



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

MODELADO DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN DIRECTA UTILIZANDO UN SISTEMA DE DOBLE DADO MEDIANTE FEM.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO

PRESENTA:

MAURICIO CRISTOBAL GRANADOS



DIRECTOR DE TESIS:

M. EN C. EDGAR ISAAC RAMÍREZ DÍAZ

CIUDAD UNIVERSITARIA 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

A mi familia, pues siempre han sido mi motor y red de seguridad. A mis padres, por su comprensión, cariño, apoyo brindado durante esta etapa y por el sacrificio que hicieron para que pudiera concluir mis estudios de licenciatura.

A mi director de tesis M. en C. Edgar Isaac Ramírez Díaz por su gran apoyo, interés y dedicación durante la realización de este trabajo, gracias por darme la oportunidad de ser parte de su equipo de trabajo y por los consejos que me proporcionó.

A la Universidad Nacional Autónoma de México que a través de la Facultad de Ingeniería me dio la oportunidad de estudiar en sus aulas para desarrollarme profesionalmente con una educación integral, libre y efectiva.

A mis compañeros y amigos de la facultad: Padilla, Pantoja, Lugo, Laylet, Nelly, Santibáñez, Francisco Muñoz y Manuel Salazar porque han sido valiosas amistades pero en especial por todos los momentos que compartimos.

A la Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales (UDIATEM) por compartir conmigo su experiencia y conocimientos, en específico al M. en C. Carlos Gabriel Figueroa Alcántara y al M. en C. Miguel Ángel Ramírez Toledo por las facilidades que me otorgaron durante mi estancia y por su apoyo en el préstamo de equipo de cómputo.

A mis sinodales: Dr. Armando Ortiz Prado, Dr. Víctor Hugo Jacobo Armendáriz, M. en C. Ubaldo Márquez Amador y el M. en C. Osvaldo Ruiz Cervantes, por todas las aportaciones y comentarios que hicieron durante la revisión de este trabajo.

Prólogo

Para producir tubos sin costura con tolerancias pequeñas mediante el proceso de extrusión, se utiliza un mandril en el extremo del vástago, el cual obliga al material a fluir a través de este formándose la geometría interna del tubo. Dicha técnica se utiliza en aleaciones de aluminio de la serie 6xxx y 7xxx porque presentan baja resistencia al esfuerzo cortante a la temperatura de extrusión, sin embargo, se presenta la dificultad del correcto centrado del mandril que produce que el espesor no sea homogéneo.

Otra forma de producir tubos sin costura es mediante un sistema de doble dado, en el que un elemento de pequeña longitud dentro de la matriz funge como mandril, el dado superior genera una serie de alimentaciones distribuidas para que al contacto entre ellas se suelden mediante temperatura y presión, formando un flujo unitario alrededor del mandril.

El espesor del tubo se ajusta de acuerdo a la abertura que se genera entre el mandril y una sección circular en el dado inferior. Este proceso permite obtener secciones de gran longitud con exactitud de forma y dimensiones que se utilizan en la fabricación de perfiles estructurales huecos complejos como los intercambiadores de calor que incluyen aletas en su diseño.

El uso de este tipo de dados se basa en la experiencia de los diseñadores utilizando reglas empíricas, sin embargo, estos dependen del juicio personal, intuición y experiencia. Resulta complejo obtener información del material dentro de dichos dados, la implementación en paquetería de elemento finito permite revelar la distribución y evolución de la deformación plástica, fuerza de extrusión, velocidad de extrusión y esfuerzo efectivo dentro del dado.

El método acoplado euleriano lagrangiano (CEL) es una técnica de análisis que se utiliza en dinámica de fluidos y transferencia de calor, el uso de esta formulación evita problemas que se presentan en otras técnicas como la distorsión de malla. Dicha característica es útil cuando se quiere modelar procesos de conformado como la extrusión de perfiles de aluminio, por esta razón el presente trabajo utiliza el método CEL para analizar el proceso.

El objetivo de este trabajo consiste en verificar si el método CEL se puede utilizar en la extrusión de tubos de aluminio mediante el uso de un sistema de doble dado como el tipo ojo de buey (Porthole die en inglés). Por otro lado, observar el efecto en los resultados aumentando la velocidad de aplicación para disminuir el tiempo de cómputo y obtener resultados similares a los experimentales que realizó Hyung Ho Jo en 2005.

Este trabajo consta de 5 capítulos, los cuales se abordan de la siguiente manera; en el primer capítulo se plantean los aspectos generales del proceso de extrusión, se presentan las variables que intervienen en este y características del flujo de material, para conocer los antecedentes necesarios que involucra el proceso.

El segundo capítulo muestra una recopilación de trabajos experimentales desarrollados mediante elemento finito y sus alcances, para revisar metodologías utilizadas, formas de análisis de resultados y valores experimentales que pueden ser útiles en el desarrollo de este trabajo.

El tercer capítulo se enfoca en la construcción del modelo, se exponen las características de este, material utilizado, generación de malla y las condiciones necesarias con las cuales se logró obtener el producto extruido.

Los resultados que arrojó la simulación se muestran en el cuarto capítulo, donde se analiza la fuerza de extrusión, distribución de esfuerzos y deformaciones así como flujo de material en distintas etapas. Finalmente, se exponen las conclusiones obtenidas mediante este trabajo y se menciona qué parámetros del modelo se pueden cambiar para aproximar los resultados numéricos a los experimentales.

Índice

Capítulo 1 El proceso de extrusión.	1
1.1. Antecedentes.	1
1.2. Clasificación de los procesos de extrusión.	3
1.3. Materiales de extrusión y herramental.	6
1.4. Lubricación y fricción.	7
1.5. Prensas de extrusión.	8
1.6. Diseño de herramental.	9
1.7. Flujo del material.	12
1.8. Modelos analíticos.	13
Capítulo 2 Estado del arte del proceso de extrusión.	16
2.1. Optimización del dado para un perfil rectangular hueco.	16
2.2. Análisis de flujo de material de un perfil cuadrado.	19
2.3. Influencia de la temperatura inicial y espesor del dado en la elaboración de tubos.	21
2.4. Efecto de la velocidad de extrusión de un perfil hueco.	24
Capítulo 3 Modelado del proceso de extrusión con el método CEL.	25
3.1. Geometrías de los dados y lingote.	27
3.2. Propiedades del material.	29
3.3. Procedimiento de análisis.	29
3.4. Condiciones de contacto.	30
3.5. Condiciones de frontera.	31
3.6. Características del mallado.	32
Capítulo 4 Análisis de resultados.	35
4.1. Distribución de la deformación.	35
4.2. Distribución de esfuerzos.	39
4.3. Flujo de material.	43
4.4. Fuerza de extrusión.	47
4.5. Energía interna y cinética.	51
4.6. Tiempos de cómputo.	53
Capítulo 5 Conclusiones.	54
Bibliografía.	56

Capítulo 1 El proceso de extrusión.

1.1. Antecedentes.

La extrusión es la transformación que sufre un lingote normalmente cilíndrico que es obligado a fluir a través de un dado con la forma requerida, logrando un perfil que puede ser hueco o sólido de sección transversal constante [1]. (Figura 1.1).



Figura 1.1 Proceso de extrusión donde el lingote se somete a un cambio de geometría. [2]

Las piezas fabricadas mediante este método permiten modificar la estructura del grano y la resistencia del material que se esté trabajando, las tolerancias logradas son muy pequeñas en especial en la extrusión en frío.

La extrusión permite producir perfiles con geometrías complejas como los que tienen ángulos reentrantes que no pueden generarse mediante formado con rodillos, laminación de perfiles o producirse por algún otro método. En algunos casos se hacen partes grandes que sustituyen a muchas partes individuales y sujetadores, por ejemplo, la sección acostillada para el ala de un bombardero. Por otro lado, se logran producir piezas pequeñas en grandes cantidades, por ejemplo, la extrusión de un engrane largo que se corta en engranes individuales.

La aplicación más conocida es la cancelería, con perfiles de aluminio empleados en ventanas y puertas, sin embargo también existen aplicaciones estructurales para aviones y automóviles. El uso de perfiles de aluminio se muestra en la construcción de un prototipo en un bote de aluminio (Figura 1.2)

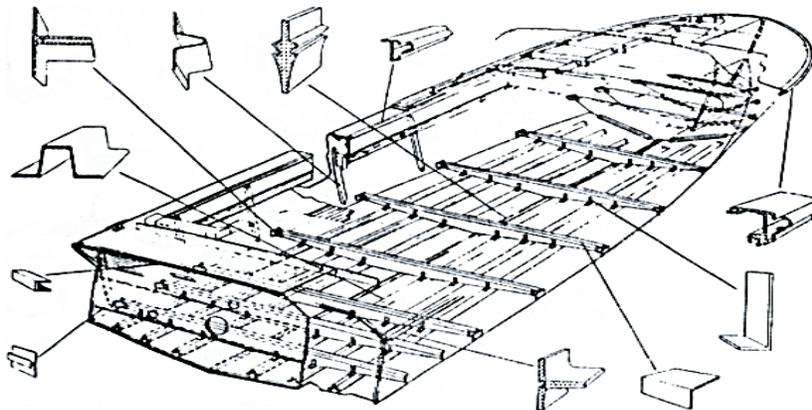


Figura 1.2 Variedad de perfiles extruidos utilizados en la construcción de un bote. [3]

Una costilla de nariz de un alerón de aviación se puede fabricar con diferentes métodos, cada uno requiere inversión y herramental específico, si las propiedades físicas y mecánicas no son factor de decisión para elegir un proceso, el número de piezas a fabricar puede ser una variable que permita elegirlo. (Figura 1.3)

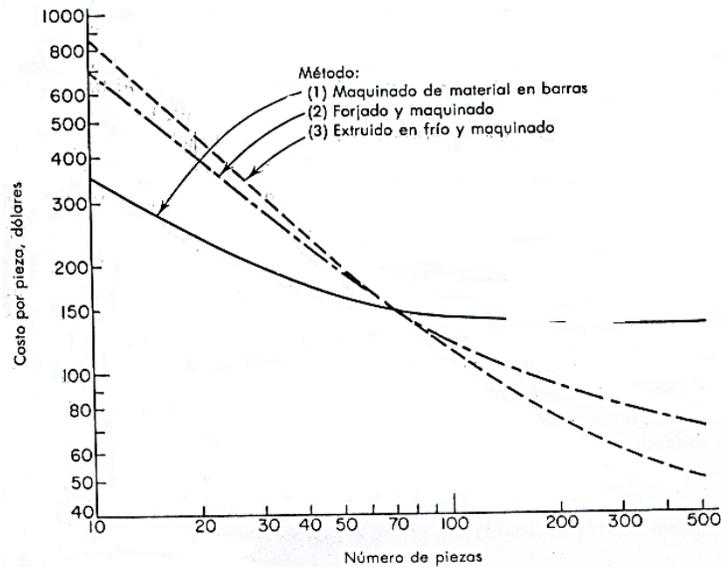


Figura 1.3 Costos relativos para tres métodos de fabricación en función de la cantidad. [4]

El aluminio se utiliza en disipadores de calor debido a su alta conductividad térmica (Figura 1.4). Aunque las geometrías de intercambiadores de calor también se pueden producir mediante fundición es preferible fabricarlos mediante extrusión debido a que no presenta porosidad interna y la conductividad térmica es sensiblemente mayor.

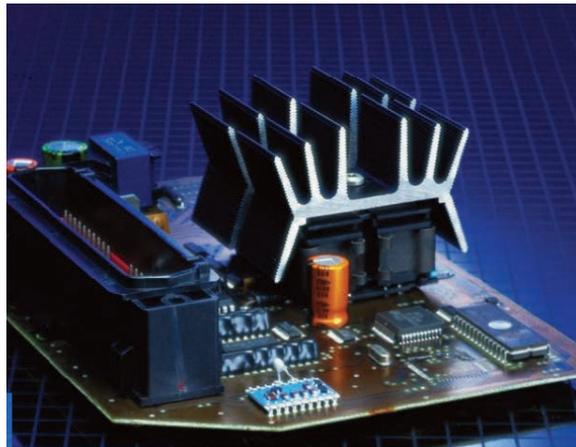


Figura 1.4 Extrusión de aluminio utilizada como disipador de calor para una tarjeta de circuitos impresos. [2]

El aluminio es el metal más extruido debido a sus propiedades, el producto final es ligero, con propiedades mecánicas aptas para aplicaciones estructurales y es resistente a la corrosión. En 2013 los productos extruidos representaban más del 50 % del mercado europeo de productos de aluminio. Por esta razón, el presente trabajo tomará al aluminio como el material a analizar. [5]

1.2. Clasificación de los procesos de extrusión.

En función del recorrido del pistón se clasifica como extrusión directa e inversa y de acuerdo a la temperatura de operación con respecto a la temperatura de recristalización se define como extrusión en caliente o frío.

1.2.1. Extrusión directa

La extrusión directa se muestra en la figura 1.5a. Un tocho de metal se coloca en un recipiente y mediante una prensa se comprime, forzándolo a fluir a través de una o más aberturas. En este caso el metal fluye en la misma dirección que el pistón. La presión se vuelve función de la longitud del lingote debido a que el tocho se desplaza con respecto a la cámara de compresión.

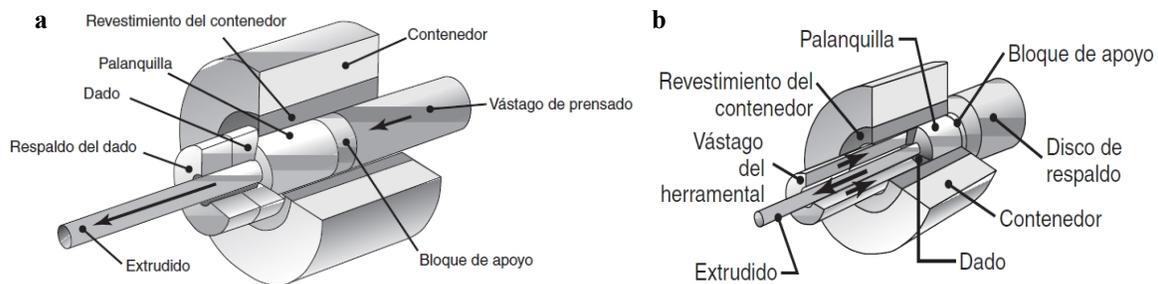


Figura 1.5 a) Esquema del proceso de extrusión directa, b) Esquema del proceso de extrusión inversa [6]

Una porción del tocho permanece dentro de la cámara y no puede forzarse a través de la abertura, esta porción extra llamada tope, cabeza o descarte se separa de la cámara para su posterior reciclado. Dado que el flujo de material a través del dado no es homogéneo y se concentran los defectos al final del ciclo es común extruir el tocho hasta un máximo de 85 a 95 % de su longitud original, sin embargo, la magnitud del tope es función de la zona muerta. De manera alternativa se coloca otro lingote o bloque de grafito para extruir la pieza que queda de la extrusión anterior. [1][6][7][8]

Un problema que presenta la extrusión directa es la fricción que existe entre la superficie del tocho y la del contenedor, esto provoca el aumento de la fuerza requerida para extruir el material; también se presenta una capa de óxido en la superficie del tocho que puede ocasionar defectos en los productos extruidos.

Para resolver este último problema se utiliza un bloque simulado entre el ariete y el tocho de trabajo, el diámetro del bloque es ligeramente menor que el diámetro del tocho, de manera que en la cámara queda un anillo que presenta capas de óxido en su mayoría llamado costra, dejando el producto final libre de defectos [1]. La mayoría de los productos extruidos requieren de un enderezado, en especial los que tienen secciones transversales pequeñas. [6]

La tolerancia que presentan metales suaves en extrusión en caliente como el aluminio es de $\pm 125 \mu m$, en cambio para extrusiones de acero varían desde $\pm 0.75 mm$ para una pulgada. [4]

1.2.2. Extrusión inversa

También se conoce como extrusión indirecta o hacia atrás (Figura 1.5b). El dado se monta en el extremo del ariete obligando al material a fluir a través de él en dirección opuesta a su movimiento. Como el tocho no se mueve respecto a la cámara, no existe fricción entre ellos por lo tanto la fuerza necesaria para extruir es menor que la utilizada en extrusión directa (del 25 al 35 % con respecto a la carga máxima). Al igual que la extrusión directa, existe la formación de tope. [9][10]

Debido a las características del proceso se presentan limitaciones como; menor rigidez del ariete hueco y la dificultad de sostener el producto extruido tal como sale del dado, esto involucra el uso de herramental complicado, lo cual restringe su campo de aplicación permitiendo que la extrusión directa sea el método más utilizado. Otro inconveniente es la longitud de la pieza extruida, ya que está limitada a la distancia del ariete hueco. Para extrusión en frío se logran tolerancias de hasta $\pm 25 \mu m$, para paredes de 3 mm de espesor se tiene $\pm 0.25 mm$ y $\pm 0.5 mm$ cuando son más gruesas. [4]

En la figura 1.6 se presenta el comportamiento de las curvas de extrusión directa e indirecta. La curva de la figura 1.6 se divide en tres secciones

Sección O-A. El lingote es comprimido llenando la cámara de extrusión, la presión aumenta rápidamente hasta alcanzar el valor máximo en el punto A. El punto A de la extrusión directa es mayor al de la indirecta debido a la fricción existente con la cámara de compresión.

Sección A-B. La presión disminuye para la extrusión directa alcanzando el valor mínimo en el punto B. Para extrusión inversa la curva permanece constante, en ambos tipos se produce la extrusión en esta sección.

Sección B-C. La presión alcanza el valor mínimo en B, posteriormente existe un aumento de presión debido a la compresión del tope o descarte.

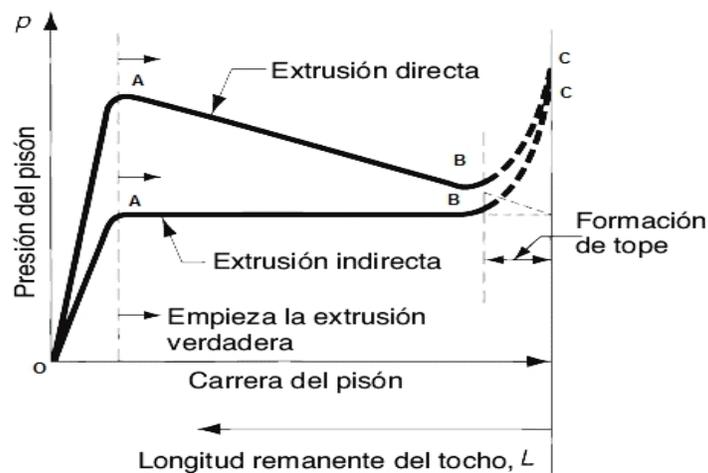


Figura 1.6 Comportamiento típico de la carga de extrusión en función del movimiento del pistón. [1]

1.2.3. Extrusión en caliente.

Algunos metales involucran el calentamiento previo del tocho para llegar a una temperatura por encima de la de recristalización. Esto reduce la resistencia y aumenta la ductilidad del metal, permitiendo mayores reducciones de tamaño y fabricación de formas más complejas, además de la reducción de fuerza en el ariete y mayor velocidad (Figura 1.7). La única desventaja la presenta el control dimensional del producto.

La extrusión en caliente produce barras largas o tubos de sección transversal constante es decir la fabricación de productos semifabricados, mientras que, en frío se obtienen piezas pequeñas que generalmente son productos terminados. [11]



Figura 1.7 Mediante el proceso de extrusión se logran perfiles complejos. [12]

Antes de la extrusión los lingotes de aluminio se calientan en hornos de túnel (eléctricos o de gas) que se encuentran a 700 °C a la entrada y a 600 °C a la salida, el calentamiento se mide con pirómetros de contacto y la temperatura a la que se encuentran es de 430 a 460 °C. [13]

El proceso de extrusión se realiza en caliente, a una temperatura de 2/3 de la temperatura de fusión en kelvin. Para aleaciones de aluminio el tocho se extruye de 340 a 510 °C dependiendo del contenido de la aleación. [14] [15]

1.2.4. Extrusión en frío.

Se efectúa por debajo de la temperatura de recristalización y se utiliza para producir piezas pequeñas. Algunas ventajas que presenta, es el aumento de la resistencia debido al endurecimiento por deformación, tolerancias estrechas, acabados superficiales mejores debido a la ausencia de capas de óxido y altas velocidades de producción.

Algunos materiales a temperatura ambiente se encuentran por debajo de la temperatura de recristalización. Esto no siempre es válido ya que algunos metales a temperatura ambiente se encuentran por arriba de esta temperatura como el estaño y plomo. [16]

El aumento de propiedades mecánicas debido al endurecimiento por trabajo, es válido cuando el calor generado por la deformación plástica y la fricción no recristalicen el metal extruido.

La extrusión en frío se realiza a velocidades de 250 a 1500 mm/s, esta velocidad aumenta la temperatura y requiere menor fuerza que si se hace con velocidades inferiores. [4]

1.3. Materiales de extrusión y herramental.

El aluminio es el metal que más se extruye, el uso de elementos aleantes como silicio, manganeso, magnesio, cobre, zinc, níquel y cromo modifican sus propiedades. La tabla 1.1 muestra las características del aluminio según el uso de elementos aleantes.

Tabla 1.1 Características del aluminio según el uso de elementos aleantes. [17][18]

Aleación (Serie)	Principales elementos aleantes y características
1xxx	Aluminio puro (99 % de pureza). Este tipo de aleación tiene una ductilidad y resistencia a la corrosión excelentes, su resistencia eléctrica es baja. Se considera una aleación suave, se utiliza en aplicaciones eléctricas y químicas.
2xxx	Cobre. Alta resistencia mecánica, baja resistencia a la corrosión y excelente maquinabilidad. Se considera una aleación dura y es la más empleada en naves militares.
3xxx	Manganeso. Baja a media resistencia mecánica, buena resistencia a la corrosión, pobre maquinabilidad. Otra de las llamadas aleaciones suaves.
4xxx	Silicio. No se utiliza para productos extruidos.
5xxx	Magnesio. Moderada resistencia mecánica, excelente resistencia a la corrosión, buena soldabilidad. Es llamada aleación dura y se utiliza en aplicaciones marítimas.
6xxx	Magnesio y Silicio. Buena resistencia mecánica, buena resistencia a la corrosión, buena maquinabilidad, buena soldabilidad. Es la aleación que más se produce y la que más se utiliza en productos extruidos, generalmente en cancelería.
7xxx	Zinc. Pobre resistencia a la corrosión, buena maquinabilidad. Es una aleación dura que se utiliza en elementos estructurales de aeronaves.

Además de la composición química se implementan tratamientos térmicos que aumentan las propiedades del material. Las series 1xxx, 3xxx y 5xxx no son tratadas térmicamente, para aumentar la resistencia se utiliza extrusión en frío. Las series 2xxx, 6xxx y 7xxx se tratan térmicamente [17]. Las aleaciones que más se extruyen son 1100, 3003, 6005, 6061, 6082, 7004 y la más utilizada es la 6063. [19]

Los materiales para dados de extrusión en caliente incluyen aceros para herramienta y aceros aleados, ya que requieren resistencia al desgaste, alta dureza y alta conductividad térmica, para remover el calor del proceso. El material que generalmente se utiliza es acero para herramienta H13. Para dados de extrusión en frío se incluyen aceros para herramienta y carburos cementados, estos requieren resistencia al desgaste sin perder su forma al someterse a altas cargas. Los carburos se utilizan cuando se requieren altas velocidades de producción y buen control dimensional.

Para extrusión de tubos y barras en caliente se aplican recubrimientos de zirconia para prolongar la vida de los dados, sin embargo, si se trata de dados para extrusiones complejas el revestimiento no es adecuado debido a los severos gradientes de esfuerzo desarrollados en el dado.

La tabla 1.2 muestra los materiales para el herramental y durezas requeridas para extrusión en caliente, la extrusión de aluminio en caliente es similar a la del magnesio, la única diferencia es la presión requerida.

Tabla 1.2 Materiales y durezas típicas para herramienta utilizadas en extrusión en caliente. [15]

Herramienta	Material a extruir					
	Aluminio y magnesio		Cobre y latón		Acero	
	Material de herramienta	Dureza HRC	Material de herramienta	Dureza HRC	Material de herramienta	Dureza HRC
Dados	H11, H12, H13	47-51	H11, H12, H13	42-44	H13	44-48
			H14, H19, H21	34-36	H21	51-54
Falso Lingote (Dummy block)	H11, H12, H13	46-50	H11, H12, H13	40-44	H11, H12, H13	40-44
			H14, H19	40-42	H14, H19	40-42
Mandril	H11, H13	46-50	H11, H13	46-50	H11, H13	46-50
Vástago	H11, H12, H13	40-44	H11, H12, H13	40-44	H11, H12, H13	40-44
Contenedor	4140, 4150	35-40	4140, 4150	35-40	H13	35-40

Además de los materiales citados en la tabla 1.2 se utilizan insertos de material y tratamientos térmicos, para herramientas utilizadas en la extrusión de geometrías complejas para adquirir mayor resistencia al desgaste por altas temperaturas. Los materiales que se agregan son carburos de tungsteno cementados, carburos de titanio, alúmina, asimismo se aplican tratamientos térmicos tales como la nitruración y revestimientos de aluminuros o el uso de deposición química de vapor.

1.4. Lubricación y fricción.

En extrusión en frío los principales lubricantes son aceites, ceras y grasas. Los sólidos como el grafito, disulfuro de molibdeno (MoS_2), óxido de zinc (ZnO) se agregan como lubricantes. [4]

Aun cuando el uso de lubricantes disminuye la fuerza de extrusión, en general no son utilizados debido a las dificultades para dosificarlos adecuadamente. Cuando no se utiliza lubricante la presión de extrusión aumenta, la magnitud de coeficientes de fricción para extrusión son difíciles de obtener y por lo general se estiman para un valor extremo considerando circunstancias de adherencia, por esta razón se requiere presión adicional para cortar el material que está unido a la pared. [20]

Para el análisis de extrusión se fijan valores de 0.5 para la fricción presente en la interfaz contenedor-tocho y de 0.3 para la fricción presente en el dado. [21]

1.5. Prensas de extrusión.

Actualmente las prensas de extrusión son de accionamiento hidráulico porque se puede controlar la carrera y velocidad de la operación, aplican una fuerza constante en una carrera larga, pueden ser verticales u horizontales dependiendo de la dirección del ariete, las más utilizadas son las horizontales. (Figura 1.8)

Generalmente las prensas horizontales son utilizadas en la producción de barras y perfiles comerciales con capacidades desde 250 a 5 000 toneladas, aunque existen algunas de 14 000 toneladas de capacidad. [6] En prensas horizontales la superficie inferior del tocho se enfría más rápido que la superior debido al contacto con el contenedor, aunque la cámara se calienta la deformación no es uniforme.



Figura 1.8 Prensa de 4 000 toneladas para extrusión de aluminio. [12]

Las prensas verticales tienen capacidades de 300 a 2 000 toneladas, estas producen deformación uniforme ya que el enfriamiento en el contenedor así lo es [9]. Para el aluminio puro la fuerza requerida va de las 40 a las 70 toneladas, esto depende de la composición, estructura y flujo. [22]

Los elementos de una prensa de extrusión se muestran en la figura 1.9. Esta tiene componentes como el cabezal fijo, un contenedor o cámara de compresión, los elementos de soporte, pistón con ariete para ejercer presión sobre el lingote y el sistema de control.

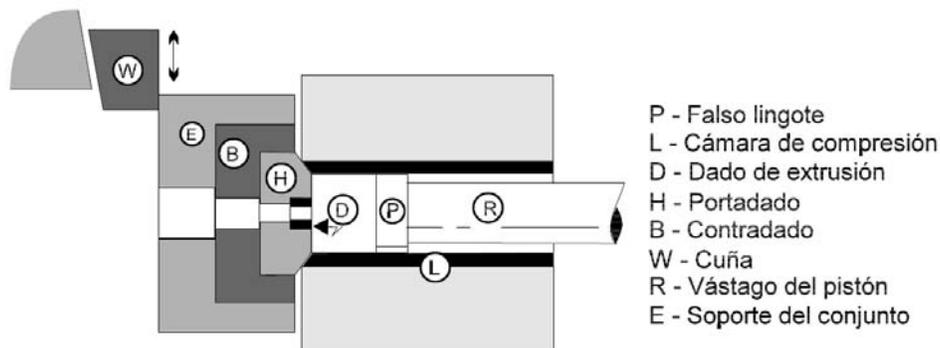


Figura 1.9 Representación esquemática de la prensa de extrusión. [14]

El pistón con ariete es el encargado de transmitir la carga al lingote, su diámetro debe ser menor que el de la cámara para evitar fricción entre estos. Para proteger el vástago de la prensa y homogeneizar la deformación del lingote se utiliza un disco o cojín llamado falso lingote o dummy block cuyo diámetro es menor que el del tocho a extruir, para evitar que partes de la superficie original sean extruidas previniendo defectos en piezas terminadas. [8]

La velocidad del ariete está en función del material que se utilice, por ejemplo en aleaciones de alto punto de fusión se requieren velocidades de 416 a 666 mm/s para evitar problemas de transferencia de calor, sin embargo, materiales como el aluminio requieren una velocidad del pistón de 1.6 mm/s aproximadamente. Para materiales como magnesio y cobre se utilizan velocidades inferiores a 500 mm/s [6] [14]

1.6. Diseño de herramental.

Los perfiles extruidos se clasifican en sólidos, huecos y semihuecos. Los perfiles huecos son aquellos que tienen vacíos en su geometría, mientras que los sólidos no presentan dichas cavidades. (Figura 1.10)

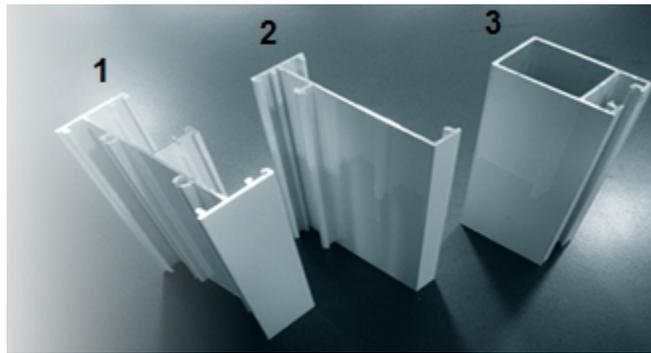


Figura 1.10 Ejemplos de secciones sólidas y huecas. Los perfiles 1 y 2 son sólidos, el perfil 3 es un perfil hueco ya que encierra un vacío dentro de la geometría. [23]

Existen consejos de diseño de perfiles que ayudan a evitar la formación de defectos. La figura 1.11 menciona las características a evitar y la forma adecuada que deben presentar los perfiles.

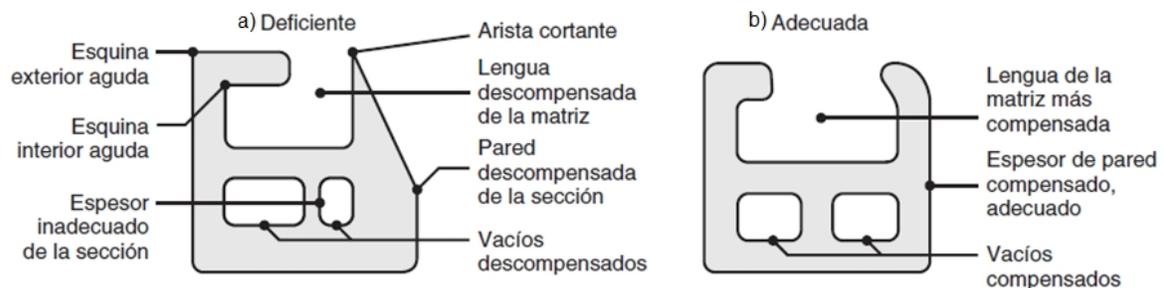


Figura 1.11 Ejemplos de secciones transversales. a) Diseño deficiente, b) Diseño adecuado. [6]

El tamaño de la forma extruida se mide por el diámetro que circunscribe la sección transversal de la pieza terminada, Esta dimensión se conoce como diámetro de círculo circunscrito, CCD por sus siglas en inglés (Figura 1.12).

Las extrusiones se limitan a piezas que pueden ser contenidas por un círculo de 43.18 cm (17 pulgadas) de diámetro para aluminio y de 15.24 cm (6 pulgadas) para el acero.

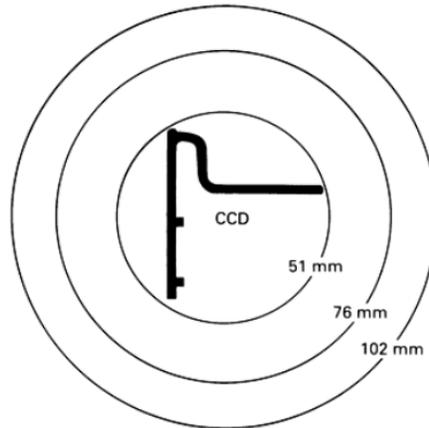


Figura 1.12 Definición del tamaño de un perfil extruido mediante el diámetro de un círculo circunscrito. [15]

El precio de los dados de extrusión depende del material, la complejidad del perfil y la cantidad que se solicite, en la tabla 1.3 se muestran precios sugeridos de acuerdo al CCD sin tomar en cuenta ciertos factores como el peralte del dado.

Tabla 1.3 Precios indicativos de dados de acuerdo al tamaño del CCD (2014). [24]

Tipo de perfil	CCD mm (Círculo circunscrito)				
	0-75	46-120	121-160	161-210	211-250
Sólido	1100 EUR	1300 EUR	1500 EUR	2000 EUR	2400 EUR
Hueco	1800 EUR	2100 EUR	2500 EUR	3500 EUR	5000 EUR

El dado, boquilla, troquel o abertura se muestra en la figura 1.13. Por su forma, los dados se clasifican en rectos o cónicos. En dados rectos el ángulo de entrada es de 90°, al fluir metal se forman zonas muertas formando su propio ángulo de entrada, estos se utilizan en materiales no ferrosos, en particular el aluminio. Para dados con entrada cónica el ángulo del dado es menor a 90°, al reducir el ángulo se logra mayor homogeneidad en la deformación y reduce la presión de extrusión. El rango de dicho ángulo varía de 45 a 60°.



Figura 1.13 Dado mediante el cual se crea el perfil deseado con sección transversal constante [12]

Los factores importantes en un dado de extrusión son el ángulo de dado y la forma de la cavidad. La mitad del ángulo del dado es el ángulo α . Para ángulos menores el área superficial del dado aumenta, así como la fricción entre dado y tocho, aumentando la fuerza en el pistón. En cambio para ángulos grandes se producen vórtices en el flujo del metal durante la reducción, incrementando la fuerza requerida del pistón.

El aluminio suele extruirse en caliente con dados rectos y sin lubricante provocando que la superficie del producto terminado sea brillante y satinada debido a la interacción con la zona de metal muerto.

Para secciones transversales huecas que tienen espesores pequeños se utilizan cámaras de soldadura en dados conocidos como dados de araña, dados tipo ojo de buey y dados tipo puente (Figuras 1.14 y 1.15). La geometría de estos dados permite que el material se divida y fluya alrededor de los soportes del mandril interno formando filamentos que fluyen a través de canales convergentes, estos se integran como un solo elemento bajo las altas presiones existentes en la cámara de soldado antes de salir del dado.

Las uniones soldadas tienen buena resistencia porque no se exponen al ambiente evitando la formación de óxidos y aumentando la calidad de las soldaduras. Sin embargo el uso de cámaras de soldadura resulta adecuado para el aluminio y algunas de sus aleaciones, aunque el uso de dicho método prohíbe el uso de lubricantes ya que estos evitan la resoldadura del material dentro del dado.

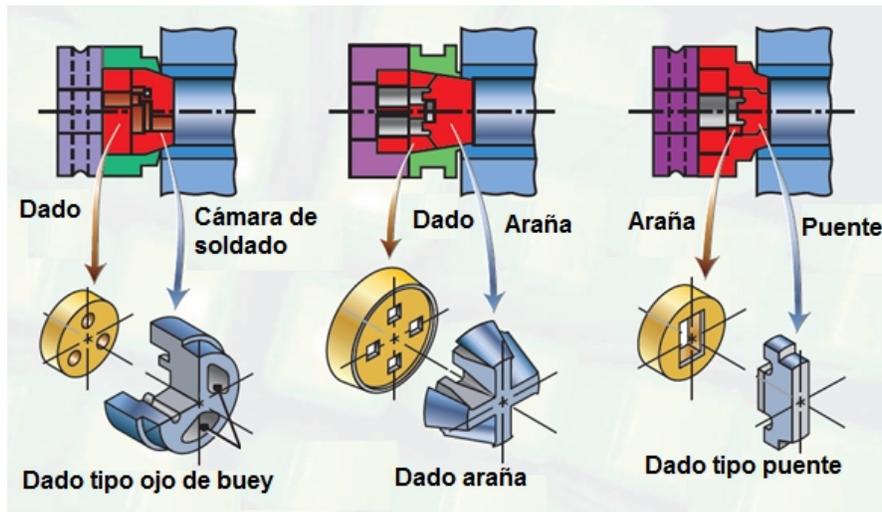


Figura 1.14 Componentes de diversos dados para extrusión de formas huecas. [25]

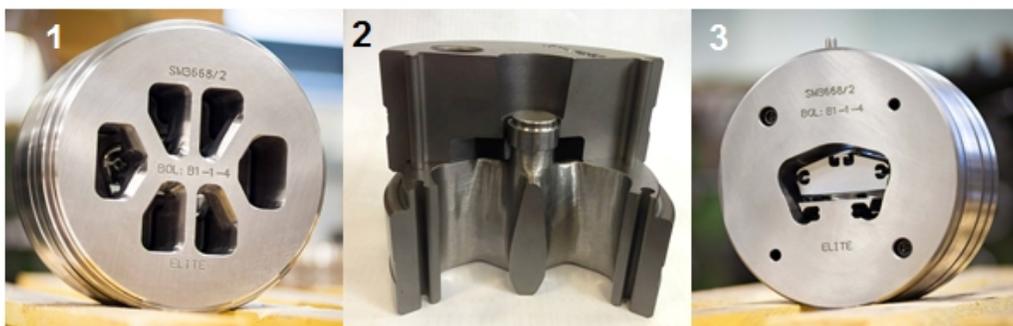


Figura 1.15 Diferentes tipos de dados. 1. Dado tipo ojo de buey. 2. Dado araña. 3. Dado tipo puente. [26]

1.7. Flujo del material.

El patrón de flujo del metal es importante por su influencia en la calidad y las propiedades mecánicas del producto extruido. El material fluye longitudinalmente similar a un fluido incompresible por lo que los productos extruidos presentan una estructura de granos alargada.

El proceso de extrusión depende de las condiciones del metal y de la manera en que ha sido preparado. En materiales como plomo, el plomo-estaño y antimonio no se presentan problemas de fricción o flujo de material como el aluminio debido a su carácter graso y su alta plasticidad.

Uno de los autores que aportó estudios sobre el flujo de un lingote metálico fue Claude Edmund Pearson en su libro *The extrusión of metals* de 1944, donde se muestra que el flujo del material varía con el tiempo durante el ciclo de trabajo. Sin embargo existen numerosas investigaciones sobre este tema. Pearson dibujaba en un lingote cilíndrico de estaño un patrón o red de alambre, el lingote se analizaba y de la distorsión de la red se determinaba el valor de la deformación.

Actualmente se utiliza un método similar donde el lingote se divide en dos partes longitudinalmente, se marca un patrón de rejilla cuadrada y estas se colocan juntas para posteriormente extruirse y se separan para analizarlas en forma individual. (Figura 1.16)

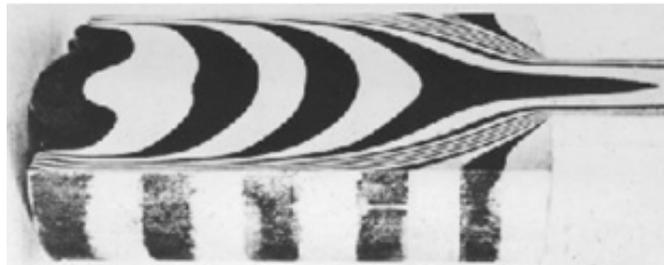


Figura 1.16 Representación gráfica del patrón de flujo de un lingote en extrusión directa. El centro de lingote fluye más rápido que los extremos de acuerdo a las bandas negras de la imagen. [2]

El flujo de material también se analiza de acuerdo al tipo de dados que se esté utilizando. Para dados rectos se presentan tres casos, en la figura 1.17a se muestra el patrón obtenido a baja fricción, este patrón también se presenta en la extrusión inversa y cuando las condiciones de lubricación son buenas.

En la figura 1.17b se muestra un patrón donde el material es homogéneo con fricción presente en el lingote y la cámara, este tipo de patrón es ideal para el proceso de extrusión directa. Para el tercer caso (Figura 1.17c) se presenta una zona muerta mayor debido a la alta fricción y al enfriamiento de las regiones exteriores del lingote, dicho comportamiento se presenta en metales donde la resistencia aumenta con rapidez al disminuir la temperatura provocando defectos tipo tubo.

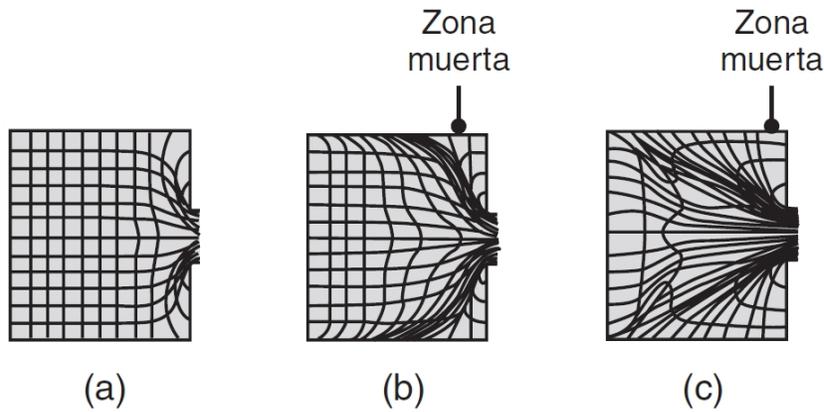


Figura 1.17 Tipos de flujo metálico en la extrusión con dados rectos. [6]

1.8. Modelos analíticos.

Un parámetro importante es la relación de extrusión que se define como el cociente de la sección transversal del lingote y la sección trasversal extruida. La relación se define como: [1]

$$R_e = \frac{A_0}{A_f}$$

Donde R_e es la relación de extrusión, A_0 es el área de la sección transversal del tocho inicial, A_f es el área final de la sección transversal de la pieza extruida. El valor de R_e se utiliza para determinar la deformación real de la extrusión, por otro lado, la deformación ideal no considera condiciones de fricción y trabajo redundante (Figura 1.18). [1]

$$\epsilon = \ln R_e = \ln \frac{A_0}{A_f}$$

En la práctica las relaciones de extrusión van de 10 a 100 aunque existen relaciones de 400 presentes en metales no ferrosos blandos. Esta debe ser por lo menos de 4 para deformar plásticamente todo el material de trabajo y de 8 para eliminar la estructura de fundición. [6][14]

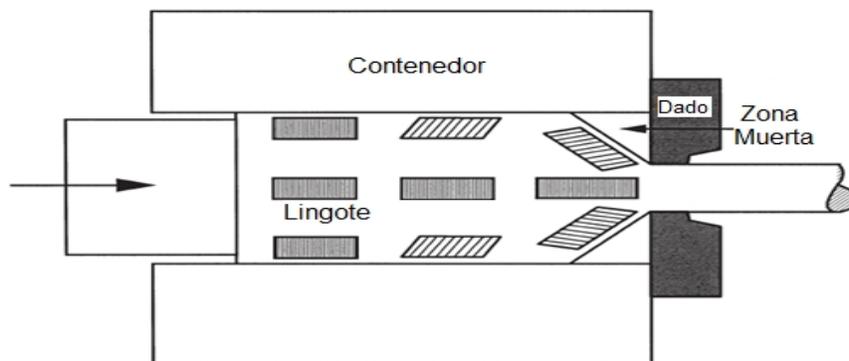


Figura 1.18 Definición de trabajo redundante, elementos del tocho modifican su orientación geométrica durante la extrusión. [27]

El efecto de la velocidad de deformación ($\dot{\epsilon}$) es importante durante la extrusión en caliente, su valor está dado por: [9] [20]

$$\dot{\epsilon} = \frac{6 v D_0^2 \tan \alpha \ln R_e}{D_0^3 - D_f^3}$$

Donde v es la velocidad del pistón, D_0 es el diámetro inicial del tocho, D_f se refiere al diámetro final de la sección extruida y α es el ángulo que se forma durante la extrusión, generalmente es de 45° debido a la formación de zonas muertas. En caso que el producto final no sea circular se obtiene el área de la sección transversal del producto final, posteriormente, se iguala al área de un círculo y despejando D_f se calcula este.

Una sección transversal compleja requiere mayor presión y fuerza que una circular. Para geometrías complejas se utiliza el factor de forma (K_e), la ecuación empírica para el factor de forma está dada por: [8]

$$K_e = 0.98 + 0.02 \left(\frac{C_x}{C_c} \right)^{2.25}$$

Donde C_x es el perímetro de la sección transversal extruida y C_c es el perímetro del círculo de área equivalente de la geometría extruida.

Existen diversos métodos para calcular la deformación real y la presión del pistón necesaria para extruir. La ecuación empírica propuesta por Johnson en 1962 para estimar la deformación por extrusión ha ganado considerable reconocimiento: [1] [9]

$$Q_e = a + b \ln R_e$$

donde Q_e es la deformación de extrusión, a y b son constantes empíricas llamadas constantes de Johnson. El valor de a se refiere a la carga en el dado y su magnitud es de 0.8, por otro lado, b es la carga por deformación redundante y su magnitud varía de 1.2 a 1.5. Los valores de a y b tienden a aumentar cuando se incrementa el ángulo del dado.

Para que la extrusión sea exitosa, la fuerza de la prensa (F_p) debe ser mayor a la fuerza de extrusión (F_e), dicha magnitud se selecciona de acuerdo a catálogos, seleccionando el valor inmediato superior. La fuerza de extrusión se define como: [8]

$$F_e = \sigma A_0 K_e \left(Q_e + \frac{2l}{D_0} \right)$$

Donde $\sigma = C \dot{\epsilon}^m$ [1], C es el coeficiente de resistencia y m es el exponente de sensibilidad a la velocidad de deformación y l es la longitud del tocho.

Para seleccionar el equipo de un proceso de extrusión es necesario determinar la carga P requerida:

$$P = P_e A_0$$

Donde P_e es la presión de extrusión, este se considera como: [14]

$$P_e = \alpha \sigma_0 \ln R_e$$

Siendo σ_0 el esfuerzo de cedencia promedio. La expresión anterior no considera los efectos que presenta la fricción entre el contenedor y el lingote.

Para determinar la pérdida de carga en 1953 el investigador G. Sachs utilizó el método del planchón. El análisis se realizó en un dado cónico y utilizó la fricción por deslizamiento de Coulomb, sin embargo no consideró la deformación redundante. La pérdida se define como: [9]

$$P_d = \sigma_0 \left(\frac{1+B}{B} \right) (1 - R_e^B)$$

Donde $B = \mu \cot \alpha$, siendo μ el coeficiente de fricción.

A pesar del cálculo de la pérdida de material, para extrusión directa se emplean ecuaciones de la forma: [14]

$$P_e = \sigma_0 \left[a + b \ln R_e \exp \left(\frac{4 \mu l}{\alpha} \right) \right]$$

El término exponencial representa la pérdida de carga por fricción en la cámara, mientras que el logaritmo representa el trabajo de deformación.

Capítulo 2 Estado del arte del proceso de extrusión.

Se presentan trabajos previos para establecer el estado del arte, revisar metodologías utilizadas, formas de análisis de resultados y valores que pueden ser útiles para el modelado a desarrollar en este trabajo.

2.1. Optimización del dado para un perfil rectangular hueco.

El objetivo de este artículo consistió en verificar los efectos que producen las variaciones del dado superior de extrusión para analizar el flujo de material y distribución de esfuerzos. Se parte de una geometría y se realizan tres modificaciones para obtener el diseño óptimo.

En el primer diseño se redujo el área transversal de los ojos de buey localizados en el lado corto del perfil para disminuir el volumen que fluye en esa parte. En el segundo diseño se incrementó la longitud del mandril en el lado corto para aumentar la resistencia debido a la fricción y así reducir el flujo de material. Finalmente se realizó un tercer diseño donde se modificó el patrón de los ojos de buey para homogeneizar la resistencia a fluir y obtener velocidades de flujo a la salida uniformes.

Se utilizó el software Msc/SuperForge[®] mediante el método del volumen finito (FVM por sus siglas en inglés) la cual se utiliza para la simulación de transferencia de calor y dinámica de fluidos. FVM evita la distorsión y regeneración de malla que se presenta durante la extrusión debido a que emplea una malla euleriana.

El dado de extrusión está compuesto por cuatro componentes; macho (dado superior), hembra (dado inferior), pasadores y pernos de acoplamiento (Figuras 2.1 y 2.2). La cámara de soldadura se encuentra en el dado inferior y funge como colector de material que posteriormente se suelda creando una entidad que fluye a través de la abertura que crea la unión de dados superior e inferior. El dado superior actúa como mandril, la geometría de este determina y regula la velocidad del flujo.

La longitud del lingote utilizado es de 70 mm y con un diámetro de 190 mm, la temperatura inicial es de 450 °C mientras que la de la herramienta es de 400 °C. El coeficiente de fricción es de 0.5, el desplazamiento total que se modeló es de 36 mm, la velocidad del pistón es de 3 mm/s. El material a extruir es aluminio AA1100 y la herramienta de trabajo es acero H13, las propiedades de cada uno se presentan en la tabla 2.1. Debido a la deformación y geometría simétrica se analiza $\frac{1}{4}$ del modelo.

El espesor del perfil rectangular es de 3.1 mm, durante el periodo de 0 a 80 % del recorrido el tamaño de los elementos es de 4 mm, en cambio, del 80 a 100 % del recorrido los elementos son de 2 mm debido a que el material comienza a fluir por la abertura del dado.

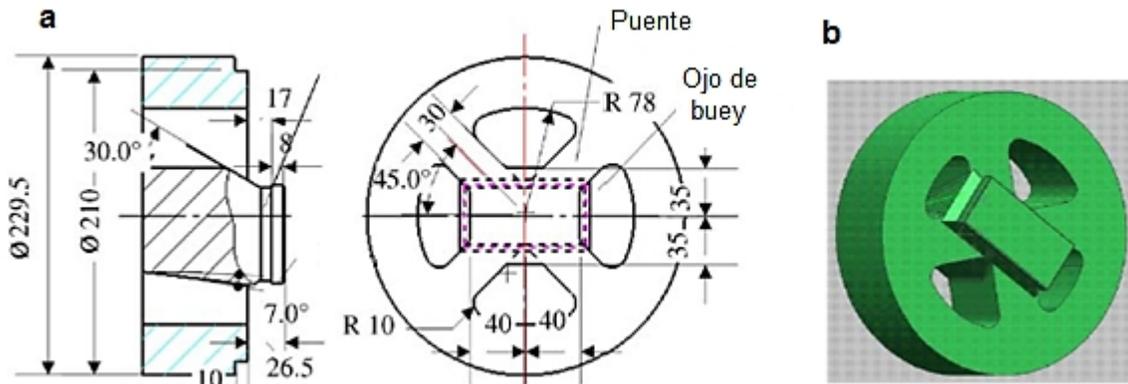


Figura 2.1 Dado superior de extrusión a) Dibujo 2D, b) Modelo 3D. [28]

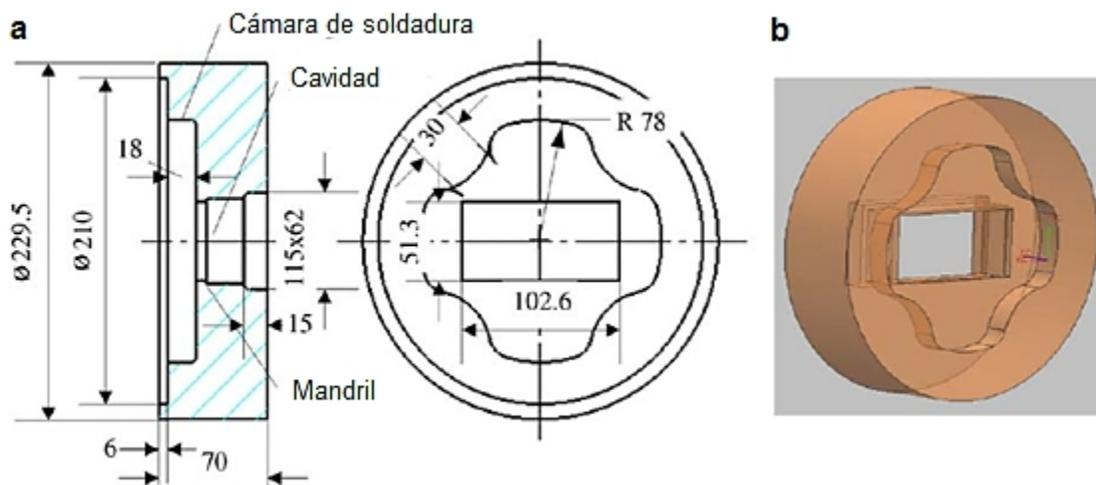


Figura 2.2 Dado inferior a) Dibujo 2D, b) Modelo 3D. [28]

El esfuerzo de fluencia del material AA1100 se definió como: $\bar{\sigma} = \max(s, C\bar{\epsilon}^N)$ donde la constante del esfuerzo de fluencia C y el exponente de endurecimiento por deformación N dependen de la temperatura y el esfuerzo efectivo, s es el esfuerzo de cedencia mínimo del material.

Tabla 2.1 Propiedades de material utilizado. [28]

Material	Módulo de Young (Pa)	Coefficiente de Poisson	Densidad (kg/m ³)	Conductividad térmica (W/(mk))	Calor específico (J/(kg k))
AA1100	6.9 E+10	0.33	2710	222	904
H13	2.1 E+11	0.30	7800	24.6	460

Cuando el pistón recorre 36 mm el material comienza a fluir por la abertura que forma la geometría final, la simulación del diseño original muestra que en el lado corto del rectángulo el material fluye más rápido que el resto. (Figura 2.3a). Se observa que el flujo a la salida del dado es desigual ya que en los extremos cortos es mayor al de los largos, para evitar esto se disminuye el área de los ojos de buey para cambiar la distribución del material, sin embargo el material que se encuentra en los lados cortos sigue saliendo antes que el material de los lados largos (Figura 2.3b).

La segunda modificación no es la óptima ya que el material se puede contraer debido a que el enfriamiento no es uniforme (Figura 2.3c). La tercera modificación cambia el ángulo inicial del mandril de 90° a 30° y el ángulo de 7° a 90° , además disminuye el área de los ojos de buey, al combinar dichos cambios el material presenta la misma resistencia al flujo en toda la periferia ya que la velocidad del flujo no es uniforme lo cual repercute en la extrusión del perfil de manera uniforme. (Figura 2.3d)

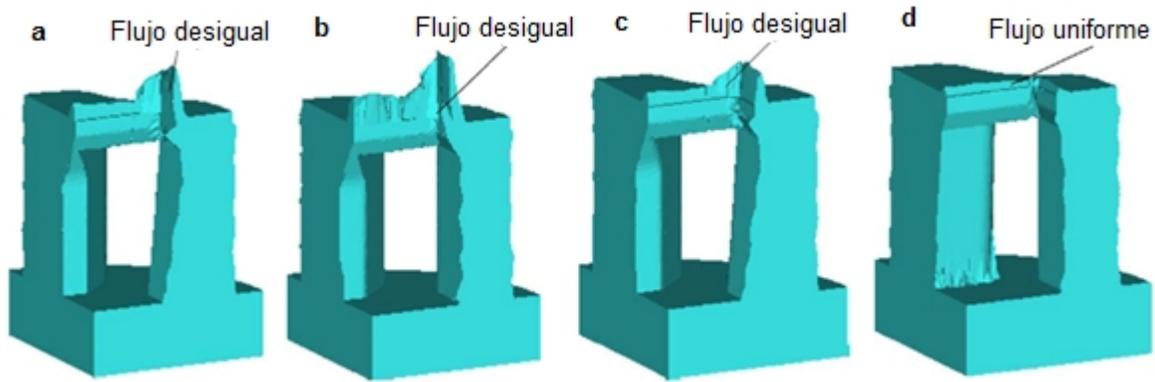


Figura 2.3 Extrusión en los diversos dados utilizados. a) Dado original, b) Primera modificación, c) Segunda modificación, d) Tercera modificación. [28]

Ya que el flujo es uniforme en la tercera modificación se comparan los resultados obtenidos con la geometría original. La comparación de las curvas carga-desplazamiento se muestra en la figura 2.4. El valor pico en el dado superior del diseño original es de 6.319 MN mientras que el diseño óptimo es de 3.007 MN presentando un decremento del 48 %. Para el dado inferior existe un decremento del 45.7 % ya que el valor del dado original es de 6.018 MN y el óptimo es de 3.267 MN.

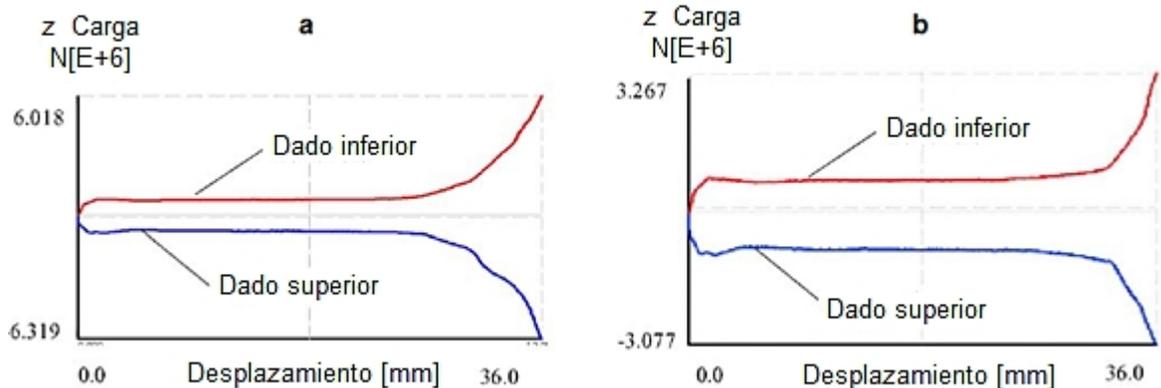


Figura 2.4 Comparación de curvas carga-desplazamiento a) Diseño original, b) Diseño óptimo (tercera modificación). [28]

El valor máximo de la distribución del esfuerzo efectivo en el diseño original se presenta en el punto donde el material fluye del ojo de buey a la cámara de soldadura y se mantiene constante a través del plano de soldadura, en cambio, el diseño óptimo muestra una distribución uniforme del esfuerzo efectivo. El valor máximo es de $4.240 \text{ E}+7 \text{ Pa}$ en el diseño original y de $3.456 \text{ E}+7 \text{ Pa}$ en el óptimo.

Se concluye que mediante la utilización de FVM el dado original no es el mejor porque el flujo es desigual, mediante modificaciones geométricas el flujo es uniforme en la salida del dado. La velocidad de flujo es un parámetro fundamental que mejora la distribución de esfuerzo y deformación uniforme, además disminuye la carga en el dado aumentando la vida útil de este.

2.2. Análisis de flujo de material de un perfil cuadrado.

En este artículo se utilizó un dado tipo ojo de buey y se investigó el flujo de una aleación de magnesio para producir un perfil cuadrado. Validando el modelo comparado con investigaciones experimentales. Además se aumentó la velocidad del pistón para evaluar la carga de extrusión necesaria.

El material a extruir es una aleación de magnesio AZ31 y la herramienta de trabajo es acero H13, las propiedades utilizadas se presentan en la tabla 2.2. En la figura 2.5a se muestra el perfil cuadrado a extruir y en la figura 2.5b el diseño del dado. Para reducir el costo computacional solamente se analiza $\frac{1}{4}$ del modelo debido a que la herramienta y el material a extruir son simétricos.

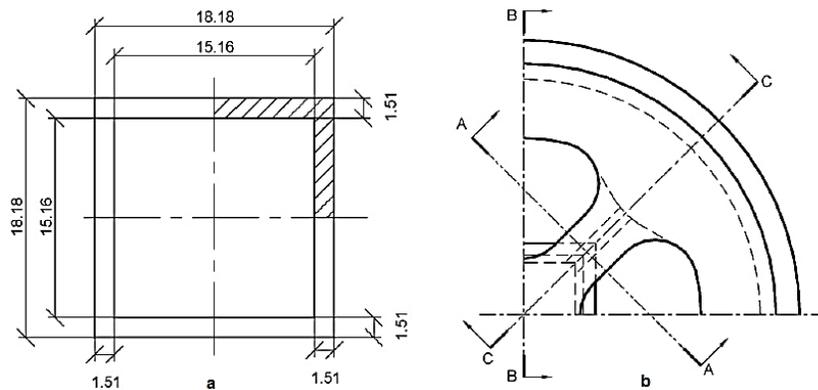


Figura 2.5 a) Perfil cuadrado, la sección sombreada es la sección que se modeló, b) Dado utilizado durante la extrusión. [29]

Tabla 2.2 Propiedades de material utilizado [29]

Propiedad	AZ31	H13
Capacidad calorífica (N/(mm ² °C))	2.09684 a 327 °C 2.27484 a 527 °C	5.6
Conductividad térmica (N/(s °C))	96	28.4
Coefficiente de transferencia de calor entre la herramienta y el lingote (N/(s mm °C))	11	11
Coefficiente de transferencia de calor entre la herramienta-lingote y el aire (N/(s mm °C))	0.02	0.02
Emisividad	0.12	0.7

La temperatura inicial del tocho fue de 450 °C, la longitud y diámetro fueron 200 mm y 48.8 mm respectivamente, la relación de extrusión fue de 19.8 y la temperatura de la herramienta fue de 400 °C. La herramienta se malló con elementos tetraédricos, en la zona donde se extruye el tamaño mínimo es de 0.2 mm y el coeficiente de fricción que se utilizó fue de 1.0, el cual representa una condición extrema de adherencia.

La simulación se realizó en la paquetería Deform 3D[®] modelando el lingote como material termo-viscoplástico y la herramienta de trabajo como material termo-rígido, ambos modelos de material desprecian el comportamiento elástico.

Los resultados experimentales se obtuvieron de un pirómetro de múltiples longitudes de onda colocado a 200 mm de la salida del perfil extruido, la prensa que se utilizó fue de 2.5 MN. La figura 2.6a muestra la comparación de la curva carga-desplazamiento a una velocidad de 1 mm/s. La diferencia entre el valor máximo de la simulación y del experimento es del 14%, esto se produjo porque el valor de fricción utilizado es excesivo y el material no está totalmente adherido. La figura 2.6b compara la temperatura de extrusión de la simulación y los resultados experimentales, la mayor diferencia presente entre dichos valores es de 7 °C y se considera muy pequeña.

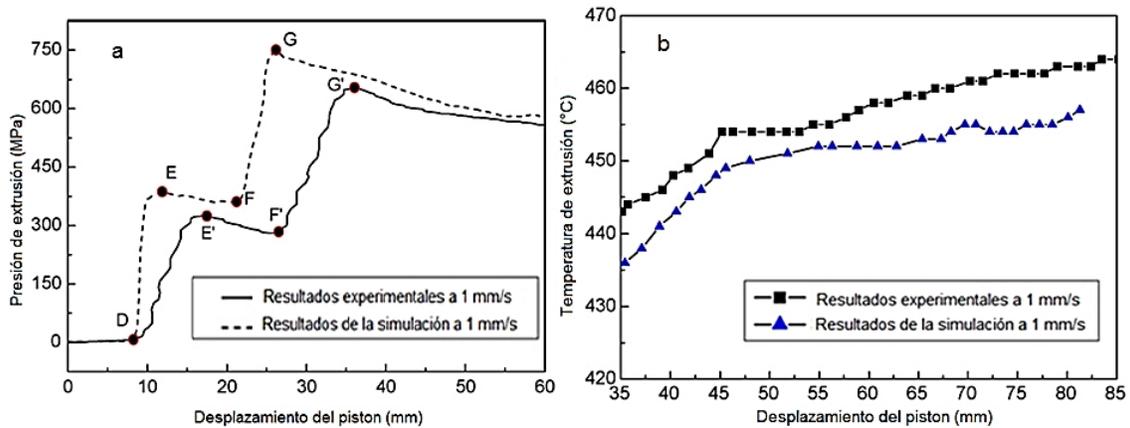


Figura 2.6 a) Curvas carga-desplazamiento a 1 mm/s, b) Evolución de la temperatura de extrusión [29]

La variación de la presión de extrusión de acuerdo al desplazamiento del pistón se muestra en la figura 2.7. La presión requerida es mayor cuando la velocidad del pistón aumenta. Con un desplazamiento de 40 mm, la diferencia en la presión de extrusión entre 1 mm/s y 7 mm/s es del 17.6 %

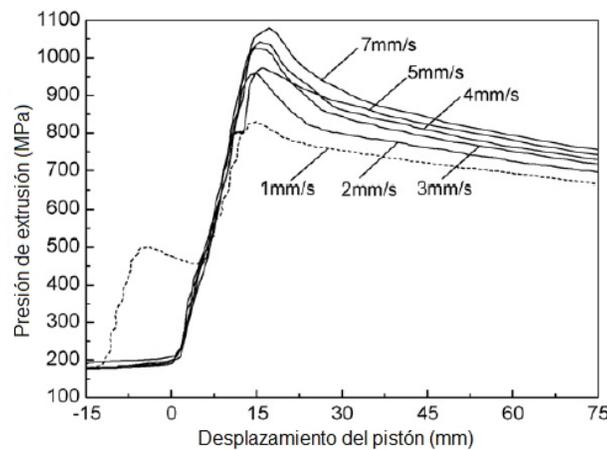


Figura 2.7 Presiones de extrusión experimentales a diferentes velocidades de extrusión [29]

El flujo del lingote a través de los ojos de buey se descompone en 3 estados; 1) división y extrusión de barras a través de los ojos de buey, 2) llenado de la cámara de soldadura y unión de material, 3) extrusión del perfil. La figura 2.8a muestra la evolución de la presión durante el recorrido del pistón, en las figuras 2.8b a 2.8f se visualiza de manera gráfica cada etapa.

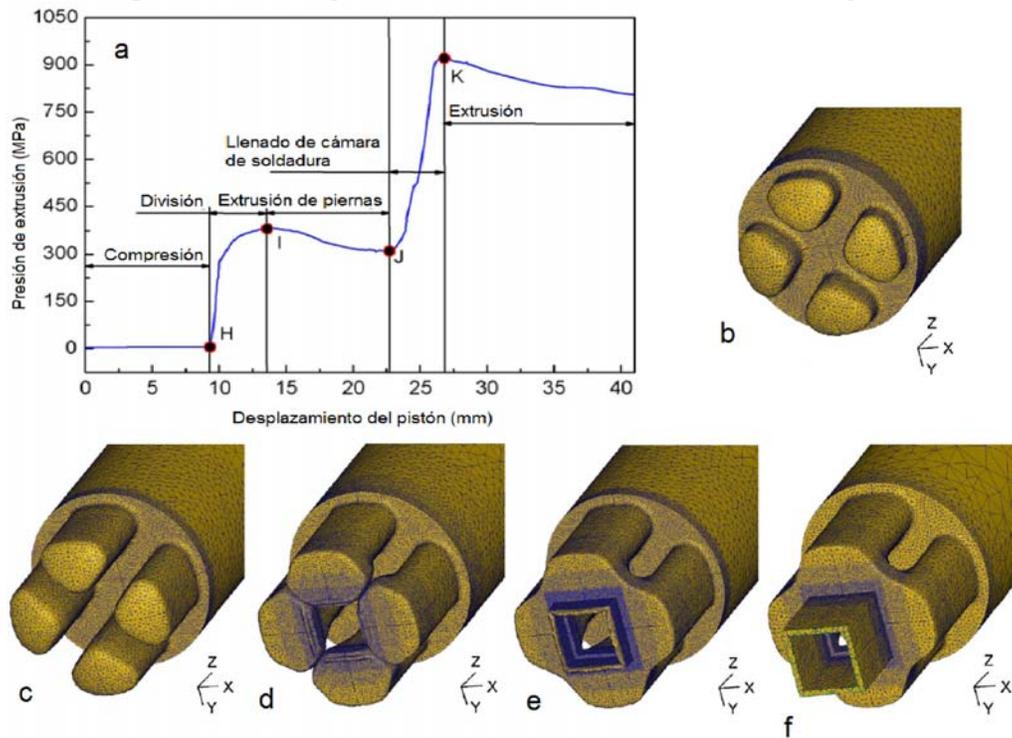


Figura 2.8 a) Evolución de la presión de extrusión a 2 mm/s, b) División ($d=13.5$ mm), c) Llenado de ojos de buey ($d=20.6$ mm), d) Llenado de la cámara de soldadura ($d=22.5$ mm), e) Comienzo de la extrusión ($d=26$ mm), f) Extrusión ($d=41$ mm) [29]

Como conclusión se presentaron discrepancias entre valores experimentales y de simulación debido a que la obtención del coeficiente de fricción real es compleja, para la simulación se utilizó el valor de 1.0 el cual difiere del valor real. El material presenta adherencia a las paredes pero no totalmente como lo sugiere ese valor.

2.3. Influencia de la temperatura inicial y espesor del dado en la elaboración de tubos.

El objetivo de este artículo fue conocer el efecto de variables como temperatura inicial del lingote, espesor del dado y del tubo en la carga necesaria para extruir. El tocho que se modeló tiene 74 mm de diámetro, la velocidad de extrusión fue de 1 mm/s, el factor de fricción del material con el dado y el contenedor fue de 0.7 que representa la extrusión de aleaciones de aluminio no lubricadas. El software que se utilizó fue DEFORM 3D® modelando el dado y la cámara como cuerpos rígidos, debido a la simetría se analizó solamente 1/8 de la sección. Se utilizó aluminio 7003 y acero H13, sus propiedades se muestran en la tabla 2.3. El ensamble utilizado se muestra en la figura 2.9.

Para analizar el efecto de la temperatura inicial del lingote sobre la carga de extrusión se realizó el experimento con tres temperaturas iniciales; 400, 430 y 460 °C, el espesor del dado fue de 4.5 mm y el espesor del tubo fue de 1.7 mm, los resultados obtenidos de la simulación se muestran en la tabla 2.4. La tabla 2.5 contiene los resultados de la simulación modificando el espesor del dado, se propusieron 3 valores distintos y se observó que la carga es casi constante debido a que el aumento de la fricción en el dado es relativamente pequeño en comparación con la fricción presente en el contenedor.

Finalmente se modificó el espesor del tubo de 1.5 a 1.7 mm con la misma relación de extrusión de 43, como resultado la carga de extrusión no se modificó porque la geometría final y la relación de extrusión es la misma (Tabla 2.6).

Tabla 2.4 Carga de extrusión máxima cuando el espesor del dado es de 4.5 mm y el espesor del tubo es de 1.7 mm. [30]

Temperatura inicial del tocho (°C)	Carga máxima (ton)	Máxima temperatura del tocho (°C)	Máxima temperatura del mandril (°C)	Máxima temperatura del contenedor (°C)
400	529.3	507.2	413.4	421.8
430	518.2	515.4	418.5	426.1
460	477.6	534.8	425.7	425.7

Tabla 2.5 Carga de extrusión máxima cuando la temperatura inicial del lingote es de 400 °C y el espesor del tubo es de 1.7 mm. [30]

Espesor del dado (mm)	Carga máxima (ton)	Máxima temperatura del tocho (°C)	Máxima temperatura del mandril (°C)	Máxima temperatura del contenedor (°C)
3	524.6	506.1	411.2	419.7
4.5	529.3	507.2	413.4	421.8
6	536.9	509.8	418.6	425.9

Tabla 2.6 Carga de extrusión máxima cuando la temperatura inicial del lingote es de 400 °C y el espesor del dado es de 4.5 mm. [30]

Espesor de tubo máximo (mm)	Carga máxima (ton)	Máxima temperatura del tocho (°C)	Máxima temperatura del mandril (°C)	Máxima temperatura del contenedor (°C)
1.5	532.1	514.5	417.7	424.2
1.6	530.7	512.3	415.6	422.9
1.7	529.3	507.2	413.4	421.8

De acuerdo a los resultados obtenidos se demostró que la carga de extrusión disminuye cuando la temperatura del lingote aumenta, en especial a 460 °C donde la carga se reduce porque el esfuerzo de cedencia a esa temperatura es menor que a otras. La carga de extrusión no se modifica considerablemente por el cambio del espesor de dado en el rango de 3 a 6 mm y la carga no presenta variaciones con los diferentes espesores de tubo utilizados debido a que la relación de extrusión fue la misma. Por lo tanto, la relación de extrusión es la variable que afecta en mayor magnitud la carga necesaria para extruir.

2.4. Efecto de la velocidad de extrusión de un perfil hueco.

En este estudio se modificó la velocidad del pistón para observar el efecto sobre la carga y temperatura de extrusión. La figura 2.11 presenta el dado utilizado para producir un perfil hueco de 0.7 mm de espesor. El tocho tiene 180 mm de diámetro y 360 mm de longitud, la temperatura inicial fue de 480 °C y la de la herramienta fue de 460 °C, el coeficiente de transferencia de calor entre el dado y el tocho fue de 3000 W/ m² C, el factor de fricción utilizado fue de 0.3. Se utilizó el software HyperXtrude®, en el área donde se encuentra el espesor de dado se utilizaron elementos triangulares y para el resto del modelo se malló con elementos tetraédricos.

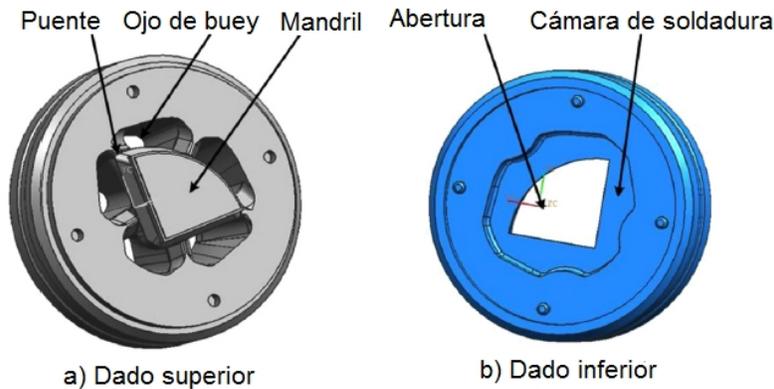


Figura 2.11 Diseño del dado de extrusión utilizado. a) Dado superior, b) Dado inferior. [31]

La evolución de la temperatura se produce debido a la transferencia de calor, calor debido a la fricción y calor debido a la deformación plástica. La figura 2.12a muestra la temperatura máxima, mínima y promedio en diversas velocidades de extrusión. Para la aleación AA6063 la temperatura no debe exceder el rango de 510 a 525 °C, por lo tanto la velocidad recomendada es 0.9 mm/s. La figura 2.12b muestra la evolución de la carga de extrusión en relación a la velocidad, se observa que al aumentar la velocidad existe incremento de la carga. De acuerdo a los resultados obtenidos cuando se incrementa la velocidad de extrusión la temperatura aumenta gradualmente debido a que a mayor velocidad el calor generado por la deformación plástica toma mayor importancia. Por otro lado, existe un incremento de la carga cuando la velocidad de extrusión aumenta.

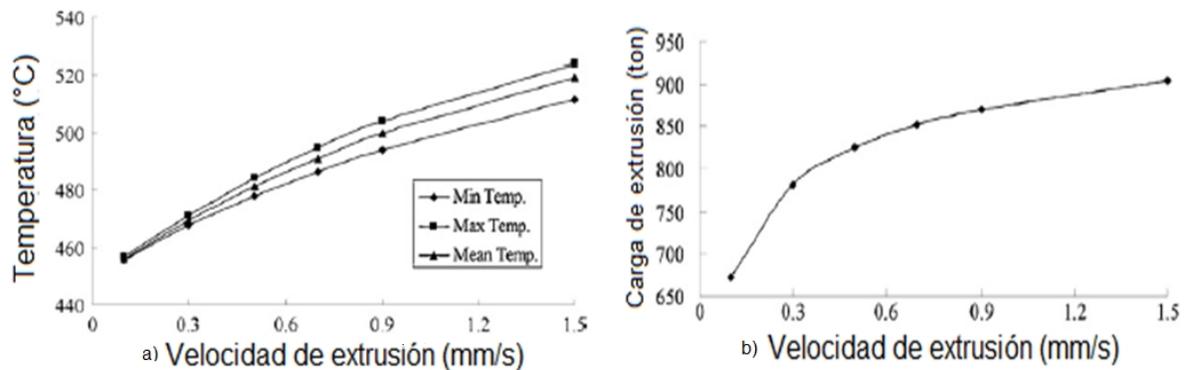


Figura 2.12 Resultados obtenidos de simulación. a) Variación de temperatura a diferentes velocidades, b) Comportamiento de la carga de extrusión. [31]

Capítulo 3 Modelado del proceso de extrusión con el método CEL.

Durante los últimos 37 años se han reportado modelos matemáticos y simulaciones de extrusión de aluminio [29], aunque la industria tenga más de cien años de antigüedad. La mayoría de las investigaciones se centran en problemas 2D ó geometrías 3D simples considerando simetrías, debido a la demanda de grandes capacidades de cómputo.

Cuando la solución analítica a un problema es compleja se puede recurrir a métodos numéricos para resolverlo. Una de las técnicas más populares para resolver procesos de conformado en la actualidad es el método de elementos finitos (FEM por sus siglas en inglés). Un modelo de elementos finitos se construye a partir de la identificación de un número de puntos dentro del dominio de la función, los valores de las funciones y sus derivadas son evaluados en cada uno de esos puntos llamados nodos, la unión de estos forman los elementos finitos. El valor de la función dentro de cada elemento es aproximado mediante funciones de interpolación y posteriormente se aplican técnicas de análisis numérico para obtener la solución global del problema. [32]

Existen cuatro diferentes técnicas utilizadas en el modelado de procesos de conformado. Estas son: lagrangiana, euleriana, arbitraria lagrangiana euleriana (ALE) y acoplada euleriana lagrangiana (CEL). La elección de dichas técnicas está en función del problema a resolver y de la capacidad de cómputo disponible. [33]

La formulación lagrangiana utiliza una malla con nodos fijos al material que siguen la trayectoria de este, los elementos lagrangianos se deforman al deformarse el material, dicha descripción se utiliza en mecánica de sólidos. En la técnica euleriana los nodos y elementos se encuentran fijos en el espacio permitiendo que el material fluya a través de la malla. La ventaja de utilizar el método euleriano es que la distorsión de malla es mínima.

Los métodos ALE son combinaciones del método euleriano y lagrangiano para adoptar las ventajas que presentan ambas formulaciones. En la técnica ALE los desplazamientos del material y la malla se desacoplan, por lo tanto, la malla se puede mover independientemente a través de este. Los nodos se pueden mover pero siempre permanecen dentro de una región límite definida en el dominio ALE, estos se mueven hasta que la distorsión de la malla disminuye.

En ALE se pueden utilizar remallados para controlar la distorsión de la malla, sin embargo, al utilizarlos se presentan problemas como la precisión en los cálculos debido a la transferencia de datos de la malla distorsionada a la nueva.

El análisis CEL permite plantear una solución a la deformación excesiva que presenta el proceso de extrusión directa utilizando el sistema de doble dado. En el método CEL una malla de fondo establece de antemano por donde fluirá el material adoptando la definición de los nodos y elementos que se encuentran fijos en el espacio.

La construcción de una malla estacionaria (euleriana) implica la asociación local de material creando una partición en el dominio a la cual se le asignan propiedades del material que se desea extruir mediante un campo predefinido en el estado inicial. [34][35]

El material no ocupa la totalidad del dominio euleriano y a lo largo del análisis los elementos pueden estar llenos en un rango de 0 a 1, por lo tanto el límite del material se calcula en cada incremento del análisis, dicho algoritmo se conoce como fracción de volumen o VFT por sus siglas en inglés. Por definición, si el material llena completamente un elemento la fracción de volumen es uno, en cambio, si no existe material presente en un elemento la fracción es cero. Sin embargo, los elementos eulerianos pueden contener dos materiales al mismo tiempo, si la suma de la fracción de volumen de material es menor a uno, el restante se rellena con elementos vacíos o void. (Figura 3.1) [35]

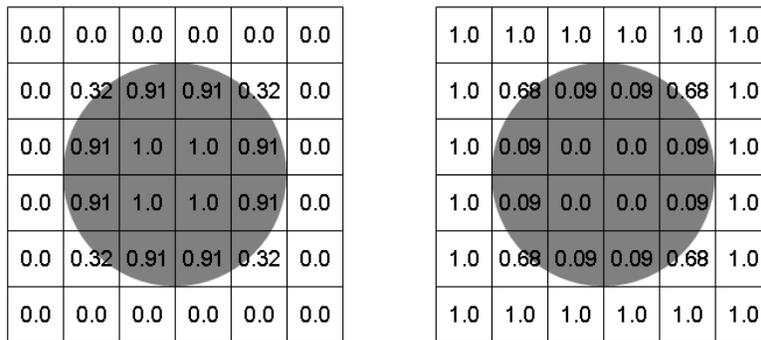


Figura 3.1 Campos discretos mediante el comando VFT, a) Parte interna de la región de referencia, b) Parte externa de la región de referencia. [36]

El contacto euleriano-lagrangiano es una extensión del contacto general en Abaqus/explicit. Dicho algoritmo coloca la estructura lagrangiana en regiones vacías dentro del dominio euleriano para calcular el contacto automáticamente y trazar la intercara entre ambas estructuras. Por lo tanto, durante el análisis el cuerpo lagrangiano empuja el material fuera de los elementos eulerianos y se llenan con material vacío. [35]

La deformación que se da en el dominio euleriano se origina por el algoritmo “Lagrange-plus-remap” que consiste en combinar el análisis lagrangiano común seguido por el cálculo euleriano que funge como transporte. Durante la fase lagrangiana, los nodos se fijan temporalmente al material y los elementos se deforman dentro de este, al pasar a la fase euleriana la deformación es suspendida y los elementos deformados son remallados automáticamente, este proceso es utilizado para calcular la nueva distribución de material en el dominio euleriano. [35]

En la figura 3.2 se muestra el análisis de la deformación de un remache comparando el análisis tradicional lagrangiano y el uso de análisis CEL, sin embargo en ambas formulaciones existen penetraciones al material, en el caso lagrangiano se producen por la distorsión de malla. En el método CEL se deben a aproximaciones geométricas y rastreo de condiciones de frontera con elementos parcialmente llenos de material para visualizar el dominio euleriano, dichos defectos se resuelven refinando el tamaño de malla euleriana o aplicando redondeos a los vértices de las superficies lagrangianas. (Figura 3.3)

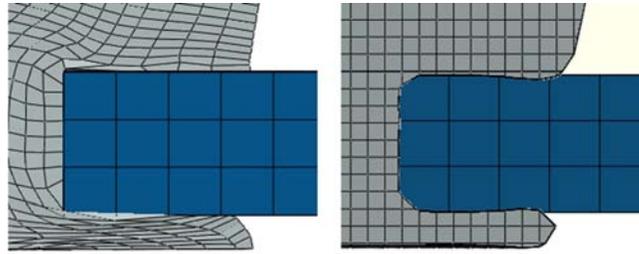


Figura 3.2 Penetración en la superficie de contacto. a) Análisis lagrangiano, b) Análisis CEL [37]

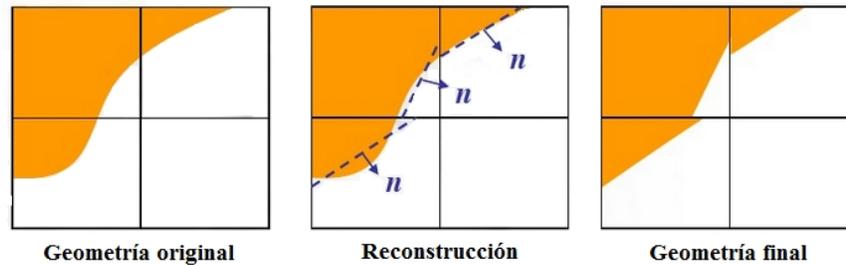


Figura 3.3 Evolución del algoritmo lineal de reconstrucción de geometrías. [38]

El método CEL permite resolver análisis con grandes deformaciones de material con una definición sencilla en el modelo pero a un costo computacional elevado, la aplicación del método CEL en procesos de conformado es exitosa, sin embargo no existen trabajos previos que apliquen dicha técnica en la extrusión de perfiles de aluminio mediante un sistema de doble dado.

En el presente trabajo se realizó el análisis de un proceso de extrusión directa para obtener un tubo de 1.7 mm de espesor mediante el uso del dado tipo ojo de buey (porthole die) para adquirir la fuerza de extrusión, analizar el perfil de velocidades, así como la distribución de esfuerzos y deformaciones en el material.

El modelo realizado replica las condiciones de los experimentos realizados por Hyung Ho Jo en 2005 con el fin de comparar los datos experimentales con los datos obtenidos en las simulaciones. Se realizan 4 modelos en los que se mantienen fijas las geometrías y parámetros de extrusión pero se modifica la magnitud de la velocidad del punzón para analizar el efecto de dicha variable en los resultados.

3.1. Geometrías de los dados y lingote.

La pieza de trabajo se modeló como un cilindro sólido 3D euleriano sin planos de simetría, aunque se realizaron particiones en dichos planos para mejorar la calidad del mallado. El dominio euleriano tiene 94 mm de diámetro y 270 mm de longitud el cual se muestra en la figura 3.4a. Para aplicar la asociación local de material se crearon particiones a una distancia de 100 mm de la tapa inferior del dominio y otra a 162 mm de la partición anterior, para definir el diámetro del material se realizó una partición circular con 74.9 mm de diámetro, de tal forma que las dimensiones del lingote a extruir son de 74.9 mm de diámetro y 162 mm de longitud. (Figura 3.4b)

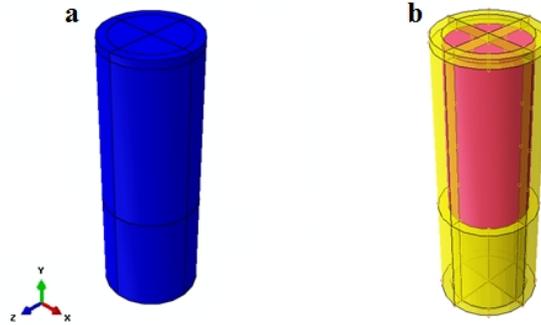


Figura 3.4 Modelo 3D del material a) Geometría de dominio euleriano, b) Asociación local de material, el dominio se encuentra en amarillo y el material en rosa.

El ensamble de la matriz está definido por tres componentes que son; dado superior, dado inferior y el contenedor o cámara. Cada uno se modeló como Shell 3D discretamente rígido ya que la deformación de estos no es el objeto de estudio para este trabajo. Todas las piezas utilizadas se generaron en un software de diseño asistido por computadora y posteriormente se exportaron a la plataforma Abaqus® (Figura 3.5 a 3.7).

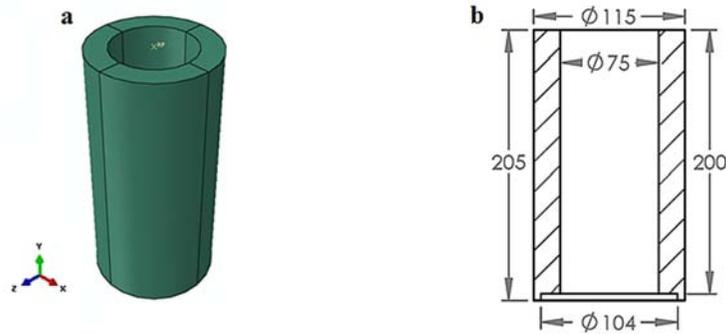


Figura 3.5 Geometría del contenedor a) Modelo 3D, b) Plano (unidades en mm).

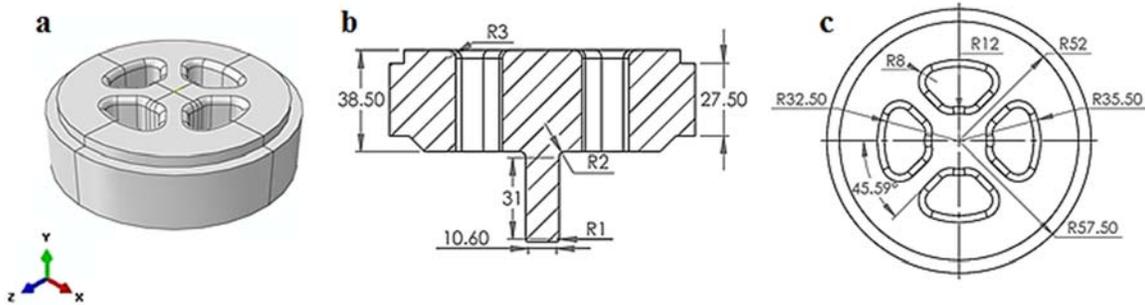


Figura 3.6 Geometría del dado superior a) Modelo 3D, b) Vista lateral, c) Vista superior (unidades en mm).

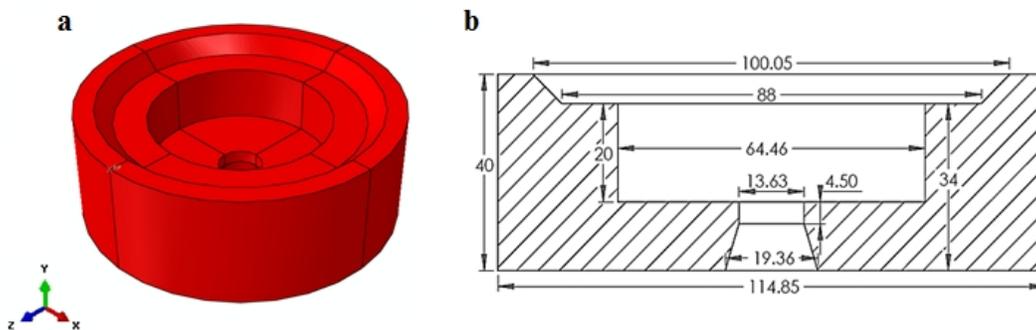


Figura 3.7 Geometría del dado inferior a) Modelo 3D, b) Corte en sección (unidades en mm).

El modelo se ensambla de tal forma que la partición inferior generada en el dominio euleriano coincida con la base del dado superior como se muestra en la figura 3.8. Los dados superior e inferior así como contenedor y punzón se encuentran inmersos en la malla euleriana, esto debido a que la asignación local de material interactúa con dichas piezas sin necesidad de formular la interacción con estas.

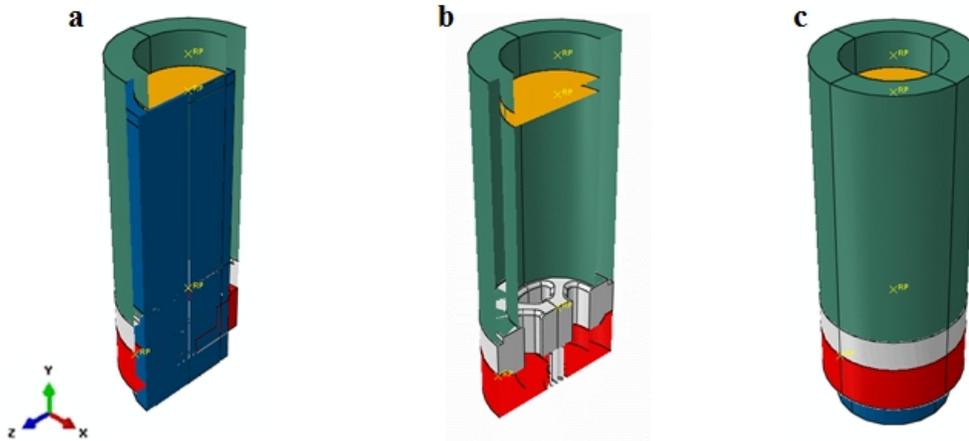


Figura 3.8 Ensamble de componentes para extrusión a) Sección transversal con dominio euleriano b) Sección transversal sin el dominio euleriano, c) Modelo 3D.

3.2. Propiedades del material.

Se utilizaron las propiedades del aluminio 7005 perteneciente a la familia 7xxx a una temperatura de 400 °C. La densidad del aluminio es de 2780 kg/m³, las propiedades elásticas se definieron de acuerdo al módulo de elasticidad de 72 GPa y relación de Poisson de 0.33 [39]. En la figura 3.9 se muestra la gráfica esfuerzo-deformación verdadera para la zona de deformación plástica a una temperatura de 400 °C, se utilizaron los datos correspondientes a la velocidad de 1 s⁻¹.

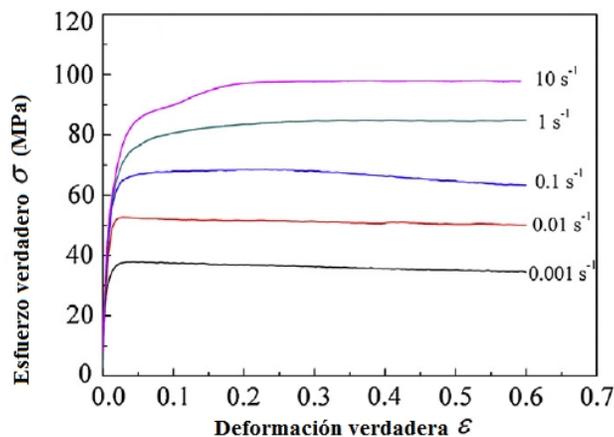


Figura 3.9 Curva esfuerzo-deformación verdadera para el aluminio 7005 a 400 °C. [40]

3.3. Procedimiento de análisis.

Los métodos de solución de elementos finitos se agrupan como explícitos o implícitos. La elección de este depende del modelo a analizar, la capacidad de cómputo y la no linealidad del sistema. Abaqus® es un software de elemento finito de propósito general que permite el uso de ambos métodos. [41]

Un paso es la división de la simulación en etapas para estudiar un proceso específico, al utilizar pasos implícitos la matriz de rigidez debe ser invertida y las ecuaciones de equilibrio deben ser calculadas a cada incremento, en cambio, en un análisis explícito los desplazamientos y velocidades se calculan en términos de cantidades conocidas al inicio del paso, las matrices de rigidez no deben ser invertidas y el costo computacional es menor. Para modelar el proceso de extrusión se utilizó el método explícito ya que el lingote al ser extruido presenta deformación plástica severa, lo cual requiere de ajustes en la malla para prevenir la distorsión excesiva. [33]

Se crearon 4 modelos que presentan variaciones en la magnitud de la velocidad del ariete. Debido a que existen distintas velocidades se requiere incrementar el tiempo de simulación para que el punzón presente el mismo desplazamiento, los pasos son del tipo dinámico explícito y sus características se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Parámetros utilizados para cada modelo.

Modelo	Velocidad de punzón (m/s)	Número de pasos	Tiempo total del modelo (s)
Modelo 1	200	3	0.30E-03
Modelo 2	50	11	1.02E-03
Modelo 3	20	22	2.11E-03
Modelo 4	5	16	7.52E-03

La principal razón de utilizar una serie de pasos fue debido al tiempo de análisis necesario para cada simulación, si el análisis se veía interrumpido por falta de espacio en la memoria del disco duro o si existía una interrupción eléctrica, mediante el comando Recovering an Abaqus/Standard Analysis se reinicia la simulación hasta el último paso calculado y no desde el paso inicial. [42]

3.4. Condiciones de contacto.

La fricción es la resistencia al movimiento que se experimenta cuando dos superficies están en contacto. La fricción para la extrusión directa se presenta en la interfaz contenedor-lingote, zonas muertas que se generan y finalmente en la interfaz dado-material.

Para modelar el fenómeno de fricción entre las matrices y el material se utilizó el modelo de Coulomb, el cual se define como:

$$\tau_{crit} = \mu p$$

Donde τ_{crit} es el esfuerzo crítico cortante al cual existe deslizamiento, μ es el coeficiente de fricción y p es la presión de contacto. [43] [33]

Para el análisis se emplea la opción contacto general para simular la interacción entre las superficies de las herramientas y el material. Dicha opción permite definir el contacto entre muchas o todas las regiones de un modelo con un sola interacción, que es la fricción de todas las herramientas con el material. [44]

El factor de fricción μ que existe entre el material y las herramientas se definió como 0.7 que corresponde a la extrusión de aleaciones de aluminio sin lubricante y que se utilizó en los experimentos realizados por Hyung Ho Jo en 2005.

3.5. Condiciones de frontera.

En esta sección se define el movimiento que presentan las herramientas para producir la deformación deseada, las herramientas se definieron como cuerpos rígidos y su movimiento está asociado a un nodo de referencia.

El dado superior, inferior y contenedor son herramientas que se encuentran fijas durante el análisis, por lo tanto una restricción definida como empotramiento se aplicó a cada nodo de referencia para que no presenten desplazamientos o rotaciones.

El método ALE contiene una herramienta llamada escalamiento de velocidad en la cual el tiempo de simulación se reduce y por lo tanto la velocidad a la que se lleva a cabo incrementa. Al utilizar dicha herramienta se pueden generar dos errores:

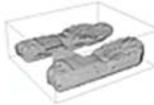
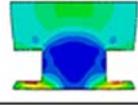
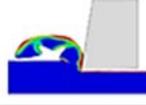
- Si la velocidad es incrementada demasiado los efectos inerciales cambiarán de forma directa la respuesta del sistema.
- El otro problema se presenta debido a una definición de material, esto es, si se hace dependiente de la velocidad. Si el material es definido de esta forma la respuesta del sistema a una velocidad mayor es totalmente diferente a la del sistema original. [45]

En la tabla 3.2 se muestran los tiempos y velocidades a los que distintos experimentos utilizando CEL se han llevado a cabo, se observa que los tiempos de paso son muy cortos y las velocidades se encuentran en el orden de magnitud de metros. La extrusión de perfiles de aluminio se lleva a cabo en milímetros por segundo, de hecho, el experimento realizado por Hyung Ho Jo se realizó a 1 mm/s y con duración de 30 segundos para visualizar el proceso completo.

Por tal motivo se realizaron cuatro modelos a distintas velocidades que se encuentran en m/s para ver el efecto en los resultados y el tiempo de cómputo requerido, ya que modelar el proceso en mm/s demanda una mayor capacidad de cómputo que la actual.

Las velocidades modeladas son mucho mayores en comparación con la original y puede argumentarse que la respuesta del material no puede permanecer a tan elevadas velocidades de punzón en tiempos cortos, además, el material no está definido en función de la velocidad.

Tabla 3.2. Recopilación de modelos analizados en CEL. [34][46][47][48][37][43]

Modelo	Herramienta externa	Tiempo simulado (s)	Velocidad (m/s)
Extrusión radial (2009)	 Punzón	7.00E-05	140
Impacto de botella llena de agua (2008)	 Gravedad	0.5	9.8
Colada por gravedad (2013)	 Gravedad	5	9.8
Llenado de tanque de gasolina (2009)	 Alimentación externa	1.5	4
Formado de remache (2008)	 Placas superior e inferior	1.00E-03	3.75
Formación de viruta (2015)	 Butil	1.20E-03	2.5

3.6. Características del mallado.

Para simular el proceso de extrusión es necesario discretizar las geometrías a utilizar, el tamaño de los elementos influye en la precisión de los resultados y tiempo de cómputo. Si el tamaño de elemento es pequeño aumenta la cantidad de estos, mejorando la precisión de los resultados pero con mayor tiempo de simulación.

Los elementos eulerianos disponibles para mallar son los tridimensionales con 8 nodos (EC3D8R). La malla euleriana es una malla rectangular que no se ajusta a la geometría del material, para geometrías complejas se utiliza una malla que combina elementos totalmente llenos y parcialmente llenos, rodeados de regiones vacías. [49]

Para mantener una calidad de mallado aceptable se realizaron particiones a cada herramienta y se aplicó la técnica libre estructurada debido a la geometría compleja que presentan (Figura 3.10). En el dominio euleriano se utilizó una técnica de mallado de barrido frontal debido a la excesiva deformación que presentan los elementos en esta zona para ajustar los elementos de acuerdo a las divisiones creadas.

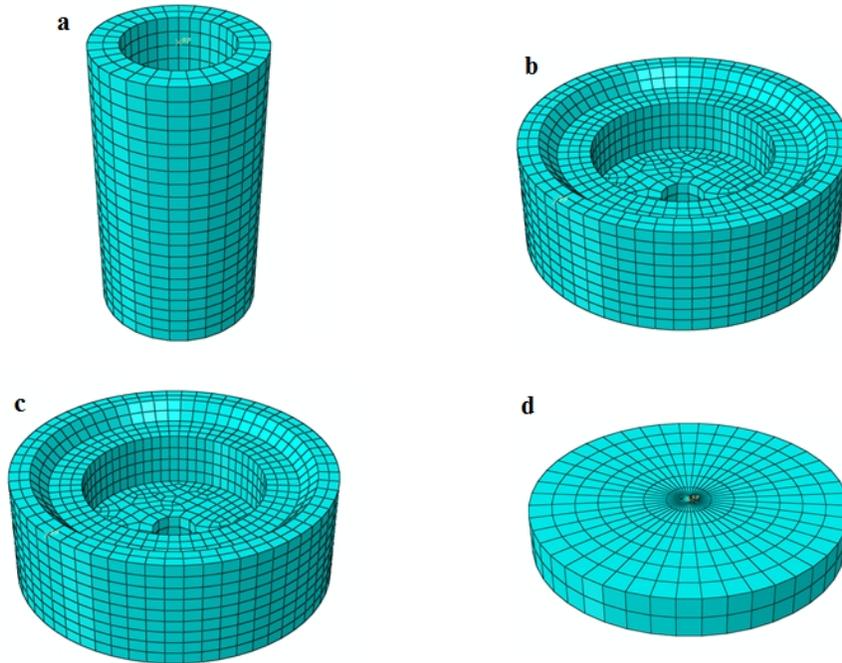


Figura 3.10 Herramientas rígidas discretizadas a) Contenedor, b) Dado inferior, c) Dado superior, d) Punzón.

Considerando el espesor del tubo a extruir se requieren elementos de malla pequeños, sin embargo para saber cuál es el número de elementos para obtener resultados confiables se realizaron diversos experimentos. Se utilizó el mismo ensamble pero sin el mandril del dado superior, por lo que en vez de obtener un tubo de 1.7 mm de espesor se obtuvo una barra de 16 mm. (Figura 3.11)

En la figura 3.11a se extruyó una barra con un tamaño de malla de 8 mm, con este tamaño caben 2 elementos en la abertura, al tener tan pocos elementos la geometría no es la mejor. Por otro lado se fijó un tamaño de 4 mm para que quepan 4 elementos (Figura 3.11b), con dicha cantidad la geometría de la barra es mejor, sin embargo los nodos aumentan y el tiempo de cómputo aumenta 5 veces ya que con 2 elementos se necesitan 8 956 nodos, mientras que con 4 elementos se requieren 70 820 nodos.

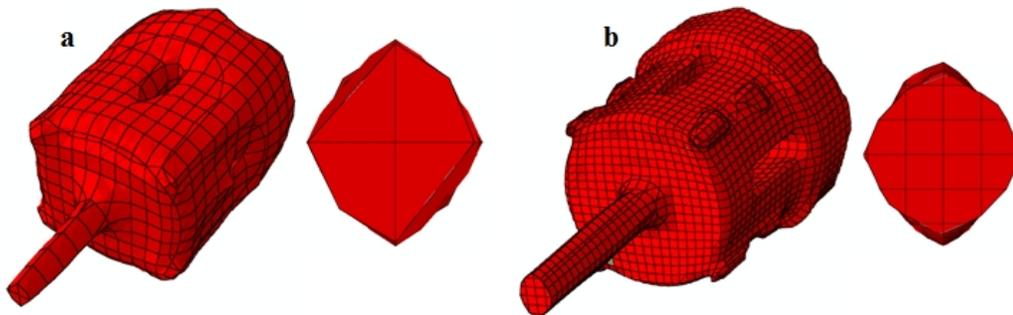


Figura 3.11 Extrusión de barra de 16 mm a) Tamaño de malla de 8 mm, b) Tamaño de malla de 4 mm.

El tamaño de malla influye en la calidad del perfil a extruir, sin embargo, debido a las dimensiones del dominio euleriano el tamaño del elemento aumenta de manera considerable el tiempo de cómputo. El espesor del tubo es de 1.7 mm, para que la abertura contenga un elemento se necesitan 538 431 nodos, en cambio, para que existan dos elementos requiere 4 091 067 nodos y para que incluya tres elementos demanda el uso de 14 534 640 nodos.

Por los resultados previos y de acuerdo al número de nodos que se generan se utilizó una malla con tamaño de elemento de 0.85 mm, de tal modo que están presentes dos elementos en la abertura. La discretización del dominio euleriano se encuentra en la figura 3.12

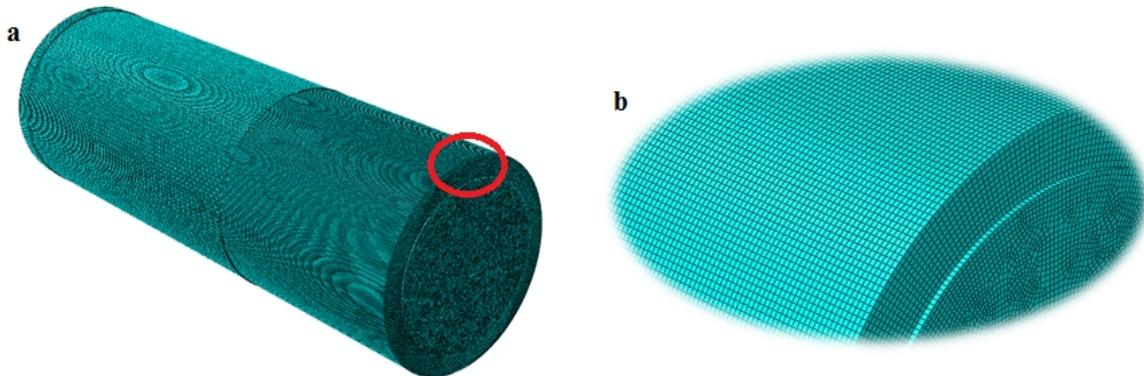


Figura 3.12 Malla utilizada para análisis a) Modelo 3D, b) Detalle de la aplicación de malla.

Con los parámetros definidos anteriormente se llevaron a cabo las simulaciones de cada modelo, obteniendo los resultados que se analizan en el siguiente capítulo.

Capítulo 4 Análisis de resultados.

En este capítulo se analizaron los resultados obtenidos de las simulaciones, se presenta la distribución de esfuerzos y deformación, así como la velocidad y características del flujo en la pieza de trabajo. La fuerza de extrusión obtenida en los experimentos de Hyung Ho Jo se tomó como parámetro de referencia.

En la figura 4.1 se muestra la geometría final de cada experimento, se observa que la velocidad influye en la geometría final del tubo. El experimento 4 es el que presenta la forma de tubo uniforme en comparación con el experimento 1 en donde el flujo es desigual provocando defectos en la extrusión del producto.

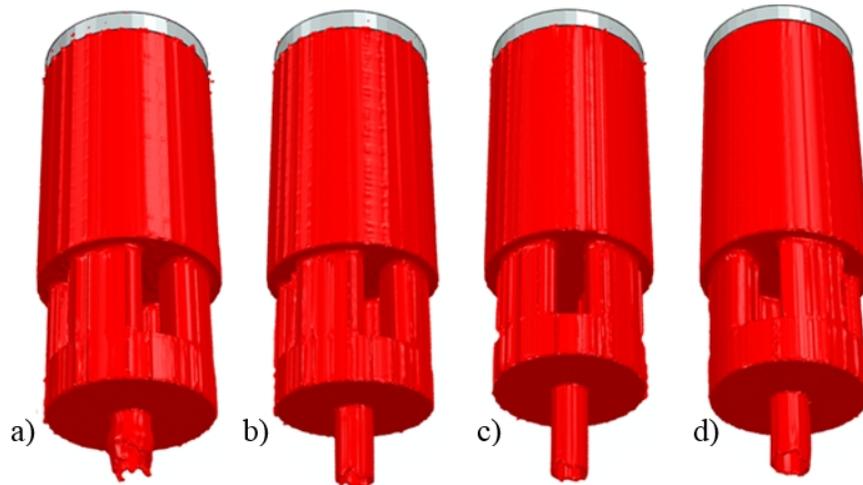


Figura 4.1 Geometría final de cada modelo, a) Modelo 1, b) Modelo 2, c) Modelo 3, d) Modelo 4.

4.1. Distribución de la deformación.

En la figura 4.2 se ilustra la distribución de la deformación del modelo 1 a través del proceso de extrusión, para visualizar mejor los resultados se mostrará la mitad del modelo 3D y se enfocará en la parte inferior del ensamble, ya que en esta zona es donde se produce la mayor deformación plástica de material.

En la etapa inicial referente a la extrusión de las barras de alimentación, el material fluye uniformemente y la deformación plástica ocurre en el contacto del material con el dado, como se muestra en la figura 4.2A donde se produce un aumento en la deformación plástica presente.

La velocidad del punzón es de 200 m/s, debido a esta se generan vórtices dentro de la zona de soldadura, en esta ocurren colisiones de material en todas direcciones lo que provoca el aumento en la deformación plástica. Los vórtices generan cavidades dentro del material que se pueden ver en las figuras 4.2B y 4.2C, estos provocan defectos en el producto extruido.

El espacio geométrico donde las barras se unen en la cámara de soldadura se llama plano de soldadura, debido a que en dichos planos el material interactúa consigo mismo con fuerzas opuestas, por lo que ocurre deformación plástica elevada.

Finalmente se extruye el tubo en la figura 4.2D, en esta etapa la mayor deformación plástica se encuentra en el contacto que existe entre la pared y el material, además, en la zona de soldadura se propagan las zonas de mayor deformación que se generaron en la etapa anterior.

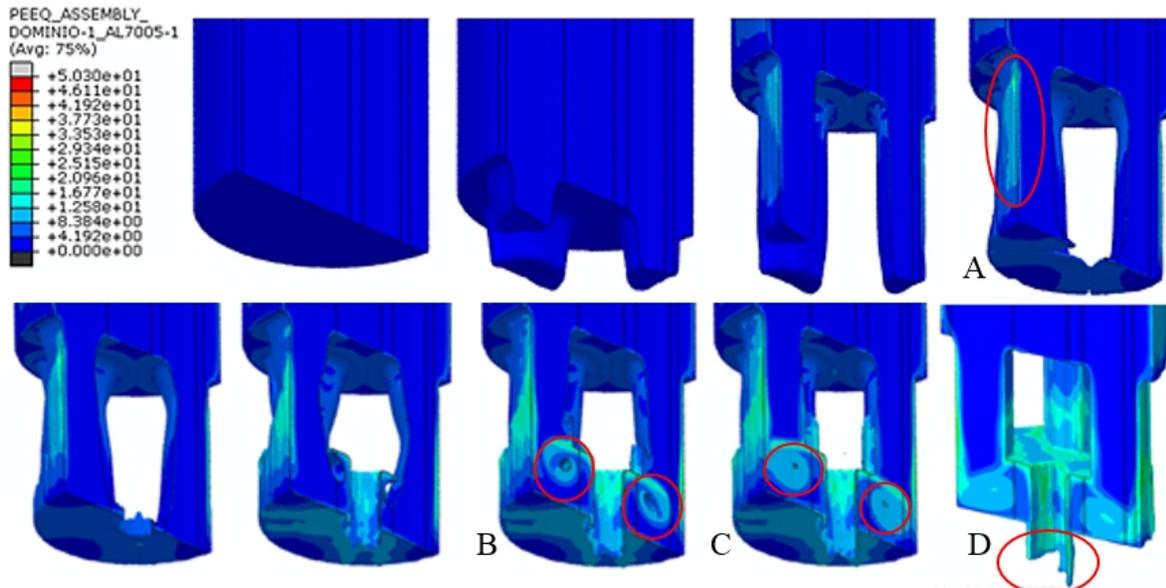


Figura 4.2 Evolución de la deformación plástica en el modelo 1. A) Contacto de material con la pared del dado, B) Cavidades generadas debido a vórtices, C) Desaparición de cavidades, D) Flujo no uniforme en la extrusión.

El progreso de la deformación plástica presente en el modelo 2 se encuentra en la figura 4.3. La velocidad del punzón se redujo hasta los 50 m/s, a dicha velocidad la deformación plástica se genera en el deslizamiento de material que existe en la zona muerta de la esquina que se encuentra en la unión entre dado superior y contenedor que se muestra en la figura 4.3A. En la figura 4.3B y 4.3D se ilustran las zonas que mayor deformación presentan, estas se encuentran desde el inicio y hasta el final del proceso.

En la figura 4.3C, se ve que las zonas muertas generan un aumento en la deformación plástica del material debido al rozamiento de material estancado con el que está en movimiento. La magnitud de la deformación plástica existente es menor a la del modelo 1, ya que el valor máximo presente se reduce un 12%.

En la figura 4.4 se muestra la deformación plástica cuando la velocidad del punzón es de 20 m/s, la magnitud se redujo en comparación con los modelos anteriores y el mayor valor se presentó en el contacto existente entre material y dado que se muestra en la figura 4.4A y 4.4C.

La deformación que se presentó es homogénea debido a que la diferencia entre el valor máximo y mínimo es pequeña en comparación con los modelos anteriores. Otra zona en la cual la deformación es visible se encuentra en los planos de soldadura que se muestran en la figura 4.4D y en la intercara con la zona muerta en la figura 4.4E. Las regiones que muestran deformación casi nula se encuentran en la zona central del lingote en la región superior de este y continúan así durante todo el proceso.

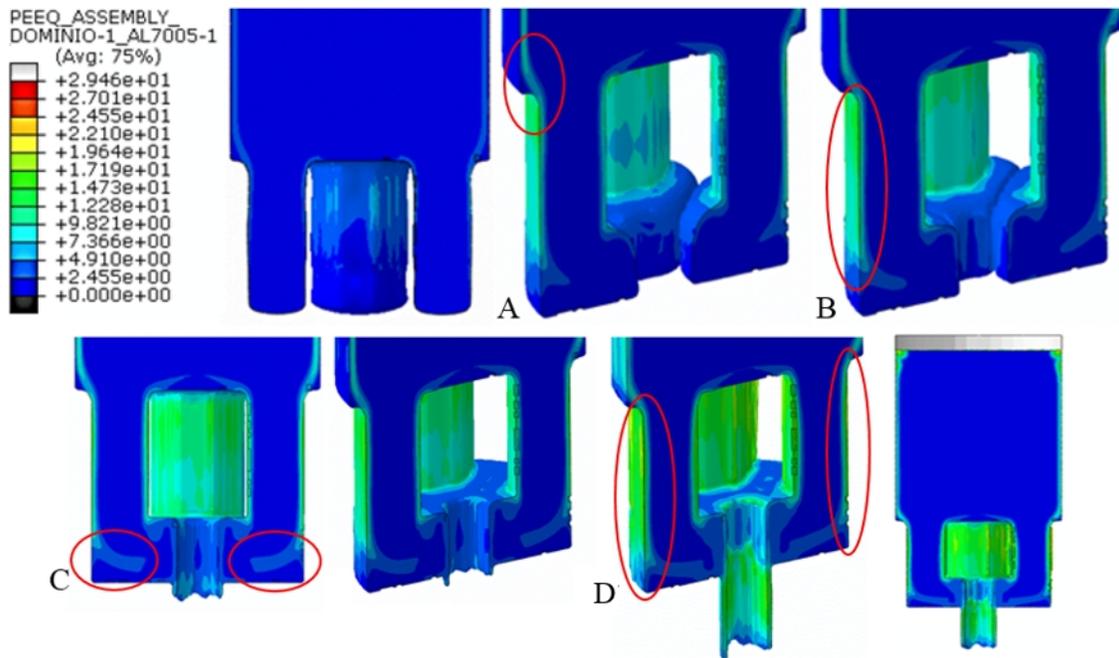


Figura 4.3 Evolución de la deformación plástica en el modelo 2, A) Formación de zona muerta, B) Contacto entre material y dado, C) Intercara con zona muerta, D) Zonas con mayor deformación plástica.

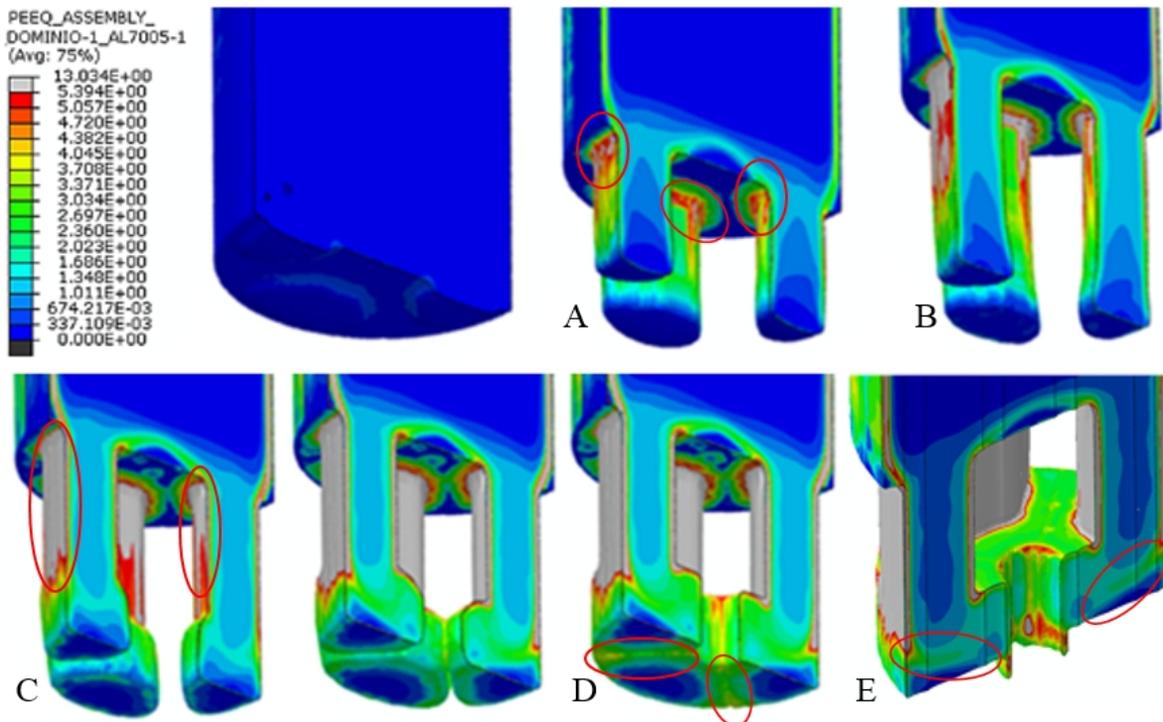


Figura 4.4 Evolución de la deformación plástica en el modelo 3, A) Extrusión de barras, B) Contacto de barras con dado inferior, C) Contacto de material con el dado, D) Planos de soldadura, E) Intercara con zonas muertas.

La figura 4.5 muestra la evolución de la deformación de la pieza de trabajo para el modelo 4, se aprecia que la zona de mayor deformación plástica se concentra en la superficie de contacto entre el material y el dado en donde se generan las barras de extrusión como se muestra en la imagen 4.5C y 4.5D, mientras que la zona central del lingote presenta una deformación muy pequeña que se ilustra en la figura 4.5A.

Las zonas que presentan deformación plástica menor al valor máximo del modelo se encuentran en los planos de soldadura y las regiones próximas a las zonas muertas que se encuentran en la figura 4.5B, ya que en esta zona el material interactúa con fuerzas opuestas, por dicha acción el producto terminado queda brillante y satinado.

Aunque la diferencia que existe entre el valor mínimo y máximo es considerable la deformación plástica se percibe homogénea, ya que la zona central del material presenta el mismo valor de deformación en la mayor área interna, hecho que permitiría que las propiedades mecánicas finales del producto extruido se presenten más uniformes.

El valor máximo presente en el modelo 4 se encuentra en 17 mm/mm a excepción de una región pequeña que presenta el valor de 27 mm/mm. El modelo 1 presenta el valor máximo en la mayor parte de la cámara de soldadura, mientras que los modelos 2, 3 y 4 presentan dicho valor en el contacto de material y dado cuando se generan las barras de extrusión.

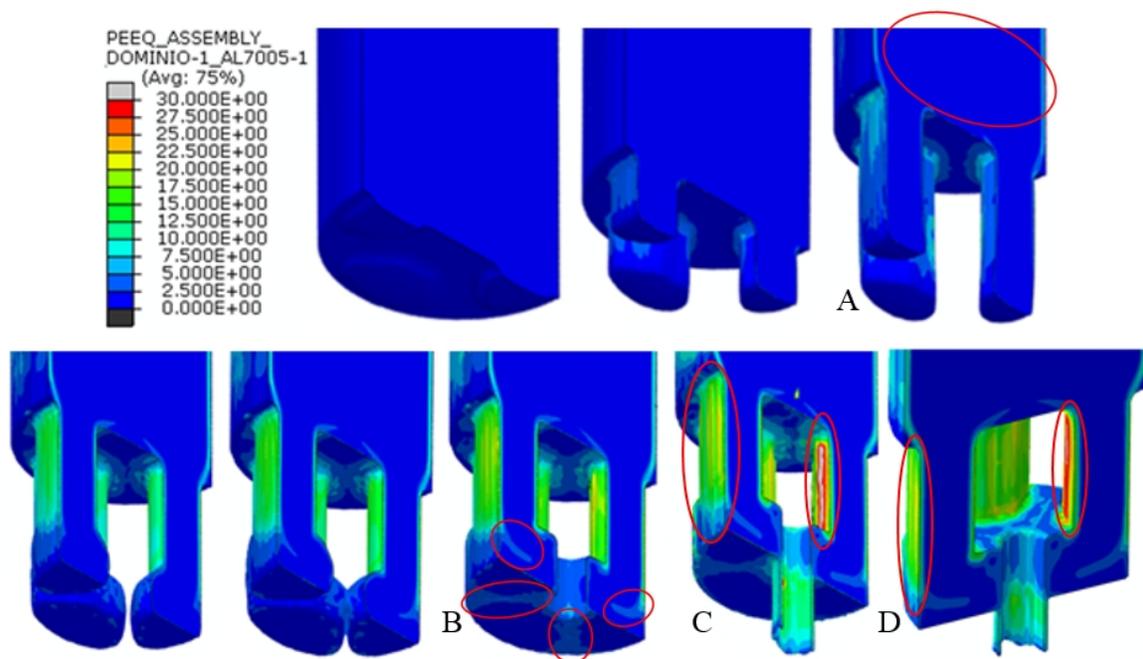


Figura 4.5 Evolución de la deformación plástica en el modelo 4, A) Zona central del lingote, B) Planos de soldadura y zonas muertas, C) Contacto de material con dado, D) Presencia del valor máximo .

4.2. Distribución de esfuerzos.

La distribución del esfuerzo en el modelo 1 se muestra en la figura 4.6. De acuerdo a los resultados obtenidos se ve que varían de acuerdo a la posición del punzón, para visualizar lo que ocurre en el material se realizaron cortes.

Debido a la compresión del material el esfuerzo máximo se propaga en dirección axial a través del lingote como se observa en la figura 4.6A, la fricción presente entre las paredes del contenedor y material provocan que el esfuerzo máximo se encuentre en dicha interacción, el valor es de 80.91 MPa y se muestra en la figura 4.6B.

La figura 4.6C corresponde a la separación de material y alimentación de la cámara de soldadura debido a las barras de extrusión, sin embargo, debido a que la velocidad del punzón es de 200 m/s y que el área transversal por donde pasa el material se reduce drásticamente el material se encuentra durante todo el proceso en el valor máximo de esfuerzo. En la zona central del lingote dentro del contenedor existen zonas que presentan valores menores al resto, esto debido a que el bloque de material central desciende presentando solo compresión a causa del punzón, dicho efecto se muestra en las figuras 4.6D, 4.6E y 4.6F.

La evolución de la distribución del esfuerzo para el modelo 2 se ilustra en la figura 4.7. En la figura 4.7A se encuentra la región donde el mayor esfuerzo de 86.5 MPa coincide con la zona de contacto entre el contenedor y el punzón, en esta etapa la zona central de material comienza a ser comprimida y por lo tanto aumenta la magnitud del esfuerzo en función del desplazamiento del punzón.

El esfuerzo reduce cuando el material se separa en los ojos de buey, ya que en esta zona el material fluye libremente como se observa en la figura 4.7B y aumenta la magnitud cuando este presenta contacto con la base del dado inferior como en la figura 4.7C. Una vez que todo el material se encuentra en compresión y se extruye producto, se presenta el valor máximo a través de todo el material, exceptuando la zona central del lingote, dicho efecto se muestra en las figuras 4.7D y 4.7E, la extrusión del tubo se muestra en la figura 4.7F. El valor máximo se presenta en menor área que en el modelo 1.

En la figura 4.8 se muestra la distribución de esfuerzos cuando la velocidad del punzón es de 20 m/s. En la primera etapa el punzón desciende y conforme este avanza el esfuerzo aumenta en dirección axial, cuando el punzón comprime el material y continua a la segunda etapa, este comienza a ser extruido generando la alimentación para la cámara de soldadura como se muestra en la figura 4.8A.

El valor máximo es de 79 MPa y se presenta en el contacto con las paredes y en las zonas donde el área transversal es pequeña en comparación con el área inicial del lingote, dichas áreas se encuentran en la figura 4.8B. Cuando el tubo comienza a ser extruido, el esfuerzo disminuye debido a que no existe compresión de material y el flujo de material es libre. El esfuerzo máximo es menor a los modelos anteriores y dicho valor se presenta en menor medida, la zona central del lingote presenta disminución en la magnitud del esfuerzo hasta que comienza la extrusión y todo el material se encuentra a compresión como se ve en las figuras 4.8C y 4.8D.

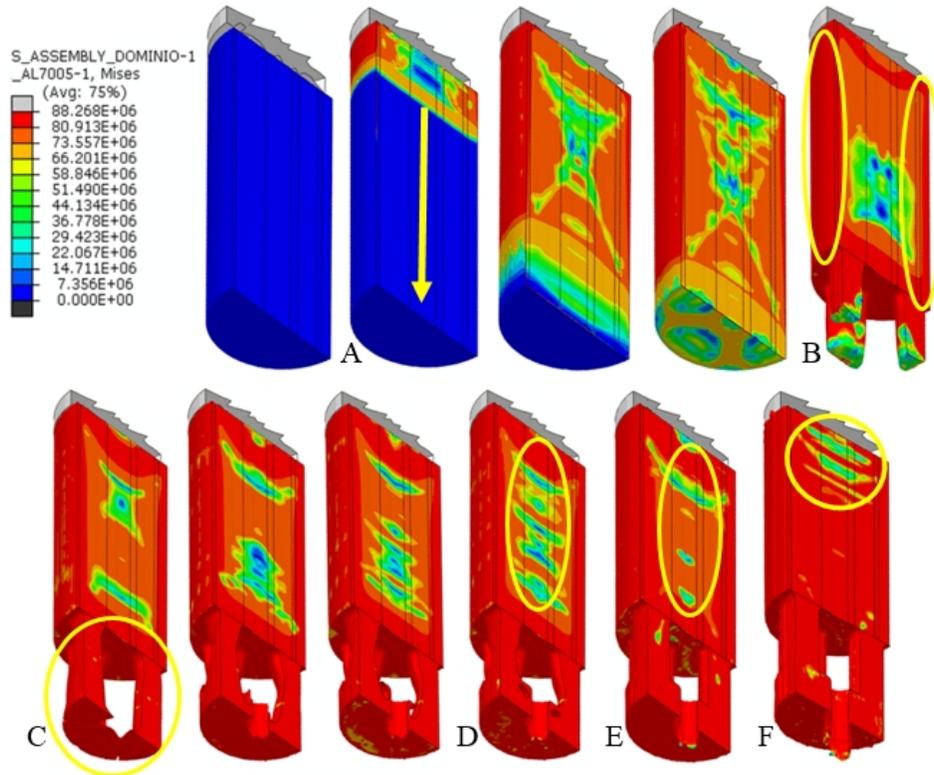


Figura 4.6 Distribución de los esfuerzos en el modelo 1, A) Dirección axial, B) Contacto de material con el contenedor, C) Contacto de las barras con el dado inferior, D) Zona central, E) Inicio de la extrusión, F) Extrusión de tubo.

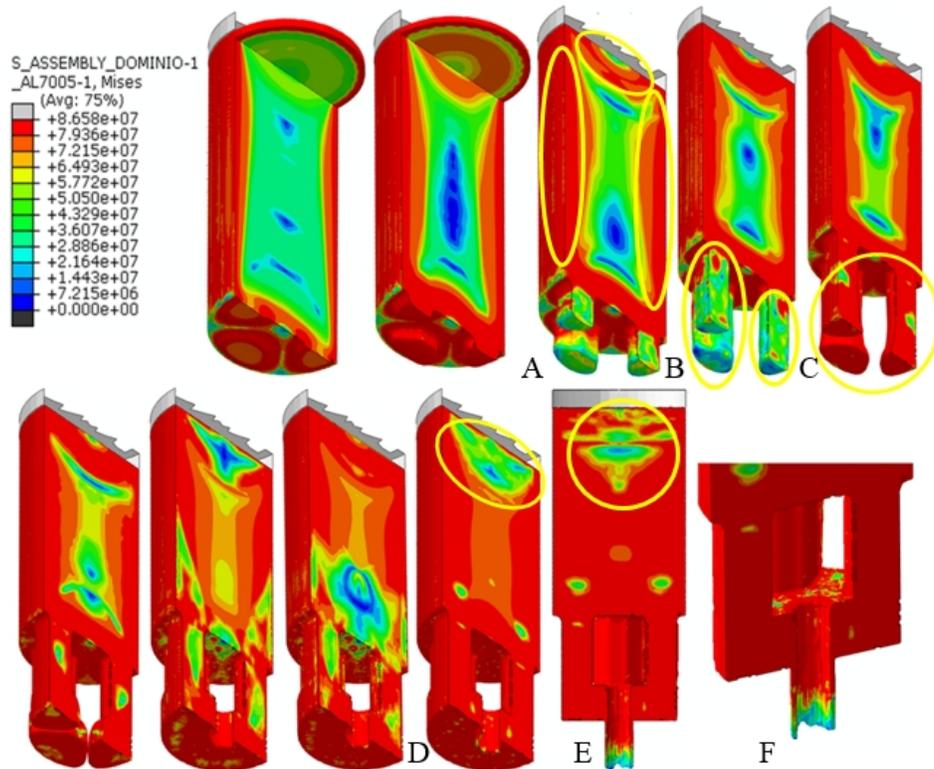


Figura 4.7 Distribución de los esfuerzos para el modelo 2, A) Valor máximo de esfuerzo debido al contacto de material con el contenedor y el punzón, B) Extrusión de barras, C) Contacto de material con el dado inferior, D) Inicio de extrusión, E) Extrusión del tubo, F) Detalle de extrusión.

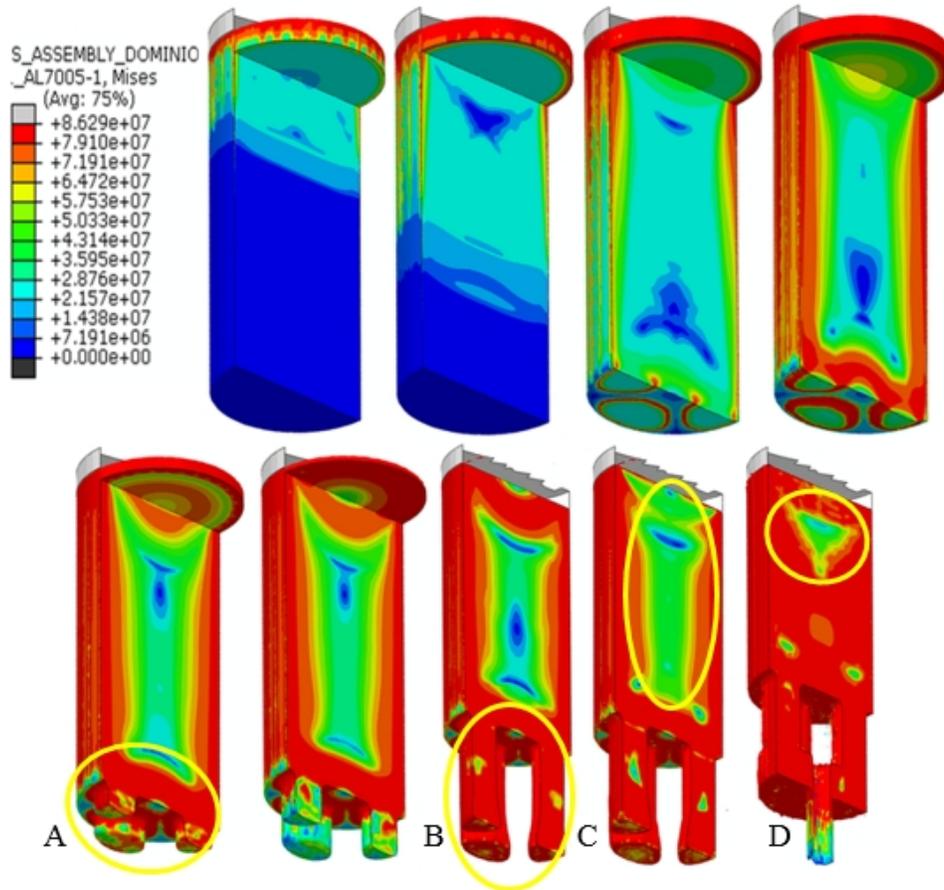


Figura 4.8 Distribución de los esfuerzos para el modelo 3, A) Alimentación de la cámara de soldadura, B) Contacto de barras con el dado inferior, C) Llenado de cámara de soldadura, D) Extrusión de tubo.

El progreso de la distribución de los esfuerzos para el modelo 4 cuando la velocidad de punzón es de 5 m/s se ilustra en la figura 4.9. En la etapa de compresión de material dentro del contenedor, el esfuerzo se distribuye de forma homogénea ya que el aumento de este es gradual y no de manera súbita como ocurría en el modelo 1.

Debido a la geometría del contenedor y la fricción en las paredes de este, los esfuerzos se distribuyen en forma de cono, esta característica se muestra en las figuras 4.9A y 4.9B, el esfuerzo reduce cuando el material fluye de forma libre dentro de las barras de alimentación como en la figura 4.9C y aumenta cuando se realiza el contacto con el dado inferior en la figura 4.9D.

Cuando comienza la extrusión del tubo, existe una zona central que presenta valores de esfuerzos menores en comparación con el resto del material como se ilustra en la figura 4.9E. Al igual que los modelos anteriores los valores máximos se presentan en el contacto con las paredes del contenedor y en la alimentación y soldadura de material debido a los planos de soldadura, el valor máximo es de 79 MPa que es el mismo que el modelo 3, sin embargo el área que cubre dicho valor es menor comparado los otros modelos.

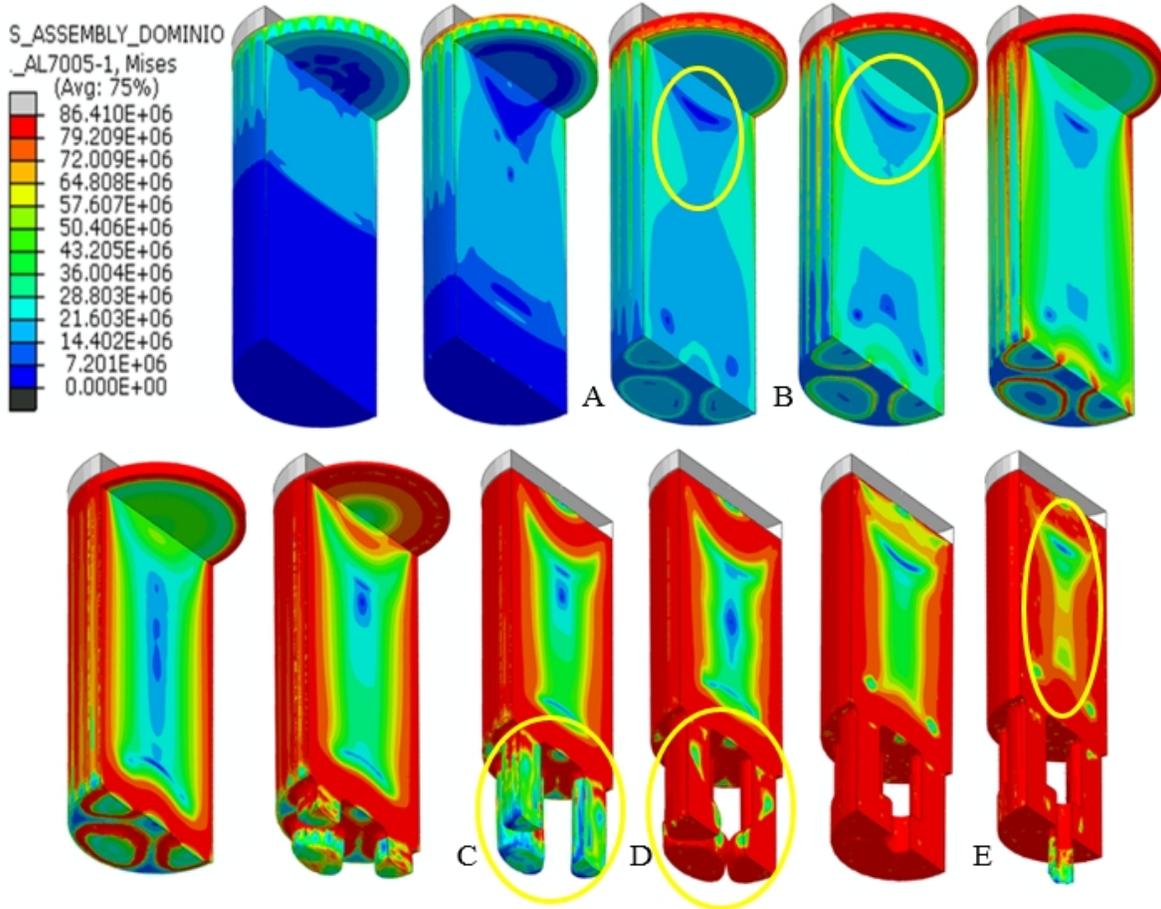


Figura 4.9 Distribución de los esfuerzos en el modelo 4, A) Esfuerzos en forma cónica, B) Compresión de material, C) Extrusión de barras de alimentación, D) Contacto de barras con dado inferior, E) Extrusión de tubo.

La tabla 4.1 recopila los datos de esfuerzos obtenidos en las simulaciones de los cuatro modelos, cabe aclarar que los valores presentados corresponden a la extrusión del tubo y no a etapas previas como la compresión o división de material. La distribución de esfuerzos en cada modelo ronda por valores comunes para todos los modelos, por ejemplo el esfuerzo inicial presente en la compresión de material y el valor presente en la intercara con las zonas muertas.

Tabla 4.1. Valores de esfuerzos en MPa obtenidos cuando se extruye tubo.

Región	Velocidad del punzón (m/s)			
	200	50	20	5
Zona central del lingote.	7.35	7.21	7.19	7.20
Planos de soldadura.	80.91	79.36	79.10	79.20
Contacto de material con dados en las barras de extrusión.	80.91	79.36	79.10	79.20
Intercara con zonas muertas.	80.91	79.36	79.10	79.20
Extrusión de tubo.	80.91	72.15	71.90	72.00

4.3. Flujo de material.

El objetivo de realizar distintos modelos a diferentes velocidades de punzón mayores a la del modelo original es con la finalidad de disminuir el tiempo de cómputo requerido en cada simulación y observar los efectos que produce dicha acción en los resultados.

La visualización vectorial del flujo cuando la velocidad del punzón es de 200 m/s se muestra en la figura 4.10. En la figura 4.10a se presenta la división del lingote en 4 barras que posteriormente alimentan la cámara de soldadura, cuando esto ocurre, el material se acelera debido a que el área transversal es menor y puede fluir libremente hasta que colisiona con el dado inferior como se muestra en la figura 4.10b.

En la figura 4.11a se ve que las barras de extrusión se unen en la parte inferior de la cámara de soldadura y comienzan a llenar ésta a través de la formación de los planos de soldadura, cuando el material colisiona con la parte superior de la cámara (Figura 4.11b), se generan cavidades dentro esta. Las barras de alimentación son delgadas y no cubren toda el área de los ojos de buey, por lo tanto primero se llena la cámara y después el material busca espacios libres que se encuentran en las áreas vacías dentro de los ojos de buey, provocando que el material fluya en sentido contrario al deslizamiento del punzón como se muestra en la figura 4.11c.

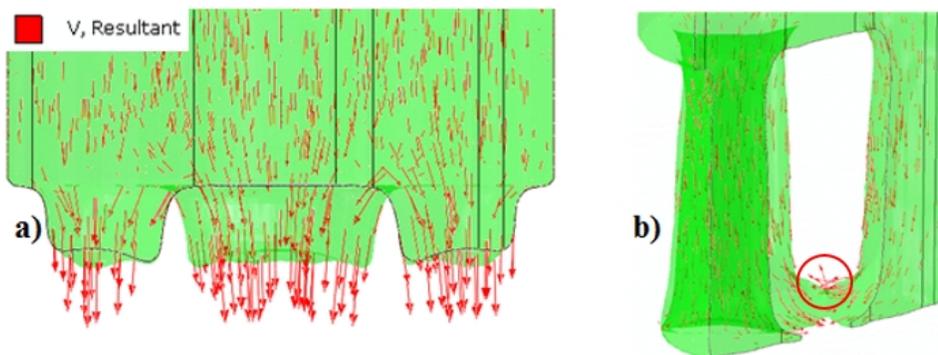


Figura 4.10 Flujo de material en el modelo 1, a) División de lingote, b) Contacto de barras de alimentación con la base del dado inferior.

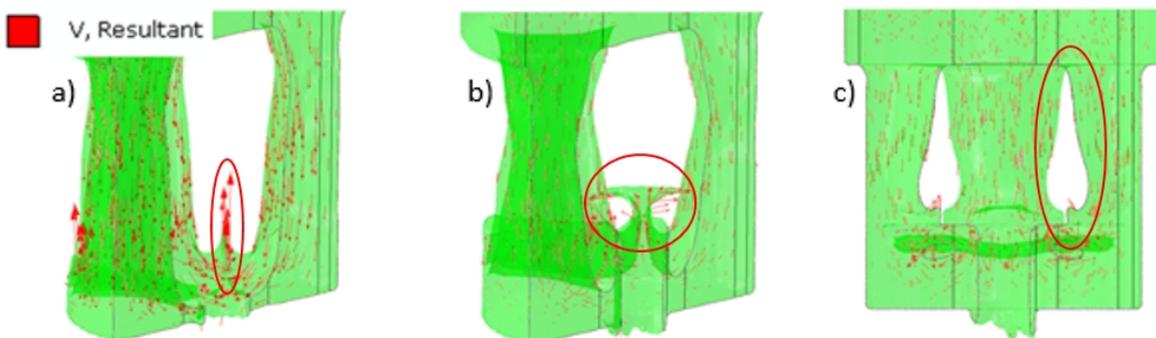


Figura 4.11 Flujo de material en el modelo 1. a) Contacto de material con el dado inferior, b) Llenado de cámara de soldadura, c) Cámara de soldadura llena.

Cuando los ojos de buey están completamente llenos y debido a los perfiles de velocidad opuestos, se presenta una región en la cual el material se frena como se puede ver en la figura 4.12a donde se distinguen 3 zonas, la primera son vórtices que se generaron durante el llenado de la cámara debido a grandes cambios de velocidad en esa zona, la segunda región se trata de material estancado y la tercera región es la que induce el nuevo perfil de velocidades debido al desplazamiento del punzón.

La figura 4.12b corresponde a la extrusión de tubo, en esta se aprecia que durante la extrusión sigue la presencia de vórtices, la abertura que forma la geometría del tubo obliga al material a fluir en forma laminar, sin embargo, el perfil de velocidades denota que la distribución no es homogénea y por lo tanto el tubo tiene defectos y no presenta la geometría adecuada.

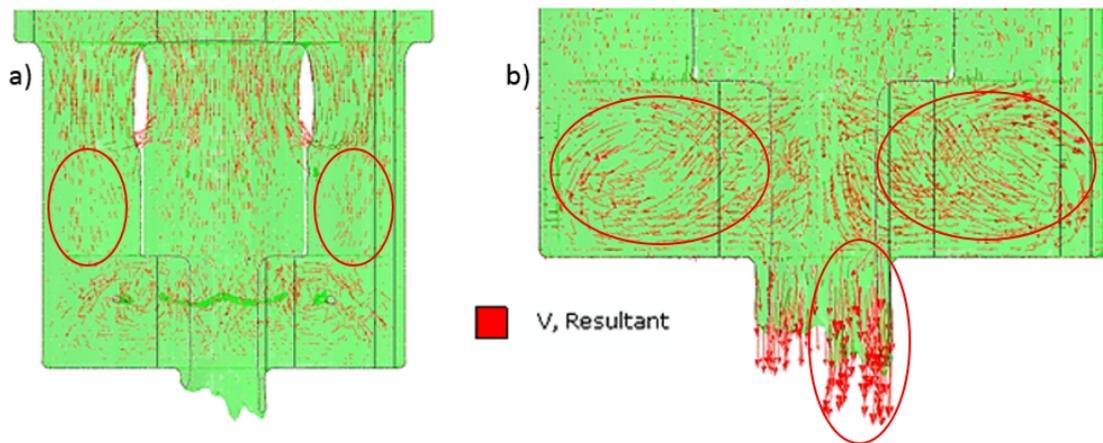


Figura 4.12 Flujo de material a) Frenado de material debido a los perfiles de velocidades opuestos, b) Vórtices generados en la cámara de soldadura, se puede ver que la distribución de la velocidad no es homogénea a la salida del dado ya que el lado derecho fluye más rápido que el izquierdo.

La velocidad del punzón es de 50 m/s para el modelo 2, en la figura 4.13a se muestra el contacto que tienen las barras de extrusión con la base del dado inferior, debido a que la velocidad de aplicación es menor a la del modelo anterior se ve que las barras llenan completamente el área transversal de los ojos de buey y al contacto con la base se ensanchan provocando que el material se distribuya lateralmente.

En la figura 4.13b se realiza el contacto y unión de las barras de alimentación en los planos de soldadura, a diferencia del modelo 1, la cámara de soldadura se encuentra en su mayoría llena cuando se produce dicha acción. Posteriormente, el material fluye hacia las regiones vacías dentro de la cámara como se ve en la figura 4.13c.

La cámara de soldadura se llena por completo y en la figura 4.14a se ve de forma clara cómo actúan las zonas muertas de material, este crea sus propios ángulos y así inicia la extrusión del producto, en la figura 4.14b se muestra la extrusión del tubo, la cual se realiza de manera uniforme ya que de acuerdo a los vectores resultantes de velocidad en la abertura del dado se presenta la misma magnitud durante la extrusión, dicha condición es deseable ya que si la velocidad es homogénea en esta zona, las probabilidades de que exista flexión por parte del tubo disminuyen, para evitar dicha acción se emplea un perro de arrastre.

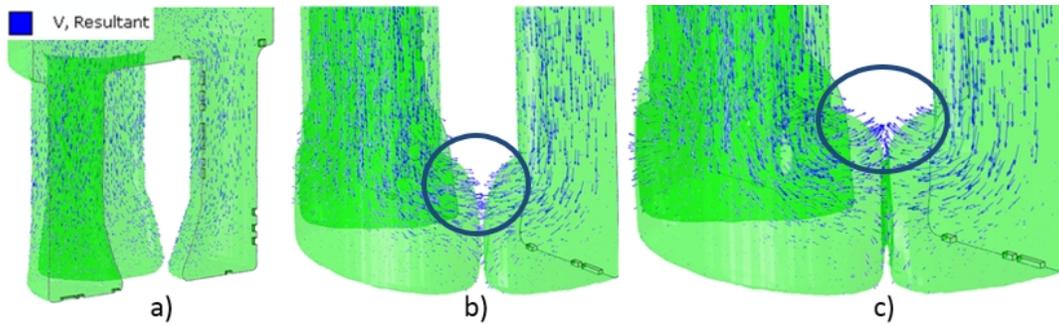


Figura 4.13 Flujo de material en el modelo 2. a) Inicio de llenado de cámara de soldadura, b) Unión de piernas de extrusión, c) Llenado de cámara de soldadura.

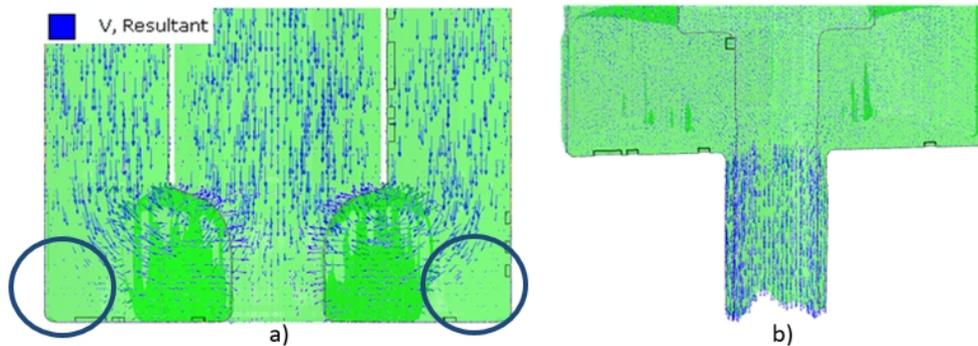


Figura 4.14 Flujo de material a) Comienzo de extrusión, las regiones indicadas son las zonas muertas que generó el material, b) Extrusión de tubo.

En el modelo 3 la velocidad de aplicación fue de 20 m/s, el flujo de material en la formación de barras y llenado de la cámara fue similar al del modelo 2 donde las barras se extruyen de manera uniforme y se ensanchan al contacto con la base del dado para que al contacto de éstas en los planos de soldadura, se encuentre casi lleno el dado inferior.

Las zonas muertas permiten que el material fluya hacia la abertura de forma laminar como en la figura 4.15c. En la figura 4.15b se muestra a detalle la presencia de estas y como afectan al flujo de material, en toda la esquina que se genera en el dado inferior se concentra la presencia de zonas muertas y se produce una región en forma de parábola 3D que se ilustra en la figura 4.15a, cabe aclarar que se trazaron líneas que mejoran la visualización de las zonas muertas.

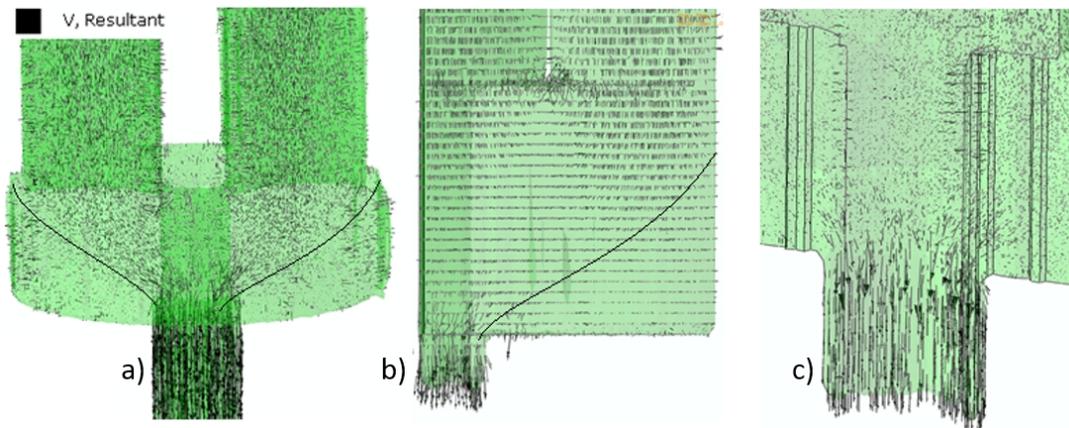


Figura 4.15 Presencia de zonas muertas a) Vista frontal, b) Vista lateral, c) Extrusión de tubo.

La extrusión del tubo se llevó a cabo de manera uniforme, esto debido a que la velocidad a la que se efectuó el experimento fomenta la distribución homogénea del material ya que el cambio de velocidad presente en la matriz es gradual, las zonas muertas ayudan a que el material fluya con la misma velocidad en toda la periferia de este como se muestra en la figura 4.16, donde se compara el tubo de la simulación con un tubo extruido físicamente y mediante metalografía se ve el flujo de material.

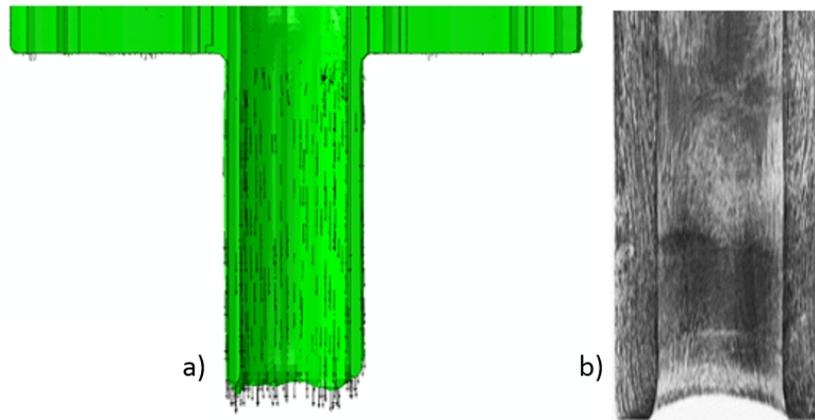


Figura 4.16 Flujo de material a) Extrusión de tubo, b) Macroestructura del material en un tubo extruido. [25]

En el modelo 4 el punzón se desplaza a 5 m/s, la velocidad del material en la cavidad que generan los dados es uniforme en el comportamiento ideal del proceso de extrusión, esto para evitar que el producto extruido sufra flexiones, en este modelo se obtuvo dicho comportamiento, por lo tanto, el producto corresponde a las dimensiones requeridas. Debido a la fricción existente en el espesor de dado, el flujo de material a través de la cavidad de salida es laminar.

En la figura 4.17 se encuentra el llenado de la cámara de soldadura, se ve que las barras de extrusión tocan la base del dado inferior y comienza a aumentar el área de la base de estas como se muestra en las figuras 4.17a y 4.17b. Debido a la velocidad a la que se efectuó, cuando se unen dichas entidades prácticamente se encuentra llena la cámara, a diferencia de los modelos anteriores donde primero se unían las barras de extrusión y a través de los planos de soldadura se llenaba la cámara como ocurría en el modelo 1 o zonas vacías mayores como las del modelo 2 y 3.

La presencia de zonas muertas de material implica un aumento en la carga necesaria para extruir, de hecho existen reglas y estudios que muestran el efecto del ángulo de dado en la disminución de la carga. Por otro lado, en el diseño de sistemas de doble dado las zonas muertas son consideradas para el diseño de estos, de tal forma que el metal que genera los planos de soldadura longitudinales sea el “metal virgen” que se encuentra sin contaminantes como los óxidos que se presentan durante el tratamiento térmico previo a la extrusión. [50]

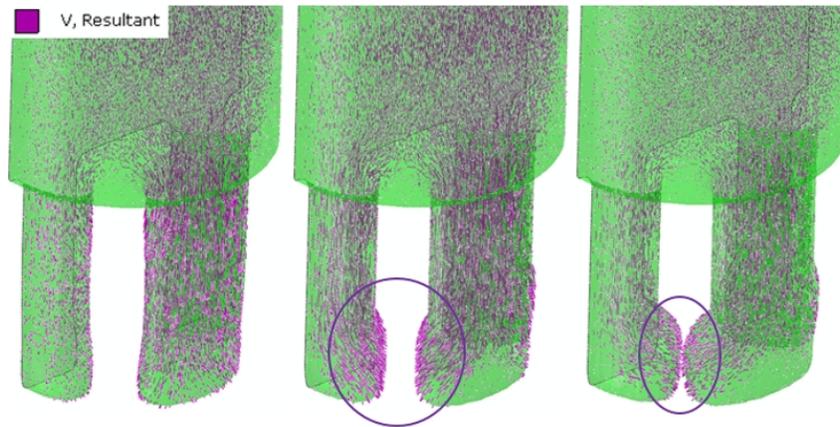


Figura 4.17 Llenado de cámara de extrusión a) Alimentación, b) Contacto de barras con el dado inferior, c) Unión de barras de extrusión.

Las zonas muertas se generan en la periferia de la base de la cámara de soldadura como se muestra en la figura 4.18b. Las zonas muertas de material no significa que no exista velocidad de este, de hecho, estas son zonas donde se presentan grandes diferencias de velocidades con las regiones próximas, para el aluminio una zona muerta se define como la región en la cual la velocidad del material se encuentra de 0 al 10 % de la velocidad de aplicación [51].

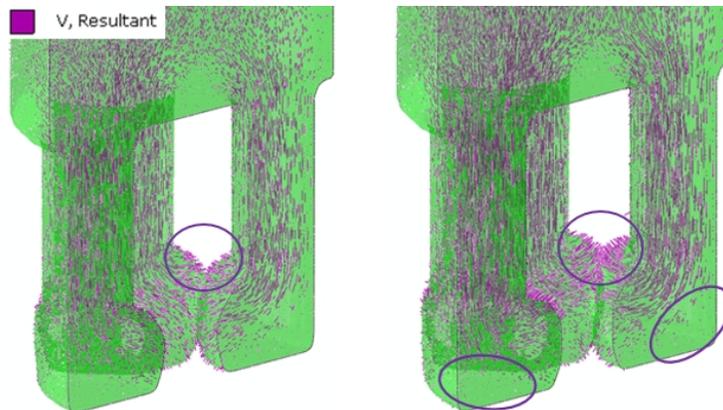


Figura 4.18 Presencia de zonas muertas a) Unión de barras de extrusión, b) Llenado de las regiones vacías después de la unión de las barras de alimentación.

4.4. Fuerza de extrusión.

La curva de color azul de la figura 4.19 corresponde a la gráfica carga - desplazamiento para el modelo 1. En la primera etapa existe un aumento de la fuerza de extrusión necesaria debido a que el lingote tiene un diámetro menor al del contenedor, dicha diferencia es de 0.1 mm. El valor de fuerza llega a las 1360 toneladas debido a la compresión que sufre el material y disminuye dicho valor a 437 toneladas cuando se extruyen las barras de alimentación.

Cuando el punzón recorre 33 mm se llena completamente la cámara de soldadura y en ese instante el valor de fuerza aumenta a 802 toneladas, en 40 mm inicia la extrusión del tubo y comienza a aumentar la fuerza necesaria para extruir debido a que el área de contacto inicial del material aumenta.

Por otro lado, en la gráfica roja de la figura 4.19 se encuentra la curva carga- desplazamiento para el modelo 2, en esta se ve que la fuerza aumenta hasta las 530 toneladas y disminuye su valor cuando el material es dividido en barras, existen variaciones que rondan por las 349 toneladas y el aumento se presenta a 32 mm de desplazamiento, etapa en la cual la cámara de soldadura se llena completamente y comienza la extrusión del tubo.

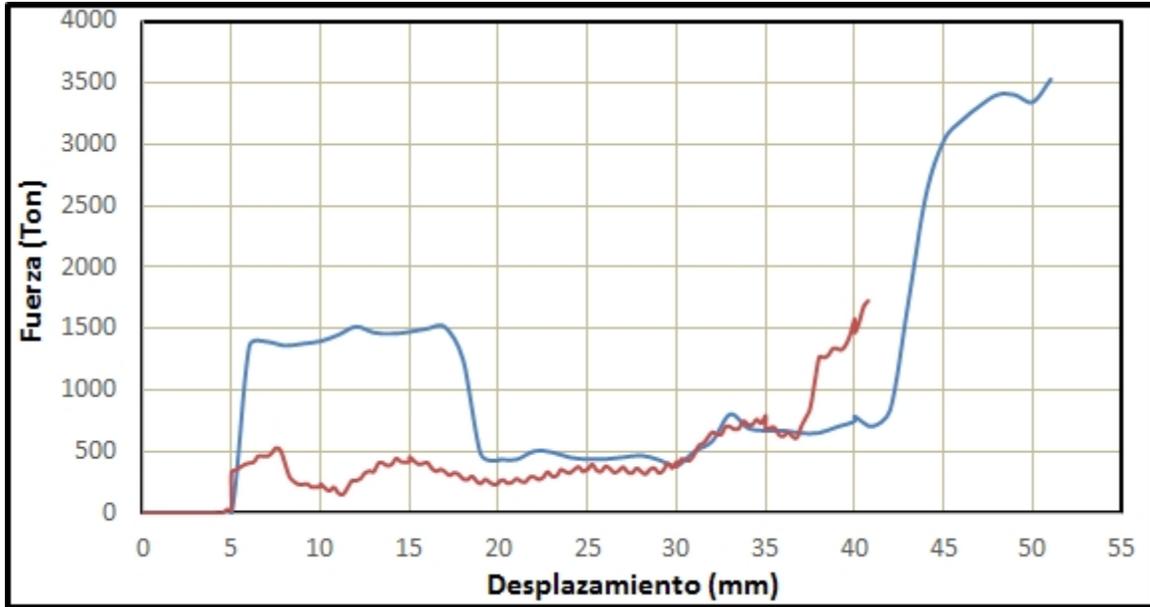


Figura 4.19 Fuerza - desplazamiento para el modelo 1 y 2, la curva azul representa el modelo 1, mientras que la curva en rojo se refiere al modelo 2.

La curva carga – desplazamiento del modelo 3 se muestra en la figura 4.20 en color naranja, la fuerza alcanza un valor de 220 toneladas y se mantiene sobre dicho valor hasta que el punzón se desplaza 24 mm, de 25 a 30 mm de desplazamiento se produce el llenado de la cámara de extrusión, en esta etapa se perciben dos picos, el primero se produce cuando las barras de alimentación tocan la base del dado inferior y el material se desplaza lateralmente, el segundo pico se genera cuando las alimentaciones se unen y llenan las zonas vacías dentro de la cámara de soldadura. Cuando el punzón se encuentra en 32 mm de desplazamiento comienza la extrusión de producto, debido a las fuerzas que se oponen en sentido contrario existe aumento de la fuerza necesaria para extruir.

Con la intención de obtener fuerzas de menor magnitud que las obtenidas y realizar un modelo más cercano a la realidad se redujo la velocidad de aplicación del punzón a 5 m/s. La gráfica obtenida se encuentra en la figura 4.20 representada en color azul, en donde se ve que la fuerza alcanza el valor de 273 toneladas y oscila en dicho valor hasta los 20 mm de desplazamiento del punzón. El aumento de la magnitud en 21 mm se debe a que las barras de extrusión realizan el contacto con la base del dado inferior y se realiza el llenado de la cámara tomando un valor de 539 toneladas, la extrusión del producto inicia cuando el punzón se encuentra en 29 mm, por dicha razón la fuerza necesaria aumenta.

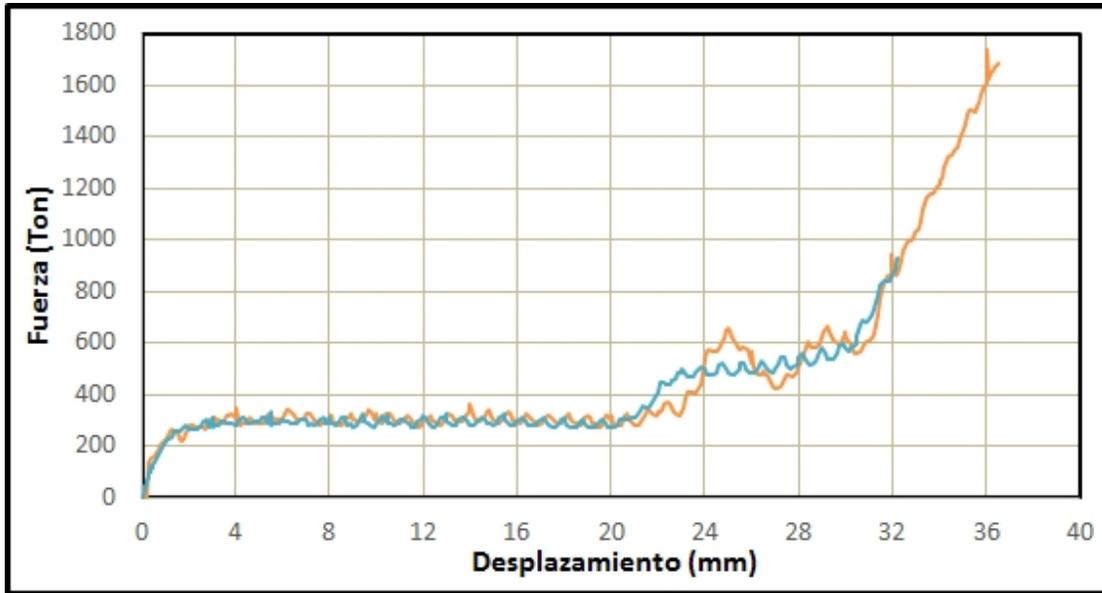


Figura 4.20 Fuerza – desplazamiento para el modelo 3 y 4, el modelo 3 es representado mediante la curva naranja, mientras que la del modelo 4 es azul.

La figura 4.21 muestra la comparación del modelo 4 con la gráfica experimental obtenida por Hyung Ho Jo, en esta se ve que el comportamiento es similar, presentando el aumento en la fuerza debido a la compresión inicial del material, debido a la extrusión de las barras de alimentación existe un valor constante en la gráfica, posteriormente, existe aumento en la magnitud cuando la cámara se llena y comienza la extrusión del tubo, el desplazamiento del punzón en ambos experimentos es diferente ya que la velocidad de aplicación también lo es, sin embargo la longitud de producto extruido es similar.

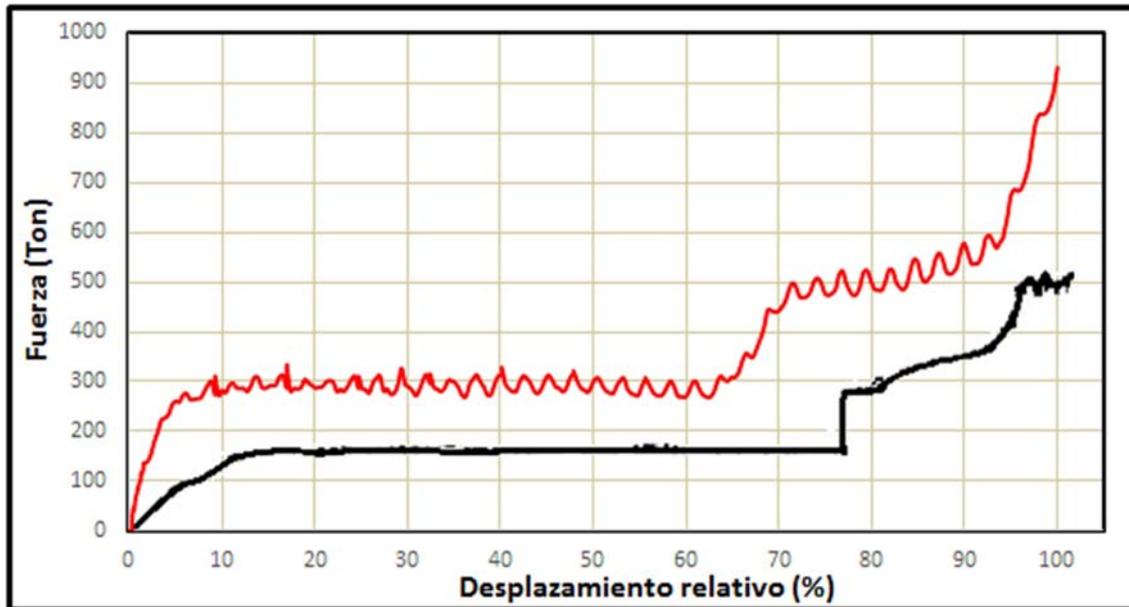


Figura 4.21 Fuerza – desplazamiento para el modelo 4 y el modelo experimental, el modelo 4 es representado mediante la curva roja, mientras que el experimental se denota con negro.

La recopilación de los resultados obtenidos en la fuerza de extrusión necesaria en distintas etapas del proceso se muestra en la tabla 4.2. En esta se ve que conforme disminuye la velocidad del punzón disminuye la magnitud de la fuerza de extrusión, el valor máximo en todos los modelos se presenta en la extrusión del tubo debido a que el material tiene contacto con 4 áreas distintas, la pared del contenedor, la pared del dado inferior y superior así como el espesor de dado.

Tabla 4.2. Valores de fuerza de extrusión obtenidos en distintas etapas del proceso, las unidades son toneladas.

Etapa	Velocidad del punzón (m/s)				Modelo experimental
	200	50	20	5	
Compresión del lingote.	1360	329	220	222	150
Inicio de extrusión de barras.	1458	530	287	273	150
Contacto de barras con base de cámara de soldadura.	437	349	617	449	260
Cámara de soldadura llena.	802	611	861	534	330
Extrusión de tubo.	3525	1725	1683	931	530

El valor máximo es de 3525 toneladas cuando la velocidad del punzón es de 200 m/s, de 1725 toneladas cuando la velocidad es de 50 m/s, de 1683 toneladas cuando la velocidad es de 20 m/s y de 931 toneladas cuando el punzón se desplaza a 5 m/s, el valor máximo dentro de los experimentos realizados fue de 530 toneladas, la comparativa de dichos valores se muestra en la figura 4.22.

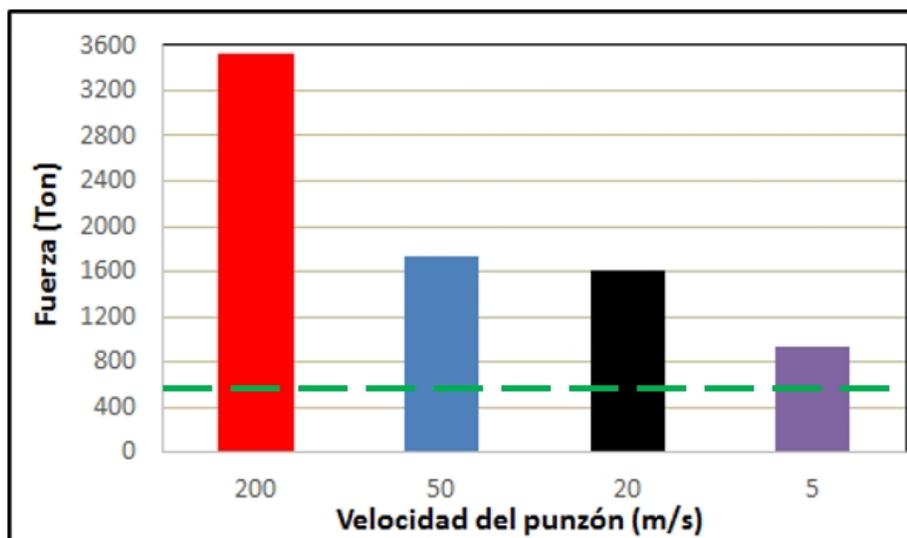


Figura 4.22 Comparación de valores máximos obtenidos en cada simulación. La línea punteada en verde denota el valor que se obtuvo en los experimentos de Hyung Ho Jo donde la velocidad del punzón se definió como 1 mm/s.

4.5. Energía interna y cinética

Para que un modelo se considere como válido, la energía cinética no debe exceder del 5 al 10 % de la energía interna total [52]. Las figuras 4.23 a 4.26 corresponden a la comparativa de dichas energías para cada evento. En el caso de la imagen 4.23 la energía cinética supera el valor de la energía interna, por lo tanto el modelo 1 no es válido, incluso la geometría del tubo no es la mejor debido a que existen defectos.

En cambio, las gráficas de energía para los modelos 2, 3 y 4 son las adecuadas, sin embargo, esa condición no asegura que el modelo sea completamente válido. Las deformaciones que se presentan en cada modelo son diferentes entre sí, disminuyendo la magnitud en función de la velocidad, por otro lado, la distribución de esfuerzos es similar en todas las simulaciones, por lo tanto estos resultados son confiables y se pueden tomar decisiones utilizándolos.

En cuanto a la visualización vectorial de flujo se pudo ver que dichos modelos presentan el mismo comportamiento en la formación de zonas muertas y el llenado de la cámara de soldadura, así como la extrusión de tubo, por lo tanto estos resultados son válidos debido a que el tubo que se obtuvo presenta las especificaciones requeridas sin defectos presentes con excepción del modelo 1.

La fuerza de extrusión disminuye de acuerdo a la reducción de la velocidad del punzón, por lo que estos resultados se deben tomar con cautela, sin embargo la tendencia de reducción en la magnitud prueba que si se tiene la capacidad de cómputo adecuada y se simula el proceso a una velocidad más cercana a la real, se obtendrán valores aproximados a los experimentales.

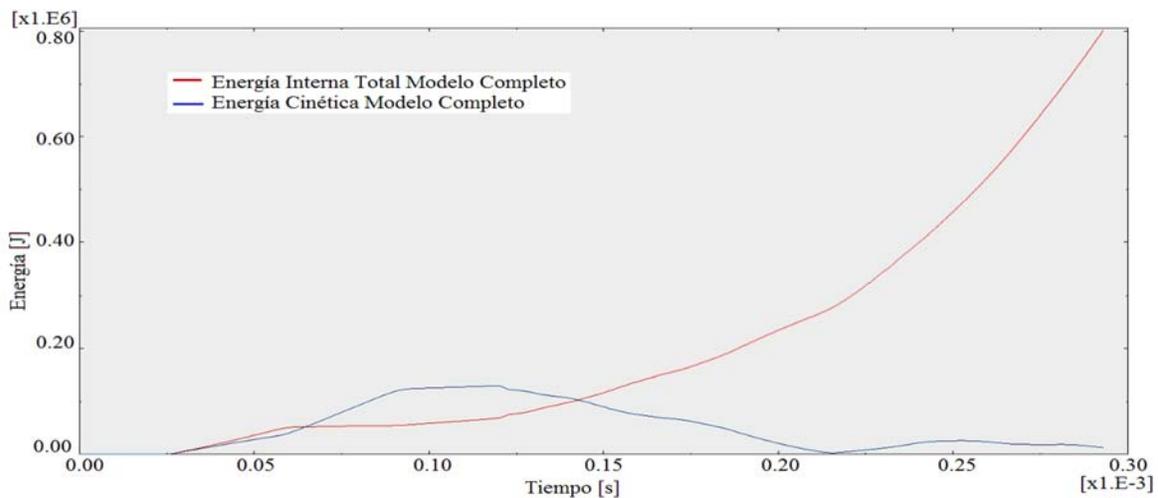


Figura 4.23 Gráfica de energía cinética y energía total para el modelo 1.

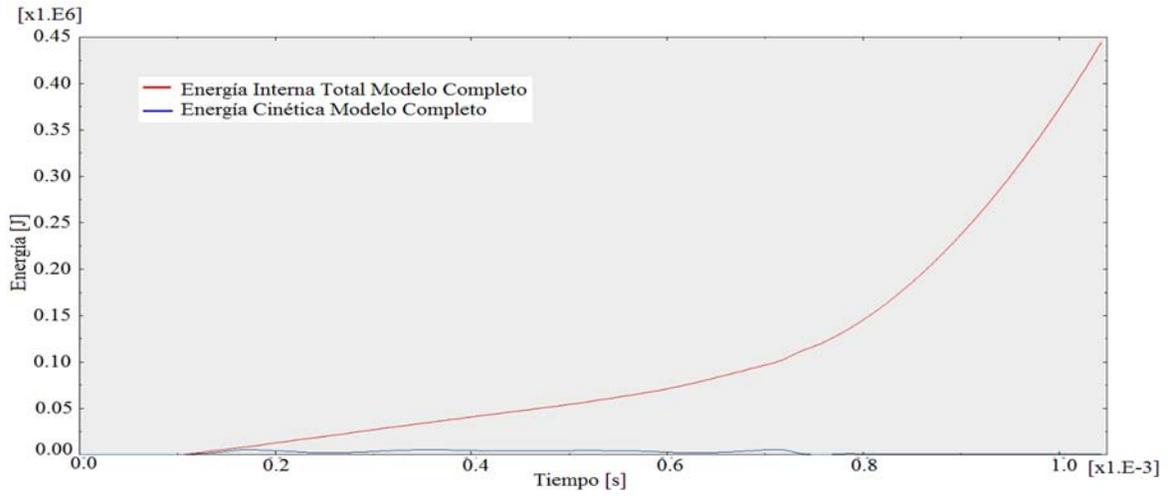


Figura 4.24 Gráfica de energía cinética y energía total para el modelo 2.

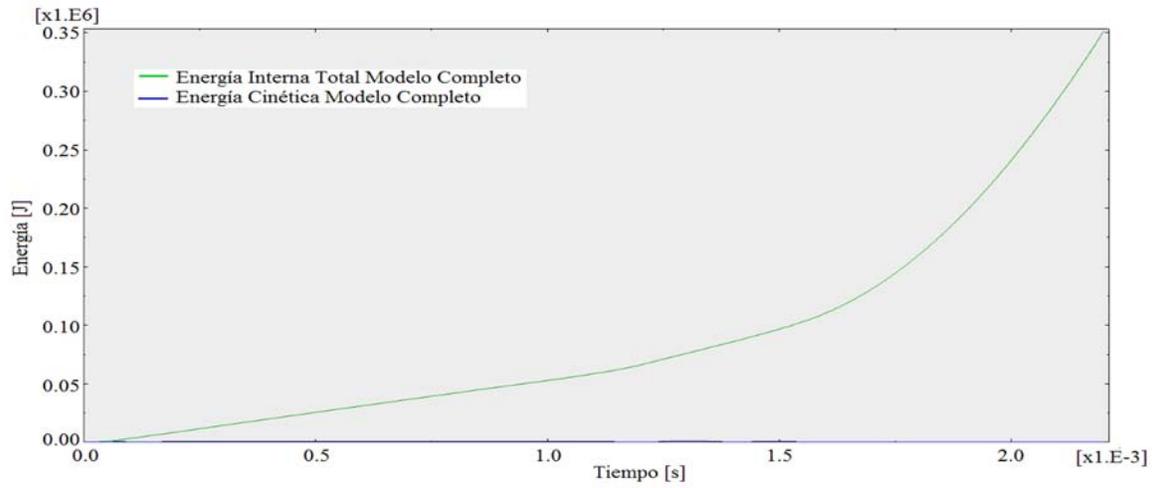


Figura 4.25 Gráfica de energía cinética y energía total para el modelo 3.

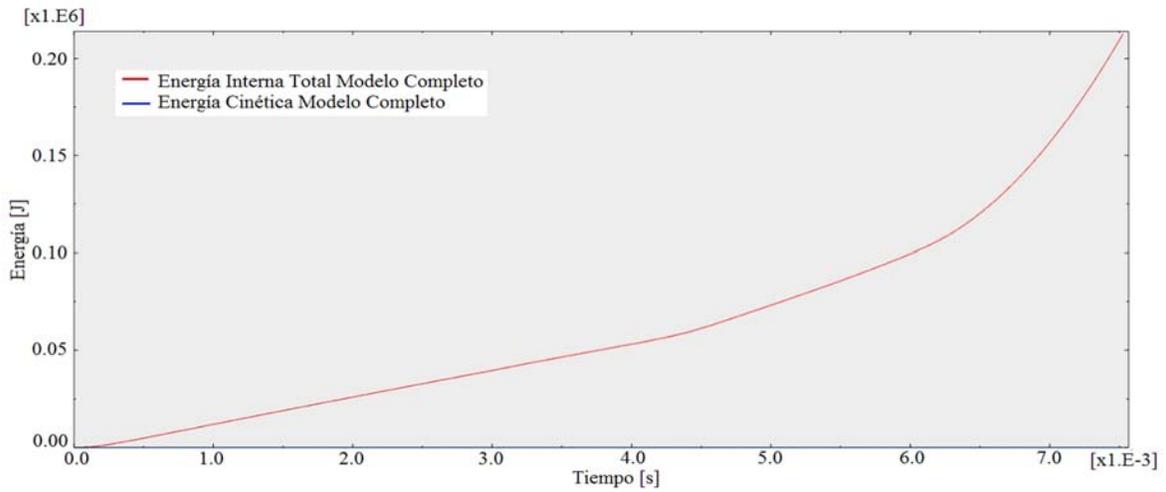


Figura 4.26 Gráfica de energía cinética y energía total para el modelo 4.

4.6. Tiempos de cómputo.

En la tabla 4.3 se muestran los tiempos de cómputo de cada modelo analizado, estos tienen el mismo mallado y condiciones de frontera, sólo la velocidad y el tiempo de paso se modificó en cada uno para obtener producto extruido. Se observa que el modelo 2 es 3.5 veces mayor al modelo 1 y que el modelo 3 es 8.2 veces mayor al modelo 1, debido al tiempo de paso del modelo 4 se efectuó el análisis en otra computadora, ya que tomaría aproximadamente 877 horas en lugar de 320 horas.

Tabla 4.3. Tiempos de cómputo requeridos en cada modelo.

Modelo	Velocidad de punzón (m/s)	Tiempo [horas]
1	200	34
2	50	119
3	20	282
4	5	320

Los tiempos de cálculo están en función del equipo de cómputo utilizado que para los modelos 1, 2 y 3 se contó con una memoria RAM de 16 GB y 4 procesadores a 3.4 GHz. El modelo 4 demandó mayor capacidad de cómputo por lo tanto se utilizó un equipo que cuenta con una memoria RAM de 64 GB y 8 procesadores a 3.4 GHz.

Capítulo 5 Conclusiones.

El presente trabajo modeló un proceso de conformado mecánico que en otras formulaciones como el arbitrario lagrangiano euleriano (ALE) concluía prematuramente debido a la incorrecta selección de malla y la excesiva deformación presente en esta. Mediante el uso del método acoplado euleriano lagrangiano (CEL) fue posible la simulación sin utilizar criterios de remallado, control de distorsión de malla o criterios de separación que otros métodos requieren en las distintas etapas que se ven involucradas.

La distribución de la deformación del material es dependiente de la velocidad de aplicación, ya que los valores son altos si la velocidad lo es y la deformación disminuye cuando se desarrollan modelos a velocidades menores, sin embargo, dejando de lado las magnitudes se puede ver que el comportamiento de los modelos 2, 3 y 4 en la deformación es similar, el valor máximo se presenta en el contacto que existe entre material y dado en la zona de los ojos de buey, una zona intermedia de deformación en los planos de soldadura y deformación mínima en la zona central del lingote.

Los esfuerzos son similares para todos los modelos y existen diferencias del 1 al 2 % entre ellos tomando como referencia el modelo 4 que mejor distribución y geometría genera, esto indica que la evolución de esfuerzos en todo el proceso es confiable y que dichos resultados se pueden tomar para analizar el proceso en este caso.

Para elegir correctamente el equipo de extrusión y herramental se requiere la fuerza de extrusión necesaria, este parámetro es dependiente de la velocidad del punzón ya que si aumenta la magnitud, mayor es la fuerza necesaria. Esta tendencia permite suponer que si se realiza a la velocidad de punzón de mm/s y no a m/s se obtendrán resultados aproximados a los experimentales.

De acuerdo a la visualización vectorial de flujo, se observó la importancia de la presencia de zonas muertas dentro del proceso, la aparición de estas elevan la magnitud de la fuerza necesaria, que impacta en una prensa de mayor capacidad, sin embargo, el material tiende a generar sus propios ángulos de ataque debido a la presencia de estas zonas y en la intercara entre material estancado y en movimiento se producen rozamientos que provocan que el producto terminado tenga un acabado superficial brillante y satinado, evitando la implementación de recubrimientos superficiales como el anodizado.

La propuesta del dado tipo ojo de buey no es la mejor opción para obtener perfiles mediante extrusión, ya que debido a que esté forma sus propias zonas muertas, aumenta sensiblemente la magnitud de la fuerza necesaria para extruir. El uso de dados tipo araña podrían ser la solución adecuada a dicho problema, gracias a su diseño se presentan flujos convergentes que permiten obtener producto extruido con una carga menor a la del tipo ojo de buey.

La extrusión no es un proceso isotérmico y la generación de modelos con generación de calor mejorarán la descripción de flujo de material, además se obtendrían 2 variables adicionales que son: el perfil de temperaturas y el flujo de calor. Sin embargo, las simulaciones isotérmicas mostraron muy buena relación con el modelo experimental.

Las curvas de energía para el modelo 1 no presentaron el comportamiento deseado, ya que la alta velocidad afecta las variables inerciales dentro del modelo, provocando una mala distribución y geometría del producto extruido, no obstante, los modelos 2, 3 y 4 si mostraron el comportamiento deseado, sin embargo, de acuerdo a los resultados de las variables analizadas se concluye que los esfuerzos y el flujo de material son las únicas variables válidas.

La conclusión anterior repercute en el tiempo de cómputo necesario, ya que el modelo 2 demando 119 horas de análisis, mientras que el modelo 3 requirió 282 horas, por su parte, el modelo 4 tomó 320 horas pero en un equipo más potente al utilizado en los modelos 1, 2 y 3. Por lo tanto, si el usuario quiere obtener la distribución de los esfuerzos y el flujo de material basta con que la gráfica de energía interna sea mayor a la cinética para obtener resultados confiables en 119 horas y no en 282 o 320 horas utilizando mayor capacidad de cómputo.

La geometría de los herramientales fue la misma para todos los modelos, sin embargo, con esta deducción el diseñador puede someter diferentes geometrías a velocidades mayores y así observar el flujo de material y predecir geometrías finales en tiempos de cómputo menores en comparación al requerido si se hace en la velocidad real.

Este trabajo demostró que la implementación del método CEL es una solución viable, debido a que la extrusión directa utilizando un sistema de doble dado presenta deformación excesiva, separación de material y posteriormente soldadura, para finalizar en la obtención de un perfil.

Bibliografía.

1. Groover Mikell, *FUNDAMENTALS OF MODERN MANUFACTURING: MATERIALS, PROCESSES AND SYSTEMS*, Cuarta Edición, John Wiley & Sons Inc, Nueva Jersey, 2010.
2. Aluminum Extruders Council, *ALUMINUM EXTRUSIONS*, AEC, USA, 2012.
3. Lindberg Roy A., *PROCESSES AND MATERIALS OF MANUFACTURE*, Cuarta edición, Allyn and Bacon, Boston, 1990.
4. Doyle Lawrence E., *MATERIALES Y PROCESOS DE MANUFACTURA PARA INGENIEROS*, Tercera edición, Prentice Hall, México, 1988.
5. Asociación Española del Aluminio y Tratamientos de Superficie, *EXTRUSIÓN DEL ALUMINIO*, AEA, España, 2014.
6. Kalpakjian Serope, Schmid Steven, *MANUFACTURING, ENGINEERING & TECHNOLOGY*, Quinta Edición, Prentice Hall, Nueva Jersey, 2006.
7. GIA Ceclim Press, *TECNOLOGÍA DE LA EXTRUSIÓN*, GIA, España, 2014.
8. Boljanovic Vukota, *METAL SHAPING PROCESSES: CASTING AND MOLDING, PARTICULATE PROCESSING, DEFORMATION PROCESSES, AND METAL REMOVAL*, Industrial Press, New York, 2010.
9. Dieter George E., *MECHANICAL METALLURGY*, Tercera edición, McGraw-Hill, Reino Unido, 1988.
10. Méndez Diana, Hidalgo Mario, *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO DE EXTRUSIÓN DIRECTA PARA PRODUCIR PERFILES DE PLOMO ARTESANAL*, Tesis de licenciatura, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador, 2011.
11. Schey John A., *PROCESOS DE MANUFACTURA*, Tercera edición, McGraw-Hill, México, 2000.
12. Alcati Extrusión, *EXTRUSIÓN DEL ALUMINIO*, Antequera, Málaga, 2013.
13. López Tomás N., *TROQUELADO Y ESTAMPACIÓN: CON APLICACIONES AL PUNZONADO, DOBLADO, EMBUTIDO Y EXTRUSIÓN*, Quinta edición, Gustavo Gili, Barcelona, 1976.
14. Ortiz Prado Armando, Ruiz Cervantes Osvaldo, Ortiz Valera Armando, *MODELADO DE PROCESOS DE MANUFACTURA*, Facultad de Ingeniería UNAM, México, 2013.
15. ASM International, *METALS HANDBOOK VOL. 14 FORMING AND FORGING*, Cuarta edición, ASM International, USA, 1996.
16. Askeland Donald R., *CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES*, Tercera edición, International Thomson Editores, México, 1998.
17. Aluminum Extruders Council, *DESIGN RESOURCES: ALLOYS*, AEC, USA, 2013.

18. *Materials Management Inc, ALUMINUM ALLOYS, Aluminum Source, USA, 2014.*
19. *Tri State Aluminum, EXTRUSION GUIDE, Chimney, Nueva Jersey, 2010.*
20. *Beddoes Jonathan, PRINCIPLES OF METAL MANUFACTURING PROCESSES, London Arnold, New York, 1999.*
21. *Zhou J., Duszczyk J., 3D FEM SIMULATION OF THE WHOLE CYCLE OF ALUMINIUM EXTRUSION THROUGHOUT THE TRANSIENT STATE AND THE STEADY STATE USING THE UPDATED LAGRANGIAN APPROACH, Journal of Materials Processing Technology, Holanda, 2002.*
22. *Lascoe Orville D., HANDBOOK OF FABRICATION PROCESSES, ASM International, Ohio, 1988.*
23. *Extrusiones Metálicas, CATALOGO LINEA ESPAÑOLA, Grupo EM, México, 2010.*
24. *Alumeco, KNOWLEDGE AND TECHNIQUE: ALUMINIUM TIPS, Odense, Dinamarca, 2013.*
25. *Kalpakjian Serope, Schmid Steven, MANUFACTURING PROCESSES FOR ENGINEERING MATERIALS, Quinta edición, Prentice Hall, India, 2009.*
26. *Elite Die, EXTRUSION DIES MANUFACTURER FOR ALUMINIUM, Elite Extrusion Die, Reino Unido, 2014.*
27. *ASM International, ALUMINUM EXTRUSION TECHNOLOGY, Primera edición, ASM International, USA, 2000.*
28. *Xianghong W., Guoqun Z., Yiguo L., NUMERICAL SIMULATION AND DIE STRUCTURE OPTIMIZATION OF AN ALUMINUM RECTANGULAR HOLLOW PIPE EXTRUSION PROCESS, Materials Science & Engineering, China, 2006.*
29. *Liu G., Zhou J., Duszczyk J., FE ANALYSIS OF METAL FLOW AND WELD SEAM FORMATION IN A PORTHOLE DIE DURING THE EXTRUSION OF A MAGNESIUM ALLOY INTO A SQUARE TUBE AND THE EFFECT OF RAM SPEED ON WELD STRENGTH, Journal of Materials Processing Technology, Holanda, 2007.*
30. *Jo H., Lee S., Jung S., A NON-STEADY FE ANALYSIS OF AL TUBES HOT EXTRUSION BY A PORTHOLE DIE, Journal of Materials Processing Technology, Corea del Sur, 2005.*
31. *Zhang C., Zhao G., Chen Z., Chen H., EFFECT OF EXTRUSION STEM SPEED ON EXTRUSION PROCESS FOR A HOLLOW ALUMINUM PROFILE, Materials Science and Engineering, China, 2011.*
32. *Alameda E., MODELADO DEL PROCESO DE FORJADO ORBITAL MEDIANTE PAQUETERIA DE ELEMENTO FINITO, Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería UNAM, México, 2010.*
33. *Padmanathan Kathirgamanathan, PARAMETER OPTIMIZATION OF THE PROCESS OF AA6XXX AND AA7XXX SERIES ALUMINIUM EXTRUSION, Auckland University of Technology, Nueva Zelanda, 2013.*
34. *Figuroa F., MODELADO DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN INVERSA MEDIANTE SOFTWARE DE ELEMENTO FINITO, Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería UNAM, 2009.*

35. *Abaqus Analysis User's Guide v6.14, Chapter 14.1.1, Eulerian analysis.*
36. *Abaqus/CAE User's Guide v6.14, Chapter 28.5 The volume fraction tool.*
37. *Abaqus/CAE User's Guide v6.14, Chapter 2.3.1 Rivet forming.*
38. *Simulia Dassault Systemes, Coupled Eulerian Lagrangian Modelling Techniques, Lecture 4, 2010.*
39. *Matweb, ALUMINIUM 7005 DATA SHEETS, Material Property Data, USA, 2015.*
40. *Lian Chen, Guoqun Zhao, CONSTITUTIVE ANALYSIS OF HOMOGENIZED 7005 ALUMINIUM ALLOY AT EVALUATED TEMPERATURE FOR EXTRUSION PROCESS, Materials and Design, China, 2014.*
41. *Abaqus Analysis User's Guide v6.14, Chapter 6.3.3, Explicit dynamic analysis.*
42. *Abaqus/CAE User's Manual v6.7, Chapter 18.4.9 Recovering an Abaqus/Standard analysis.*
43. *Vargas Mark, MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN PROCESO DE CORTE ORTOGONAL TERMOMECAÁNICO USANDO PAQUETERÍA DE ELEMENTO FINITO, Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería UNAM, 2015.*
44. *Simulia Dassault Systemes, Abaqus Explicit: Advanced Topics; Contact Modelling, Lecture 4, 2005.*
45. *Abaqus Analysis User's Guide v6.14, Chapter 12.2.1 ALE adaptive meshing.*
46. *Abaqus/CAE User's Guide v6.14, Chapter 2.3.2 Impact of a water-filled bottle.*
47. *Saucedo Alan, SIMULACIÓN DE LA COLADA GRAVITACIONAL MEDIANTE PAQUETERÍA DE ELEMENTO FINITO, Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería UNAM, 2013.*
48. *Fan Li, Peiran Ding, COUPLED FLUID STRUCTURE INTERACTION SIMULATION USING ABAQUS CEL, GM Fuel CAE, Michigan, 2009.*
49. *Abaqus Analysis User's Guide v6.14, Chapter 32.14.1 Eulerian elements.*
50. *Zhong Z., Saka H., Kim T., A BONDING MAP FOR CU AND AL PLATES BY PRESSURE WELDING AT COLD AND WARM TEMPERATURES, Materials Science Forum, Suiza, 2005.*
51. *Koopman Albertus J., ANALYSIS TOOLS FOR THE DESIGN OF ALUMINIUM EXTRUSION DIES, Tesis de doctorado, Universidad de Twente, Holanda, 2008.*
52. *Han Xingui, Hua Lin, 3D FE MODELLING SIMULATION OF COLD ROTATORY FORGING OF A CYLINDER WORKPIECE, Material and Design, China, 2008.*