma a elemento shell mediante la opción **Shape** de la barra de menús, donde se selecciona **Shell** y posteriormente la opción **From Solid**. Se le añade su nodo de referencia en la coordenada (0, 0, -0.26).

Para ambos modelos se genera una pieza 3D que representa la lámina a embutir. Esta pieza es deformable shell, extruida, con un área de trabajo de 1. Se traza una línea con las siguientes coordenadas:

Punto	X	Y
1	0	0
2	0.5	0

TABLA 7.4 PUNTOS PARA GENERAR LA LÁMINA A DEFORMAR

Una vez generada la línea, se asigna una profundidad de 0.5.



FIGURA 7.3 LÁMINA PARA EMBUTIDO 3D

Módulo Property

En este módulo se crean dos materiales para el caso deformable 3D, uno se asignará a la lámina y el otro a las herramientas. Para el modelo con herramientas rígidas tan solo se crea el material que será asignado a la lámina que se va a deformar.

Para ambos modelos los materiales se generan con la herramienta **Create material**. El primero de ellos será el *acero inoxidable 304*, que es un acero austenítico con elementos como el cromo y el níquel, el cual es ampliamente usado como lámina para el proceso de embutido.

El acero inoxidable 304 tiene las siguientes propiedades:

Densidad = 8000 Kg/m³

Elásticas: módulo de Young = 200 GPa y coeficiente de Poisson = 0.29.

Plásticas: Utilizar los datos de la tabla 7.5.

Esfuerzo Pa	Deformación Plástica mm/mm
215E6	0
400E6	0.2
490E6	0.45
505E6	0.698

 TABLA 7.5 PROPIEDADES PLÁSTICAS DEL MATERIAL A DEFORMAR

El segundo de ellos sólo se generará para el modelo 3D con herramientas deformables y será un acero *AISI tipo H13*, el cual será asignado a ambas herramientas. Se llamará *acero herramental H13* y tendrá las siguientes propiedades:

Densidad = 7800 Kg/m³

Elásticas: módulo de Young = 210 GPa y relación de Poisson = 0.3.

Plásticas: Utilizar los datos de la tabla 7.6.

Esfuerzo	Deformación Plástica
Ра	mm/mm
1650E6	0
1990E6	0.09

TABLA 7.6 PROPIEDADES PLÁSTICAS DEL ACERO HERRAMENTAL

Después de crear los materiales para ambos modelos se generan las secciones. Para el modelo con herramientas deformables se genera una sección, la cual será sólida y homogénea, y además se le asociará el material creado para las herramientas.

Para ambos modelos se genera una nueva sección del tipo **Shell**, a la cual se le asignará un espesor de un milímetro (0.001). Dicha sección será asociada al material creado para la lámina.

Posteriormente se asignan las secciones a las piezas creadas. Además, para el modelo con herramientas discretamente rígidas, se debe asignar una masa a cada herramienta. Esta se crea en la opción **Special** de la barra de menús. Se selecciona del tipo punto de **masa/inercia** y se selecciona el nodo de la herramienta. Posteriormente se introducen los siguientes parámetros en el cuadro de diálogo, tanto en la inercia de la matriz como en la del dado:

Parámetro	Valor	
Masa	0.001	
111	1	
122	1	
133	1	

TABLA 7.7 PARÁMETROS DE LA INERCIA DE AMBAS HERRAMIENTAS

Cabe aclarar que los valores asignados no son los que corresponden a la geometría de las herramientas, pero es necesario asignar un valor para que la paquetería pueda realizar los cálculos. Los resultados numéricos no se ven afectados debido a que el modelo tiene herramientas discretamente rígidas.

Módulo Assembly

En este módulo se llama a las piezas generadas para ambos modelos. Una vez que se han llamado las 3 piezas generadas, se acomodan de modo que el ensamble sea el correcto. Primero se traslada la matriz con los siguientes puntos:

TABLA 7.8 COORDENADAS PARA TRASLADAR LA MATRIZ

Punto	Coordenadas (X,Y,Z)
1	0.0, 0.0, 0.0
2	0.0, 0.0, 0.26

Una vez trasladada la matriz, el arreglo matriz/lámina/dado estará completo, sin embargo hace falta el pisador del modelo. Con la herramienta **Instance Part** se llama de nuevo a la pieza correspondiente a la matriz, que debe trasladarse y rotarse para que coincida con las piezas ya ensambladas y represente al pisador.

La primera rotación tendrá los siguientes puntos:

TABLA 7.9 COORDENADAS PARA ROTAR EL PISADOR

Punto	Coordenadas (X,Y,Z)
1	0.0, 0.0, 0.0
2	1.0, 0.0, 0.0

Una vez seleccionados los puntos, se asigna un ángulo de 180 grados. Una vez realizada la primera rotación, se hace una segunda rotación con los siguientes puntos:

Punto	Coordenadas (X,Y,Z)
1	0.0, 0.0, 0.0
2	0.0, -1.0, 0.0

2

Una vez introducidos los puntos, se asigna una rotación de 90 grados. Por último se traslada el pisador con las siguientes coordenadas:

0.26, 0.01, 0.0

Punto	Coordenadas (X,Y,Z)
1	0.0, 0.0, 0.0

 TABLA 7.11
 COORDENADAS PARA TRASLADAR EL PISADOR



FIGURA 7.4 ENSAMBLE DEL MODELO DE EMBUTIDO 3D

Las piezas se mantienen como dependientes, ya que se quieren mallar las piezas y no el ensamble.

Módulo Step

En este módulo se generan tres pasos de simulación. Todos serán **dinámicos explícitos** y se les asignará un factor de escalamiento de masa en la pestaña **mass Scaling**, cambiando la opción a **Use scaling definitions below**. Con la herramienta **Create** se introduce el valor del factor de escalamiento en el campo **Scale by Factor**.

El primer paso se llamará *PisadorBaja* y comprenderá el proceso en el que la pieza del pisador baja para presionar la lámina con la matriz. El segundo paso se llamará *FuerzaAplicada* y en este tan sólo se aplicará una fuerza en el pisador para que la lámina

mantenga su posición. El tercer paso se llamará *Embutido* y será el paso en el que el dado baje y deforme a la lámina. En la siguiente tabla se muestran los tiempos y los valores de escalamiento de cada paso:

Step	Duración	Factor de Escalamiento de
	S	masa
PisadorBaja	0.1	100 000
FuerzaAplicada	0.01	750
Embutido	6.32	400 000

 TABLA 7.12
 PARÁMETROS DE CADA PASO GENERADO

Módulo Interaction

Para comenzar se deben generar tres interacciones, la cuales serán del tipo **Surface-to-Surface contact** y estarán definidas desde el primer paso. Para el modelo con herramientas deformables, primero se eligen las superficies maestras del dado que estarán en contacto con la lámina a deformar y la superficie esclava que será la superficie superior de la lámina.

En caso de que la selección de las superficies se dificulte, se pueden ocultar las piezas en **Display Group** de la opción **Tools**, en la barra de menús. En la figura 7.5 se muestra la superficie maestra en rojo (dado) y la superficie esclava en magenta (lámina).





Después se definen las propiedades de la interacción, la primera llevará por nombre *DadoLamina* y se elige la opcion **Contact con comportamiento tangencial**, y la opción **Penalty** en donde se asigna un valor de 0.4.

Después se genera la segunda interacción correspondiente al contacto entre el pisador y la lámina. La superficie maestra será el pisador y la superficie esclava corresponderá a la superficie superior de la lámina. La propiedad de la interacción se llamará *matrizLaminaPisador* y asignará un coeficiente de fricción de 0.01.



FIGURA 7.6 SUPERFICIE MAESTRA (PISADOR) Y SUPERFICIE ESCLAVA (SUPERFICIE SUPERIOR DE LA LÁMINA)

Por último, se crea la tercera interacción entre la matriz (superficie maestra) y la pieza inferior de la lámina (superficie esclava). El coeficiente de fricción asociado será el mismo que se creó entre el pisador y la lámina, por lo que no hay necesidad de generar uno nuevo.





Para el modelo 3D con herramientas discretamente rígidas se asigna a las herramientas con su respectivo nodo de referencia. Se elige la opción de cuerpo rígido, con una región del tipo cuerpo, donde se selecciona toda la geometría de la herramienta. Después, en el nodo de referencia se selecciona el que se creó para la herramienta en el **Módulo Part**. Una vez que se asignó el nodo de referencia a cada herramienta (Dado, matriz y pisador) se crean las interacciones de forma similar al modelo 3D deformable. Las fricciones asociadas con este modelo son las mismas que se asignaron al modelo con herramientas deformables.



FIGURA 7.8 ENSAMBLE CON ELEMENTOS ASIGNADOS A SUS RESPECTIVOS NODOS DE REFERENCIA

Módulo Load

En este módulo se generarán las condiciones de frontera del modelo. Las condiciones de frontera son las mismas para ambos modelos, sin embargo en el modelo con herramientas discretamente rígidas la selección se simplifica debido a que sólo se asignan en el nodo de referencia.

 Simetría/Antisimetría/Empotramiento. Se crea una simetría respecto al eje X en las caras de los elementos del plano YZ, tanto del dado, matriz, pisador y lámina (XSYMM: U1=UR2=UR3=0), a partir del paso 1 *PisadorBaja*.



FIGURA 7.9 CONDICIÓN DE SIMETRÍA (ROJO) REFERENTE AL EJE X

 Desplazamiento/Rotación. Se restringe el desplazamiento en las caras del plano YZ de la matriz sobre la dirección Y (U2=0) desde el primer paso.



FIGURA 7.10 CONDICIÓN DE SIMETRÍA (ROJO) EN EL PLANO YZ DE LA MATRIZ

 Desplazamiento/Rotación. Se crea un desplazamiento en el pisador en el primer paso en dirección Y (U2 = -0.009 m), debido a que en el ensamble el pisador y la matriz se encuentran a 1 cm de separación, mientras el espesor asignado a la lámina fue de 1 mm. Se genera una amplitud y se asignan los siguientes valores:

Time/Frequency	Amplitude
0	0
0.01	1
Posteriormente se modifica esta condición en el paso 2, asignándole un desplazamiento nulo (U2 = 0).

4. Desplazamiento/Rotación. Se restringe el desplazamiento de los elementos del plano XY, tanto del dado, matriz, pisador y lámina (U3=UR1=UR2=0) a partir del paso1.



FIGURA 7.11 CONDICIÓN DE SIMETRÍA (ROJO) REFERENTE AL EJE Z

 Velocidad/Velocidad Angular. Se asigna una velocidad lineal a toda la pieza del dado en el eje Y (V2 = -0.04 m/s), en el paso número 3.

Módulo Mesh

En este módulo como primer paso se cambia la forma de mallar, de ensamble a pieza. Comenzando por el *dado*, en la ventana **Mesh** se selecciona **Controls** y se elige un mallado con elementos libres de la forma tetragonal (Tet); en la misma ventana se selecciona la opción **Element Type** y se cambia a la librería de elementos explícitos; el tipo de familia será 3D Stress para el modelo con herramientas deformables. Para el modelo discretamente rígido se elige un mallado con elementos libres de la forma triangular (Tri), así como la librería explícita y la familia de elementos discretamente rígidos. A continuación en la pestaña **Seed** se selecciona **Part**, como tamaño aproximado se introduce 0.1. En el menú principal en la ventana **Mesh** se selecciona **Part** y se da clic en el *dado* para mallarlo.



FIGURA 7.12 DADO 3D MALLADO

Para mallar la matriz se siguen los mismos pasos que en el dado, sin embargo cambia el tamaño aproximado en la pestaña de **Seed > Part**, donde en este caso se introduce un valor de 0.08. Posteriormente en la pestaña **Mesh** se elige la opción **Part** y se selecciona la *matriz* para mallarla.



FIGURA 7.13 MATRIZ MALLADA 3D

Por último se malla la lámina. En la pestaña **Mesh** se selecciona **Controls** y se elige un mallado con elementos estructurados con la forma Quad-dominated. En la misma ventana se selecciona la opción **Element Type**, se cambia a la librería de elementos explícitos y

se selecciona el tipo de familia Shell; se cambia la opción Hourglass Control a Enhanced.

A continuación en la pestaña **Seed** se selecciona **Part** y como tamaño aproximado se introduce 0.02. Una vez más en la ventana **Mesh**, se selecciona **Part** y se da clic en la *lámina* para mallarla.



FIGURA 7.14 LÁMINA MALLADA 3D

Módulo Job

En este módulo sólo se crea un **Job** con el nombre *EmbutidoDefHMSF* en el caso del modelo deformable. En el caso del modelo con herramientas rígidas el archivo se llamará *EmbutidoDiscRígidoHMSF*. HMSF son las siglas de High mass Scaling Factor. Una vez creado el **Job** se somete a análisis. Dentro del mismo manager se selecciona la opción para observar los resultados, o la opción monitor para supervisar en tiempo real el proceso del cálculo del modelo.

Módulo Visualization

En este módulo se observará el resultado final del modelo. Adicionalmente se puede omitir la visualización de las herramientas en la pestaña de **Tool** y posteriormente en **Create Display Group**. Aquí se selecciona el **Item Part Instances** y se eligen las piezas que se desean ocultar. Para mejorar ese aspecto de la pieza deformada se puede activar la opción **Mirror** en la pestaña **View**, en la opción **ODB Display Options**, donde se

selecciona un mirror respecto a los planos XY y YZ. También se puede asignar el espesor de la lámina en la opción **Render Shell Thickness**.



FIGURA 7.15 MODELO DE EMBUTIDO 3D CON HERRAMIENTAS DEFORMABLES CON PISADOR OCULTO





Las dimensiones finales de la tarja para ambos modelos son:

Ancho: 0.5 m.

Profundidad: 0.2 m.



FIGURA 7.17 DESPLAZAMIENTO DE LA PIEZA CENTRAL DE LA LÁMINA EN EL MODELO 3D CON HERRAMIENTAS DEFORMABLES

Los perfiles finales de las tarjas se presentan en las figuras 7.18 y 7.19, donde se observa que el estado de esfuerzos más alto se presentó en el modelo con herramientas rígidas.



FIGURA 7.18 ELEMENTO SHELL DEFORMADO DEL MODELO CON HERRAMIENTAS DEFORMABLES



FIGURA 7.19 ELEMENTO SHELL DEFORMADO DEL MODELO CON HERRAMIENTAS RÍGIDAS

Las curvas de esfuerzo en la región inferior de la tarja para ambos modelos, se muestran en las figuras 7.21 y 7.22. Los valores de esfuerzo fueron similares en ambas curvas; la curva del modelo con herramientas rígidas presenta ligeros saltos que indican que la herramienta se deforma elásticamente, caso que no ocurre en el modelo con herramientas rígidas.



FIGURA 7.20 ZONA DE ANÁLISIS DEL ELEMENTO SHELL DEFORMADO



FIGURA 7.21 ESFUERZO DE VON MISES DEL MODELO CON HERRAMIENTAS DEFORMABLES



FIGURA 7.22 ESFUERZO DE VON MISES DEL MODELO CON HERRAMIENTAS DEFORMABLES

La fuerza de reacción en el dado presentó diferencias en ambos modelos. En el modelo deformable la fuerza de reacción presentaba valores parecidos en las tres direcciones principales, donde los máximos valores se observaban al inicio de la deformación de la lámina. En el modelo con herramientas rígidas se presentó la misma fuerza de reacción

en dirección X y Z, mientras que en dirección Y, presentaba una magnitud de fuerza mayor.



FIGURA 7.23 FUERZA DE REACCIÓN DEL MODELO DEFORMABLE EN DIRECCIÓN X (NARANJA), Y (MAGENTA) Y Z (CAFÉ)



FIGURA 7.24 FUERZA DE REACCIÓN DEL MODELO DEFORMABLE EN DIRECCIÓN X (VERDE), Y (MORADO) Y Z (AZUL)

Step: Step-3 Frame: 19 Total Time: 6.114326

Para el modelo deformable, el máximo estado de esfuerzos en el dado es de 724 MPa, un valor bastante alto que no está por encima de la cedencia, pero que es muy grande tratándose de un proceso en el que se deforma una lámina con 1 mm de espesor.



FIGURA 7.25 MÁXIMO ESTADO DE ESFUERZOS EN EL DADO DEL MODELO 3D CON HERRAMIENTAS DEFORMABLES



En la matriz el máximo esfuerzo que se encontró fue de 27 MPa.

FIGURA 7.26 MÁXIMO ESTADO DE ESFUERZOS EN LA MATRIZ DEL MODELO 3D CON HERRAMIENTAS DEFORMABLES

Cabe destacar que a pesar de que en el modelo 3D con herramientas rígidas no se puede analizar el estado de esfuerzos de las herramientas, el tiempo de cómputo es aproximadamente 1/8 del tiempo que tarda en calcular el modelo 3D con herramientas deformables.

Las curvas de energía se verifican para comprobar que el modelo sea válido. La energía cinética debe ser menor al 5% de la energía interna del modelo. En las figuras 7.27 y 7.28 se presentan las curvas de ambos modelos.



FIGURA 7.27 CURVAS DE ENERGÍA CINÉTICA (AZUL) Y ENERGÍA INTERNA (VERDE) DEL MODELO DE EMBUTIDO 3D CON HERRAMIENTAS DEFORMABLES



FIGURA 7.28 CURVAS DE ENERGÍA CINÉTICA (AZUL) Y ENERGÍA INTERNA (MORADA) DEL MODELO DE EMBUTIDO 3D CON HERRAMIENTAS RÍGIDAS

Ambas gráficas presentan irregularidades, en especial el modelo con herramientas deformables, por lo que existen errores en los resultados numéricos debido al alto factor de escalamiento de masa. En el modelo con herramientas deformables la energía cinética sobrepasa a la energía interna en los pasos 1 y 3. En el modelo con herramientas rígidas, solo ocurre al inicio del paso 3, donde la energía cinética sobrepasa a la energía interna. Debido a esto, se plantea la siguiente actividad para obtener mejores resultados.

Actividad para el alumno

Se plantea como actividad para el alumno generar nuevos archivos **Job** donde se varíe el factor de escalamiento de masa de los pasos 1 y 3 para ambos modelos, utilizando los valores de la siguiente tabla. Posteriormente se debe determinar el error existente entre los modelos, tomando como referencia el modelo que cumpla con la condición de que su energía cinética sea menor al 5% de su energía interna.

TABLA 7.14 FACTORES DE ESCALAMIENTO DE MASA DE LOS NUEVOS ARCHIVOS JOR	B GENERADOS
--	-------------

Job	Pisador Baja	Embutido		
EmbutidoDefMMSF/EmbutidoDiscRígidoMMSF	25 000	100 000		
EmbutidoDefLMSF/EmbutidoDiscRígidoLMSF	75	75		

PRÁCTICA 8

FUNDICIÓN POR GRAVEDAD

8.1 OBJETIVOS

- Modelar el proceso de fundición por gravedad en un modelo 3D.
- Mostrar el uso del análisis "Acoplado Euleriano-Lagrangiano" (CEL) para sistemas en los que hay flujo de material.
- Validar el uso de este tipo de materiales para el estudio de la dinámica de fluidos mediante la comparación de imágenes tomadas a alta velocidad.

8.2 INTRODUCCIÓN

En la industria todos los metales inician su vida útil como planchas o lingotes obtenidos mediante el proceso de colada que requiere buen control en el flujo del metal en estado líquido, para disminuir la presencia de defectos y asegurar la calidad de las piezas finales. El estudio analítico de este proceso presenta limitaciones en la predicción del comportamiento del metal fundido en zonas específicas de los moldes. Para mejorar el proceso se recurre a las visualizaciones de la colada, mediante radiografías o en modelos transparentes de los moldes que se requieren estudiar, lo que implica mayor costo y tiempo de proceso. Por ello, la simulación de la interacción entre sólidos y fluidos cobra importancia, sin embargo este tipo de análisis presenta complicaciones al requerir recursos computacionales y tiempos de cálculo elevados, esto se justifica pues la predicción de las simulaciones es precisa y los resultados obtenidos involucran diversas variables físicas.

Los procesos de fundición consisten en verter un metal líquido en el interior de un molde y su posterior solidificación, provocando que el metal ya solidificado reproduzca la geometría interna del molde; dicha geometría puede ser simple y simétrica o bien con formas muy complejas, estas permiten la generación de cavidades o superficies internas en la pieza final. Este proceso permite conformar materiales que otros no logran, así como también obtener, a bajo costo, piezas con gran diversidad de tamaños y formas que de otra manera no sería viable.

Este proceso siempre tiene por objetivo vaciar el metal fundido a una cavidad para que este adopte la forma deseada, lo que implica que en cada colada convencional o por gravedad se encuentran los siguientes elementos:

- a) Metal fundido: material que se quiere conformar.
- b) Bebedero: zona por la que el metal fundido debe ingresar, se diseña para asegurar un flujo laminar.
- c) Caja de moldeo: son los límites ocupados para contener la arena que forma el molde.
- d) Canal de colada: canal por el que el metal fundido viaja para llenar la cavidad del molde.
- e) Mazarota: cavidad usada ocasionalmente en moldes para fundición que previenen cavidades por contracción térmica.
- f) Molde: material que contendrá al metal fundido.
- g) Cavidad dentro del molde: perfil que se desea obtener del proceso.
- h) Cuchara de vertido: recipiente que transporta y vierte el metal al molde.



FIGURA 8.1 ESQUEMA GENERAL DEL PROCESO DE FUNDICIÓN POR GRAVEDAD (LÓPEZ, 2011)

8.3 DESARROLLO

Módulo Part

Este modelo consta de las siguientes piezas. Una pieza discretamente rígida que guía el fluido a la cavidad y otra que define a la cavidad. También se requiere otra pieza que permita definir el dominio del fluido, y por último una pieza auxiliar que define la ubicación y volumen del fluido que llenará la cavidad.

a) La primera pieza a crear se denomina *Embudo*, y se define como: 3D, discretamente rígida, laminar de revolución en 360°, con un área de dibujo de 0.1.
 Se asigna un nodo de referencia (RP) en el sólido, ver figura 8.2.



FIGURA 8.2 DIBUJO CON MEDIDAS EN METROS, LOS ÓVALOS REPRESENTAN LOS CENTROS DE LOS ARCOS Y LOS RECTÁNGULOS LOS PUNTOS DE TANGENCIA CON LOS ARCOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA LÍNEA QUE LOS UNE.

b) La segunda pieza a generar es la cavidad denominada *Lingotera* y se define como: 3D, discretamente rígida, laminar de extrusión, con el uso de la herramienta línea conectada mediante puntos y las coordenadas de la tabla 8.1 y la figura 8.3(a), y con una profundidad de 7e-3 m

Punto	X e-3	Y e-3
	m	m
1	30	-20
2	30	-160
3	120	-160
4	120	-20

TABLA 8.1 PUNTOS PARA CREAR EL PERFIL DE LA LINGOTERA

La operación anterior genera el contorno de la *lingotera*. Después, con la herramienta extrusión laminar se generan las caras anterior y posterior, para esto se elige una de las caras verticales como plano de dibujo, figura 8.3(b), y se selecciona una línea vertical para entrar al plano del dibujo, con la herramienta multilínea se une el punto 1 con 2 y 3 con 4, figura 8.3(c), se confirma la operación y se indica que la extrusión llega a la cara vertical contraria de la lingotera, figura 8.3(d), se confirma la operación y se obtiene el cuerpo, figura 8.3(e).





Con la lingotera definida, se aplica la operación de redondeo en todas las aristas, para evitar que el fluido escape de la cavidad, esto se hace en la siguiente forma:

Arista	Radio e-3 m
а	10
С	2

TABLA 8.2 DEFINICIÓN DE RADIOS PARA LAS ARISTAS



FIGURA 8.4 A) ZONA DE REDONDEO DE 10E-3 M, B) RESULTADO OBTENIDO, C) ZONA DE REDONDEO (LÍNEAS EN ROJO) DE 2E-3 M, D) RESULTADO DE LA OPERACIÓN

Con los redondeos ya asignados a la *lingotera*, se crea el *bebedero*, que es la sección que asegura que no existan derrames de fluido, esta se realiza usando la herramienta de corte por extrusión. Como plano de construcción se utiliza la cara anterior y se selecciona como eje vertical el indicado por la flecha, figura 8.5(a); se construye un trapecio usando la herramienta de línea conectada por puntos con las coordenadas de la tabla 8.3, el trapecio queda por encima del límite superior de la lingotera para asegurar que el corte retire todo el material de interés, figura 8.5(b). El corte se indica en la dirección saliente al cuerpo, Figura 8.5(c), con la condición **Through All** y se confirma la operación, figura 8.5(d).

Punto	X e-3 m	Y e-3m
1	8	70
2	16	56
3	24	56
4	32	70
5	8	70

 TABLA 8.3 COORDENADAS PARA EL CORTE EN LA CARA ANTERIOR



FIGURA 8.5 A) SELECCIÓN DEL PLANO DE CONSTRUCCIÓN Y EJE PARA ENTRAR AL AMBIENTE DE DIBUJO, B) TRAPECIO GENERADO CON LAS COORDENADAS DE LA TABLA 0.6, C) DIRECCIÓN DEL CORTE, D) RESULTADO DE LA OPERACIÓN DEL CORTE

Una vez realizado el corte se genera un cono trunco para completar la definición geométrica del *bebedero*, esto se realiza seleccionando la herramienta **Shell** por revolución, se elige nuevamente la cara donde se hizo el corte y se usa el mismo eje vertical que durante la operación de corte, figura 8.6(a), para ingresar al ambiente de dibujo, usando la herramienta **línea de construcción vertical** se aproxima el cursor a la línea inferior del corte y se selecciona como punto de construcción el punto medio de esta sección, resultado en la figura 8.6(b), usando la herramienta de **línea conectada por puntos** se selecciona el punto resaltado en rojo (punto superior izquierdo del corte) y el punto en amarillo (punto de intersección horizontal) sobre la línea de construcción, figura 8.6(c), se confirma la operación, se asigna la dirección de revolución, figura 8.6(d), y se asigna una ángulo de 180°, al confirmar la operación se tiene la definición del límite superior para el cono trunco, Figura 8.6(e).



FIGURA 8.6 A) PLANO DE CONSTRUCCIÓN, B) EJE DE CONSTRUCCIÓN AL CENTRO DEL CORTE, C) LÍNEA GENERADA CON LOS PUNTOS RESALTADOS (PERFIL PARA LA REVOLUCIÓN), D) DIRECCIÓN DE LA REVOLUCIÓN, E) RESULTADO DE LA OPERACIÓN

Mediante la operación de revolución y corte se definieron las fronteras geométricas del *bebedero*, para generar el cuerpo se usa la herramienta **Shell loft**, seleccionar el perfil circular como perfil de origen y la línea inferior horizontal del corte como perfil destino, figura 8.7(a), se confirma la operación y se obtiene el cuerpo del *bebedero*, figura 8.7(b).



FIGURA 8.7 A) PERFIL DE ORIGEN EN MAGENTA Y PERFIL DE DESTINO EN ROJO, B) RESULTADO EN ROJO DE LA GENERACIÓN DE LA SECCIÓN PROGRESIVA

Generado el cuerpo del *bebedero* se requiere un corte para dejarlo abierto, este se realiza con la herramienta de corte por extrusión, seleccionando el plano semicircular generado

en la operación de lámina por revolución y el eje vertical señalado con la flecha, figura 8.8(a); generar un arco usando el centro marcado en la semicircunferencia y los puntos extremos que la definen (marcados en rojo), unir dichos puntos con una recta, figura 8.8(b); confirmar la operación, asignar el sentido del corte hacia fuera de la pieza, figura 8.8(c); y confirmar; con esto se genera el resultado deseado, figura 8.8(d).



FIGURA 8.8 A) PLANO DE CONSTRUCCIÓN PARA EL ARCO Y SEÑALADO POR LA FLECHA EL EJE VERTICAL PARA INGRESAR AL AMBIENTE DE DIBUJO, B) PUNTOS PARA LA DEFINICIÓN DEL ARCO Y LÍNEA PARA EL CORTE, C) DIRECCIÓN DEL CORTE, D) RESULTADO DE LA OPERACIÓN

El resultado de todas estas operaciones genera un perfil con aristas, las cuales producen que el fluido escape y no respete la geometría definida, por lo que nuevamente se aplica un redondeo con un radio de 2e-3 m en la zona indicada en la figura 8.9(a), de esta forma queda completa la definición de la *lingotera*, figura 8.9(b).



FIGURA 8.9 A) ARISTA DONDE SE APLICA EL REDONDEO (ÚNICAMENTE), B) RESULTADO DE LA OPERACIÓN

La *lingotera* al estar definida como discretamente rígida requiere un nodo al cual aplicar las restricciones por lo que se asigna un RP en el vértice del bebedero como en la figura 8.10.



FIGURA 8.10 ASIGNACIÓN DE NODO DE REFERENCIA EN LA PIEZA "LINGOTERA"

c) La tercera pieza es el dominio en el cual puede existir el fluido, esta pieza se define como *dominio*, 3D, euleriana, mediante extrusión de sólido con una profundidad de 75e-3 m.



FIGURA 8.11 DIMENSIONES EN METROS PARA EL DOMINIO

 d) La cuarta pieza es auxiliar y se usa en la definición de la ubicación y volumen del fluido, se define como: *Shell auxiliar*, 3D, discretamente rígido, laminar de revolución.



FIGURA 8.12 DIMENSIONES EN METROS PARA EL PERFIL DE LA PIEZA AUXILIAR

Módulo Property

El fluido usado para el modelo es incompresible newtoniano y será sometido a cambios de dirección, reducciones de área transversal e impactos por efecto de la carga por gravedad. Esto demanda calcular el flujo y el estado de cada punto del material en cada incremento realizado durante la simulación para así representar el comportamiento del fluido durante la colada, para estas solicitaciones la paquetería ofrece el modelo de Mier-Grüneisen en la forma linealizada de Hugoniot.

En este módulo se crea un nuevo material:

- a) Nombre: Agua
- b) Densidad: 998.2 Kg/m³

- c) Viscosidad de 0.001003 Pa*s
- d) Ecuación de estado (EOS) del tipo "Us-Up" con constantes $c_0 = 1500$ m/s, s = 0 y $\Gamma_0 = 0$.

Las propiedades viscosidad y EOS están disponibles en la sección de propiedades mecánicas bajo el nombre de **viscocity** y **EOS** respectivamente.

Crear una sección con el nombre *Dominio* del tipo euleriano, asignarle el material ya definido y asociarla a la pieza *Dominio*.

Módulo Assembly

En este módulo lo único que se realiza es llamar las piezas generadas que aparecen como en la figura 8.13.



FIGURA 8.13 ETAPA PREVIA AL ENSAMBLE

El proceso para ordenar el ensamble es el siguiente:

- a) Eliminar el dominio para poder trabajar adecuadamente con las demás piezas.
- b) Aplicar la condición **coaxial** al *Shell auxiliar* y al *Embudo*.
- c) Alinear la *lingotera* al *embudo* usando los ejes de revolución (líneas punteadas), sugerencia: establecer como pieza fija al embudo.
- d) Alinear el *Shell auxiliar* a la línea donde inicia el redondeo superior, figura 8.14.



FIGURA 8.14 POSICIÓN ADECUADA DEL SHELL AUXILIAR DENTRO DEL EMBUDO

e) Agregar el dominio al ambiente de ensamble, y establecer una separación de 3e-3 m entre las caras inferiores del *Dominio* y *Lingotera*, figura 8.15.



FIGURA 8.15 A) CARAS SELECCIONADAS PARA UBICAR EL DOMINIO, MAGENTA SUPERFICIE FIJA Y ROJO SUPERFICIE MÓVIL, C) RESULTADO

 f) Asignar un valor de separación de 27e-3 m entre las caras posteriores del *Dominio* y *Lingotera*, figura 8.16.



FIGURA 8.16 A) CARAS SELECCIONADAS PARA UBICAR EL DOMINIO, MAGENTA SUPERFICIE FIJA Y ROJO SUPERFICIE MÓVIL, C) RESULTADO FINAL

Módulo Step

Crear 17 pasos idénticos entres sí, usar el nombre por defecto ya que así se puede diferenciar en qué sección del cálculo se encuentra el proceso creado y no requiere identificación especial. Definirlos como **Dinámico Explícito**, con un tiempo de 0.1 con la **no linealidad geométrica activada**.

Módulo Interaction

Crear una propiedad de interacción del tipo contacto y asignar el nombre *NoFricc*, con un comportamiento sin fricción. Asignar la propiedad contacto bajo la denominación **Contact** en el paso inicial del tipo **General Contact (Explicit)**; asegurar que la región de aplicación sea **All* with self**, figura 8.17(b) recuadro rojo superior.



FIGURA 8.17 A) CUADRO DE ASIGNACIÓN DEL TIPO DE LA PROPIEDAD, B) CUADRO DE ASIGNACIÓN A LA REGIÓN Y PROPIEDAD PARA LA INTERACCIÓN

Las piezas discretamente rígidas no requieren asignación de material, su comportamiento se define mediante la aplicación de restricciones e interacciones dentro de este módulo.

Los cuerpos sólidos *Lingotera* y *Embudo* no presentan erosión o desgaste para el proceso de colada que se simula, por lo tanto se asigna la restricción de cuerpo rígido y así determinar el comportamiento de las piezas para este modelo. Esto se consigue de la siguiente forma:

- a) Dejar solo en pantalla al embudo y lingotera.
- b) Activar la herramienta **Create constrain**, asignar el nombre Rigid-nombre de la pieza, con el tipo **Rigid body**.
- c) Usar la opción **Body (elements)**, generar un recuadro que cubra totalmente la pieza a la que se aplica la interacción.
- d) Seleccionar el RP de la pieza en cuestión como el punto de referencia solicitado.
- e) La asignación correcta de la restricción genera círculos amarillos en torno a la pieza.
- f) Repetir para la pieza faltante.

Módulo Load

El modelo solo cuenta con una carga, esta es la gravedad. No hay desplazamientos de las piezas y la velocidad del fluido en determinadas caras del dominio es restringida.

- a) Crear una carga Load del tipo gravedad con el valor 9.81 m/s².
- b) Crear la condición de frontera de empotramiento al embudo y lingotera.
- c) Asignar $V_{x,y,z} = 0$, según sea el caso, figura 8.18.



FIGURA 8.18 CARAS NORMALES A LOS EJES CON VELOCIDAD CERO EN DIRECCIÓN PARALELA AL EJE QUE SE RESTRINGE, A) V_x =0, b) V_y =0, c) V_z =0

La inicialización del material euleriano se realiza en este módulo, pero requiere del uso de la herramienta **Volume Fraction Tool (VFT)** la cual demanda que las piezas sólidas, auxiliar y dominio estén malladas, por esta razón la aplicación de esta inicialización de material se describe en conjunto en el siguiente módulo.

Módulo Mesh

La primera pieza que se malla es el *dominio*, con un tamaño global del elemento de 1e-3, las demás características permanecen sin cambio figura 8.19(a).

La segunda pieza a mallar es el *Embudo*, fijar las propiedades: forma del elemento **Quad** y técnica **Sweep**, asignar un tamaño global del elemento de 1.5e-3 m y aplicar la malla como en el caso anterior, figura 8.19(b).

La tercera pieza para esta operación es el *shell auxiliar*, asignar forma del elemento **Quad-dominated** usando técnica **Sweep** con un tamaño global del elemento de 1e-3 m para hacerlo coincidir con la malla asignada al dominio, figura 8.19(c).



FIGURA 8.19 A) DOMINIO MALLADO, B) APLICACIÓN DEL CONTROL DE MALLADO AL EMBUDO, C) EMBUDO MALLADO, D) SHELL AUXILIAR MALLADO

El mallado de la lingotera requiere más detalle puesto que la superficie de esta presenta curvas y redondeos, lo que demanda aplicación de controles diferentes. Para aplicar una malla que permita un cálculo adecuado se siguen los siguientes pasos:

- a) Fijar un tamaño global del elemento en 2e-3 m.
- b) Aplicar en las superficies laterales de la lingotera, figura 8.20(a), forma del elemento "TRI" con técnica "Structured".
- c) En la cara posterior y anterior de la lingotera asignar los controles anteriores, figura 8.20(b).
- d) Asignar los mismos controles de mallado a la superficie curva que conecta el bebedero con el cuerpo de la lingotera, figura 8.20(c).
- e) Al bebedero asignarle una forma de elemento "Quad" usando técnica free y algoritmo medial axis con la opción "Minimize mesh transition", figura 8.20(d).
- f) Con todos los controles aplicados a la lingotera aplicar la malla.



FIGURA 8.20 A) SUPERFICIES USADAS PARA EL PASO B, B) SUPERFICIES USADAS PARA EL PASO, C) SUPERFICIES CURVA QUE UNA EL BEBEDERO Y LA LINGOTERA (PASO D), D) SUPERFICIE PARA EL PASO E



FIGURA 8.21 RESULTADO DE LA APLICACIÓN DE LA MALLA EN LA LINGOTERA, A) ACERCAMIENTO AL MALLADO ESTRUCTURADO DEL BEBEDERO, B) ACERCAMIENTO Y GIRO DE LA ESQUINA INFERIOR DERECHA DE LA LINGOTERA MOSTRANDO EL MALLADO EN LOS REDONDEOS

El resultado del uso de la herramienta VFT es un campo discreto, el cual se usa para asignar material a los elementos que fueron determinados como intersecados o contenidos en la PR, de esta forma se obtiene una sección con material definido que tiene la misma topología de la PR, esto también se puede definir para la pieza exterior de la PR permitiendo crear análisis del comportamiento de un sólido inmerso en un medio fluido o deformable o bien crear análisis FSI para la contención de materiales ante determinadas solicitaciones, figura 8.22.

0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
0.0	0.32	0.91	0.91	0.32	0.0	1.0	0.68	0.09	0.09	0.68	1.0
0.0	0.91	1.0	1.0	0.91	0.0	1.0	0.09	0.0	0.0	0.09	1.0
0.0	0.91	1.0	1.0	0.91	0.0	1.0	0.09	0.0	0.0	0.09	1.0
0.0	0.32	0.91	0.91	0.32	0.0	1.0	0.68	0.09	0.09	0.68	1.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
		a)						b)			

FIGURA 8.22 CAMPOS DISCRETOS OBTENIDOS MEDIANTE VFT, A) PIEZA INTERNA DE PR, B) PIEZA EXTERNA DE PR (SIMULIA, 28.5, 2012)

Esta herramienta no tiene asociado un símbolo dentro de la paquetería se activa mediante "Tools >> Discrete Field >> Volume Fraction Tool >> seleccionar Dominio >> en la barra de selección "Instance" >> Shell auxiliar", figura 8.23.



FIGURA 8.23 DOMINIO RESALTADO EN ROJO Y PIEZA DE REFERENCIA RESALTADA EN MAGENTA.

La acción siguiente produce un cuadro de diálogo, se asigna el nombre "Fluido", en la opción "Accuracy" seleccionar "High", bajo la opción "Material location" activar "Inside reference part" y activar la opción "Set Creation" nombrándola "FluidoSet", confirmar, figura 8.24. El proceso de asignación de valor al campo discreto es lento debido a la cantidad de elementos que interactúan, pero esta combinación de tamaños permite generar la resolución requerida para el análisis y para esto es que se asigna el mismo tamaño global de elementos a la pieza auxiliar y al dominio.

\$	Vol	ume Fraction	Tool
Name:	Fluido		
Descriptio	n:	N.	
Paramet	ters		
Eulerian	instance:	Dominio-1 Ed	lit
Referenc	e instance:	Shell auxiliar-1	Edit
Accuracy	: O Low	🔿 Medium 🖲	High
Material	location:		
🔘 In	side referer	nce instance	
00	utside refer	ence instance	
Scale fac	tor (0 <f<=`< td=""><td>1): 1</td><td></td></f<=`<>	1): 1	
Note: A	n unmeshe warning w	d reference part hen the input fil	t instance will generate e is written.
Set Crea	tion		
🗹 Creat	e node set:	FluidoSet	
	ОК		Cancel

FIGURA 8.24 CUADRO DE DIÁLOGO PARA LA DEFINICIÓN DEL CAMPO DISCRETO ACTIVADO MEDIANTE LA HERRAMIENTA VFT, EN RECUADROS ROJOS SE RESALTAN LAS ZONAS QUE SE EDITAN

Las acciones anteriores generan un set de elementos con un valor asignado, figura 8.25, el cual representa volumen por lo que es necesario asociar el material que ya se ha asignado a la pieza euleriana. Esto se realiza en el módulo "Load", usando la herramienta "Create predefined Field", asignar nombre de "FluidoAsignar" durante el paso "Initial" bajo la categoría "Other" mediante el tipo "Material Assigment" seleccionar la pieza euleriana y con la opción "Discrete Fields" asignar el campo creado "Fluido" a toda la pieza, el resultado muestra círculos naranjas en el contorno de la pieza euleriana.



FIGURA 8.25 CAMPO DISCRETO CREADO CON LA HERRAMIENTA VFT MOSTRANDO EN NARANJA LOS NODOS AFECTADOS

Retirar la pieza "shell auxiliar" del ensamble desde el árbol de instrucciones, asegurar que el ensamble resulte como en la figura 8.26.



FIGURA 8.26 MODELO FINAL

Módulo de Job

En este módulo solo se crea un análisis con el nombre de "Llenado".

Módulo Visualization

Visualizar los resultados que entrega la variable "EVF_Assembly_Pieza euleriana-1_Material-1", enfocado en el perfil de la superficie libre y la valoración de la certeza que hay en el resultado obtenido con perfiles de gotas en caída libre.

Observar el resultado final, analizando el uso de la herramienta de corte en las vistas, transparencias, resultados vectoriales de volumen y velocidad durante el llenado.

Actividad para el alumno

La práctica es demostrativa ya que el uso de las piezas eulerianas no está disponible bajo la licencia académica y el tiempo de cálculo es muy extenso del orden de 139 h, para un tiempo simulado de 0.24 s de colada por gravedad.

Referencias

- 1. http://industrialmaterials20xx.blogspot.mx/2013/03/embutido.html
- 2. https://www.sharcnet.ca/Software/Abaqus/6.11.2/books/eif/deepdrawcup_mgax1.inp
- Simulia ABAQUS®6.12, "The volume fraction tool", ABAQUS® Abaqus/CAE User's manual, sección 28.5, 2012.
- 4. Simulia ABAQUS®6.12, "Equation of state", ABAQUS® Analysis User's manual, sección 25.2.1, 2012.
- 5. Olando, S. "Droplet Hitting Pool of Water High Speed". Publicado 13/07/2010
- 6. http://www.youtube.com/watch?v=3U3FMCGfEa0 (Consultado 31/10/2013)
- Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT). "From the Discovery Showcase: Invisible Worlds in the Water". Publicado 18/11/2010
- 8. http://www.youtube.com/watch?v=6KKNnjFpGto (Consultado 31/10/2013)
- 9. Davis, J., "Aluminum and Aluminum Alloys", ASM, Ed 3, 2005.
- 10. Davis, J., "Atlas of Strees-Strain Curves", ASM, Ed. 2, 2002
- 11. Groover M., "Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas", Prentice Hall, Ed. 1, 1993.
- 12. Martienssen, W. y Varlimont, H, "Handbook of Condensed matter and materials Data", Springer, Ed 1, 2005.
- 13. Schey J.A., "Procesos de manufactura", mc Graw-Hill, Ed. 3, 2002.
- http://www.aliexpress.com/promotion/promotion_extrusion-heat-sinks-promotion.html (Consultado el 13/02/2013).
- 15. http://cupruminc.com/ASL (Consultado el 13/02/2013).
- http://twt.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/HEDH/Tab-5-5-6-2-Therm-Cond-Solids.xmcd (Consultado el 20/02/2013).

- 17. http://www.engineeringtoolbox.com/young-modulus-d_773.html (Consultado el 20/02/2013).
- 18. http://www.ellwoodtexasforge.com/markets-aerospace-etfh.html
- 19. http://www.olx.com.mx/q/extrusion/c-207