



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

MODELADO DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN INVERSA
MEDIANTE SOFTWARE DE ELEMENTO FINITO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

I N G E N I E R O M E C Á N I C O

P R E S E N T A:

FERNANDO FIGUEROA PILZ

DIRECTOR DE TESIS:

M. en C. EDGAR ISAAC RAMÍREZ DÍAZ



CIUDAD UNIVERSITARIA

2009

Agradecimientos

A mis padres Fernando y Paulina por su cariño incondicional. Les agradezco su esfuerzo y apoyo a través de los años y especialmente su amistad. Les agradezco la libertad con que me han permitido crecer y por las enseñanzas que han cambiado mi forma de ver el mundo. Junto a ustedes he vivido momentos muy felices y he encontrado consejo y ayuda en los momentos difíciles. Por todo ello, muchas gracias.

A mi hermana Amanda por el aprendizaje recibido y por la motivación que significó la culminación de su propio proceso. A mis hermanas Lenika y Tania por el tiempo compartido.

A Ruth una mujer única y especial en mi vida que me ha estado en los tiempos difíciles y con quien he compartido momentos muy felices.

A mis amigos de la Facultad de Ingeniería: Carlos, Esaú, Toño, Adrian por los buenos momentos y los proyectos que desarrollamos a lo largo de estos años.

A mi director de tesis el M. en C. Edgar Isaac Ramírez Díaz por su tiempo, apoyo y su auténtico deseo de transmitir el conocimiento así como por la confianza y paciencia brindadas en el desarrollo de esta tesis.

A mis sinodales: Ing. Osvaldo Ruiz Cervantes, al M. en C. Ubaldo Márquez Amador, al Dr. Armando Ortiz Prado y al Dr. Javier Cervantes Cabello por las contribuciones para la mejora del presente trabajo.

Al Ing. José Luis García del IPN, por las valiosas aportaciones realizadas al desarrollo de este trabajo y su desinteresado compromiso con la enseñanza.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por su libertad, diversidad y compromiso con México.

Índice de contenido

1. Conceptos generales del proceso de extrusión	1
1.1. Introducción	1
1.2. Características del proceso	3
1.3. Clasificación de los procesos de extrusión	3
1.4. Economía de la extrusión inversa	5
1.5. Geometría del proceso de extrusión inversa	6
1.6. Fricción y lubricación	10
1.7. Dependencia velocidad-temperatura	12
1.8. Flujo del material durante el proceso	13
1.9. Equipos utilizados para extruir metales	18
2. Fundamentos del formado de metales	20
2.1. Esfuerzo-deformación	20
2.2. Modelos analíticos de la región plástica	21
2.3. Mecanismos de deformación	24
2.4. Criterios de fluencia	26
2.4.1. Criterio de Tresca	26
2.4.2. Criterio de von Mises	27
3. Modelos del proceso de extrusión inversa	28
3.1. Evolución en el estudio de la extrusión	28
3.2. Método del límite superior	29
3.3. Método del planchón	30
3.4. Modelos experimentales	34
3.4.1. Método de extensión superficial en materiales blandos	34
3.4.2. Predicción de flujo con material de contraste	36
3.5. Simulaciones numéricas	37
3.6. Técnicas de remallado por mapeo	39

4. Modelos de extrusión inversa en Abaqus®	40
4.1. Modelo general de extrusión inversa	40
4.1.1. Geometría del proceso	40
4.1.2. Definición del material	41
4.1.3. Tipos de análisis	42
4.1.4. Condiciones de contacto	43
4.1.5. Condiciones de frontera	44
4.1.6. Generación de malla	44
4.1.7. Resultados y visualización	45
4.2. Técnicas de mallado y reparación de malla	45
4.2.1. Mapeo de solución	46
4.2.2. Mallado adaptativo ALE (arbitrario lagrangiano euleriano)	49
4.2.3. Selección y construcción de mallas	51
4.3. Economía computacional	54
4.3.1. Escalamiento artificial de masa	55
4.3.2. Escalamiento de velocidad	58
4.4. Variación del coeficiente de fricción	61
4.5. Variación geométrica	63
4.5.1. Influencia de la geometría de la matriz	63
4.5.2. Influencia de la geometría del punzón	64
5. Modelos de extrusión combinada en Abaqus®	66
5.1. Modelo general	66
5.2. Geometría del proceso	67
5.3. Condiciones de la simulación	68
5.4. Construcción y selección de malla	69
5.5. Resultados y visualización	69
5.6. Mallado CEL (acoplado lagrangiano-euleriano)	71
6. Conclusiones	74
7. Bibliografía	76

Prólogo

Las simulaciones numéricas son empleadas en diversas áreas de las ciencias e ingenierías para diseñar y analizar, o bien para encontrar soluciones a modelos físico-matemáticos. Entre los métodos numéricos más empleados se encuentra el método de elementos finitos (FEM). En éste método, un problema continuo es remplazado por un problema discreto cuya solución es una aproximación al problema inicial y cuya exactitud depende de varias elecciones realizadas en el proceso numérico.

La exactitud de la simulación numérica puede ser comparada con modelos analíticos, resultados experimentales o bien constituir un modelo único para describir un fenómeno. En los dos primeros casos, los factores físicos que gobiernan un fenómeno son directamente cuantificados o visualizados.

Sin embargo, la construcción de un modelo para simulación numérica involucra no solo el entendimiento de los fenómenos físicos particulares (transferencia de calor, mecanismos de deformación, etc.) sino que debido a la naturaleza del método, la selección de la discretización del modelo, la selección de las condiciones de frontera y la introducción correcta de las variables físicas se añaden a las dificultades.

Dentro de éste contexto se engloba el modelado numérico de los procesos de conformado mecánico, que por la dificultad de incluir todas las variables físicas dentro de modelos analíticos se han empleado los métodos numéricos. Aunque existe una gran cantidad de literatura sobre el método de elementos finitos y sobre los procesos de conformado, es más reducida la referente a las técnicas computacionales existentes para acoplar estos dos campos.

Este trabajo por ello, se enfoca en la simulación computacional de procesos de extrusión, que son procesos de conformado muy importantes para la generación de perfiles. Para lograrlo se construirán los modelos en una paquetería comercial de elemento finito introduciendo las características particulares (físicas y mecánicas) de los materiales y se presentarán las técnicas existentes para poder simular el proceso de extrusión, (generación y selección de mallas, mallado adaptativo, escalamientos de masa y velocidad) esto es necesario ya que el espacio discretizado se distorsiona de tal forma que sin la utilización correcta de las herramientas existentes en la paquetería, este proceso de grandes deformaciones sería imposible de simular.

Una vez que se obtenga un modelo satisfactorio se modificarán las propiedades de contacto (coeficiente de fricción), la geometría de la matriz y del punzón y se buscará optimizar con base en la fuerza de extrusión. Estos resultados se compararan con experimentos reportados en la literatura y con los modelos analíticos existentes.

Con la finalidad de entender el proceso de extrusión el primer capítulo presenta las variables físicas y geométricas que gobiernan el proceso de extrusión. Así mismo se plantea la relación que estas guardan dentro de la simulación numérica.

El contenido del segundo capítulo presenta los conceptos teóricos que respaldan el análisis de los procesos de manufactura incluidos los modelos de plasticidad y los criterios de cedencia utilizados para predecir el flujo plástico.

El tercer capítulo ofrece una descripción de los modelos analíticos que han surgido para calcular la carga requerida durante la extrusión. Por otra parte se presentan algunos análisis llevados a cabo en los últimos años sobre extrusión indirecta en especial de las técnicas surgidas para la visualización del flujo y los análisis numéricos que se han realizado para estudiar el conformado mecánico.

El cuarto capítulo presenta la secuencia para la construcción del modelo en computadora y los detalles necesarios para la comprensión de las herramientas empleadas. Se presentan los pasos requeridos para conseguir un modelo adecuado y económico desde el punto de vista computacional y con el cual sea posible comparar la carga de extrusión variando diversas condiciones de trabajo. Este análisis (extrusión inversa) servirá de antecedente para construir, analizar y aplicar las técnicas previamente mencionadas a un proceso de extrusión mucho más complejo en cual se combinan extrusión directa, inversa y radial, y para el cual existen datos comparativos experimentales que serán presentados en el quinto capítulo.

Finalmente se hacen recomendaciones para simular adecuadamente un proceso de conformado particularmente de procesos de extrusión mediante paquetería de elemento finito. Adicionalmente presentan las comparaciones entre los valores obtenidos por métodos experimentales, teóricos y de simulación numérica para observar las diferencias.

Capítulo 1

Conceptos generales sobre el proceso de extrusión

1.1 Introducción

El estudio detallado de los procesos de conformado mecánico ha sido extensivo desde los primeros años del siglo XX. Su diseño es de gran interés debido a que, su optimización se traduce en una reducción en los costos de producción al incrementarse la vida útil de las herramientas y disminuirse los tiempos de fabricación. La gran variedad de procesos existentes para generar una misma geometría ha provocado que la selección se vuelva una cuestión integral, donde se cuantifique de forma simultánea la influencia de las variables que modifican los requerimientos necesarios para el conformado y las características del producto generado.

La utilización de simulaciones numéricas para resolver problemas de conformado en particular aquellas que se basan en el método de elementos finitos (FEM), han revolucionado el diseño de los procesos de manufactura. Junto a éste se han desarrollado los sistemas de diseño, manufactura e ingeniería asistida por computadora (CAD/CAM/CAE), que han permitido cuantificar el efecto de los factores más importantes del proceso de conformado como son: la fricción, las propiedades de los materiales, las geometrías involucradas en las herramientas así como las condiciones de temperatura y velocidad. Es por ello que las simulaciones de procesos asistidas por computadora permiten la optimización y predicción de características de los procesos, puesto que en ellas es posible estimar la interrelación de las variables y el efecto que tiene su presencia durante el conformado.

Dentro de la variedad de procesos existentes en la industria para el conformado plástico de metales (forja, laminación, embutido, trefilado, etc.) la selección del proceso adecuado para generar una geometría por deformación plástica depende de las necesidades de cada cual, sin embargo la generación de perfiles para tuberías, estructuras, marcos y armaduras de secciones complejas, así como la de geometrías internas, está gobernada por el proceso de extrusión.

Como ejemplo, en la *figura 1.1* se observa la distribución de procesos para productos semiacabados en dos compañías de aviación y donde se puede apreciar la importancia del proceso de extrusión en la fabricación de elementos estructurales:

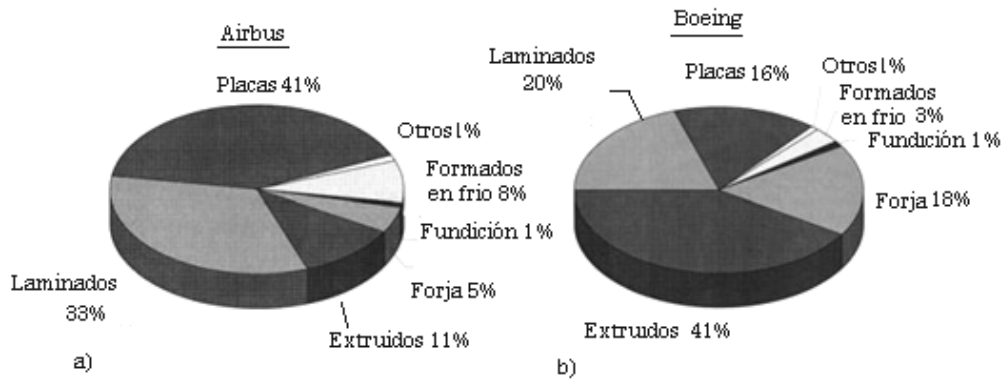


Figura 1.1: Distribución de productos semiterminados de aluminio: a) Airbus b) Boeing, (Bauser, 2006)

Por otro lado el aluminio es el metal no ferroso más utilizado con un estimado de consumo de 24 millones de toneladas por año (Totten, 2003). Con propiedades únicas, baja densidad, elevadas propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión, así como por ser un material sustentable ecológicamente, el aluminio se continuará desarrollando. También se deben considerar las nuevas tecnologías de manufactura que reducen los costos de obtención del material y hacen más atractivos sus procesos de transformación.

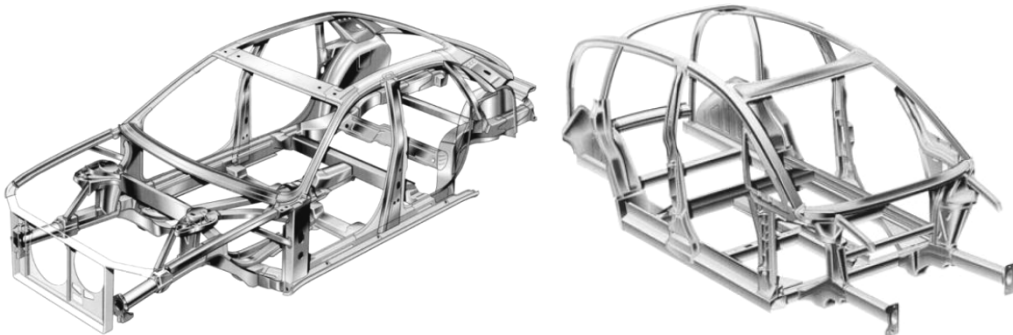


Figura 1.2: a) Estructura de AUDI A2 .b) Componentes estructurales del AUDI A2, extruidos o de fundición (Bauser, 2006).

Por otra parte se encuentran los programas de computadora basados en el método de elemento finito con los que es posible darle solución a problemas que antes estaban exclusivamente condicionados por la experiencia del diseñador a base de prueba y error.

Con dicho antecedente se desarrolla este trabajo con el cual, empleando las capacidades existentes dentro de las paqueterías de elemento finito y en especial de las que posee Abaqus 6.8 ® desarrollado por Dassault Systemes se pretende generar y analizar modelos de extrusión en aluminio y presentar los elementos necesarios para simular correctamente este proceso de conformado.

1.2 Características del proceso de extrusión

La extrusión es un proceso de conformado plástico para generar elementos de sección transversal constante. Durante el proceso, un tocho se somete a presiones elevadas dentro de una cámara empleando un punzón o bien por medio de campos hidrostáticos que hacen fluir el material través de dados con la sección transversal deseada.

1.3 Clasificación de los procesos de extrusión

Dependiendo de la temperatura a la cual se realiza la extrusión, el proceso se puede clasificar como:

- Extrusión en frío: Se realiza a temperaturas por debajo del rango de recristalización, frecuentemente realizada a temperatura ambiente, sin embargo, debido al trabajo de deformación, la temperatura se eleva durante el conformado. Una característica del proceso es que los metales presentan un endurecimiento por trabajo en frío dando como consecuencia un incremento en el esfuerzo de cedencia y una disminución en la ductilidad. Comparado con otras operaciones de conformado en frío este proceso ofrece ventajas como: precisión dimensional, excelente acabado superficial, bajo consumo de energía, menores desperdicios. Las aleaciones más comúnmente empleadas de aluminio en extrusión son las de la serie 1XXX y la 3XXX. Aunque se puede emplear aleaciones tratables térmicamente para procesos donde las resistencias mecánicas del producto final se deseen incrementar, las más comunes en este tipo son las de la serie 6XXX para elementos sometidos a sollicitaciones elevadas.
- Extrusión en caliente: El trabajo en caliente de los metales toma lugar por encima de la temperatura de recristalización o rango de endurecimiento por trabajo. En los procesos de conformado en caliente se produce bajo condiciones de temperatura y velocidad de deformación tales que se elimina el endurecimiento por deformación y la estructura granular es transformada, a nuevos granos libres de deformaciones mediante un proceso de recristalización. Particularmente la extrusión de aluminio en caliente se realiza a temperaturas de entre 300 y 500° C dependiendo del punto de fusión de la aleación que se desee conformar (Totten, 2003).

Si se realiza una clasificación dependiendo de la dirección del flujo del material con relación a la dirección de movimiento de la herramienta se obtiene:

- Directa o hacia adelante: El sentido de flujo del material y el de la herramienta es el mismo.
- Inversa o indirecta o hacia atrás: El flujo de material se produce en sentido contrario al de la herramienta.

- Lateral o radial: La dirección del flujo del material es perpendicular, o a un ángulo con respecto a la dirección del movimiento de la herramienta.

Dependiendo de la geometría del material, antes y después del proceso:

- Sólida: La geometría inicial y final del material son de sección transversal sólida.
- Hueca: Se genera una sección de pared delgada a partir de un material con sección transversal sólida.

Adicionalmente se pueden clasificar el proceso de extrusión dependiendo de la geometría de la matriz:

- Matriz abierta: El material extruido fluye de forma continua sin limitantes geométricas debidas al punzón o la matriz.
- Matriz cerrada: El conformado se ejecuta dentro de un volumen determinado, por lo que entre el punzón y la matriz existen tolerancias muy estrechas.

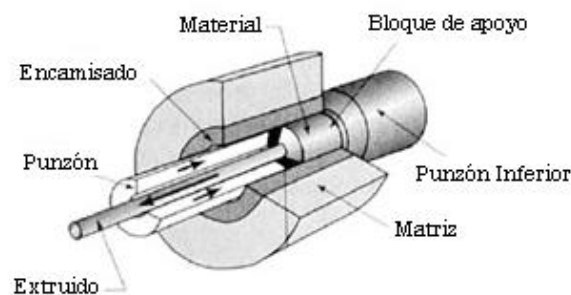


Figura 1.3: Esquema del proceso de extrusión inversa (DeGarmo, 1990).

Así mismo es posible extruir simultáneamente en varias direcciones (incluyendo la combinación de variantes geométricas, temperatura y matriz) por ejemplo:

- Inversa –Directa.
- Inversa-Inversa.
- Inversa-Radial.
- Directa-Inversa-Radial

Algunas de las ventajas que presenta el proceso de extrusión inversa son:

- La carga máxima en relación con la extrusión directa es de entre 20 a 30% menor (ASM, 2005).
- La presión de extrusión no se incrementa de forma significativa con el incremento de la longitud inicial del material, debido a que no existe movimiento relativo entre el material y el contenedor.
- Debido a que no existe deslizamiento entre el contenedor y el material no hay generación de calor adicional por rozamiento, por lo que las velocidades del proceso pueden ser incrementadas.
- La vida de las herramientas es mayor que durante los procesos de extrusión directa por la disminución de cargas y generación de calor.

Dentro de las limitaciones que se presentan se encuentran:

- Defectos de superficie que requieran etapas posteriores de maquinado.
- El área de las secciones transversales son menores que las producidas por extrusión directa.

1.4 Economía del proceso

El proceso de extrusión inversa realizado en frío debe elegirse entre la variedad de procesos cuando la inversión en maquinaria, herramientas y equipos auxiliares represente una parte del ahorro obtenido por el proceso, esto ocurre en los siguientes casos (Lange, 1985):

- Extrusión en frío de camisas en vez de embutido profundo en varias etapas. Un mayor espesor de fondo, como se mostrará más adelante no afecta la economía del proceso.
- Extrusión de latas con material de corte de desperdicio en vez de maquinado directo de barra.
- Generación de secciones huecas, especialmente para el proceso de extrusión combinada.
- Ahorro en maquinados parciales o de acabado en productos extruidos. Esto es más notorio para secciones huecas.
- Ahorro de material comparado con maquinado completo o con piezas provenientes de forja libre. Las piezas que se realizan en varias etapas o con pestañas radiales son un ejemplo de ello.

1.5 Geometría del proceso de extrusión inversa

La extrusión inversa se lleva a cabo colocando un material de diámetro d_o y longitud h_o dentro de la matriz o contenedor entre los que suele existir un claro de alrededor de 0.2 [mm]. En la *figura 1.4* se muestra un corte de los elementos involucrados en el proceso de extrusión inversa y sus índices para representar la geometría:

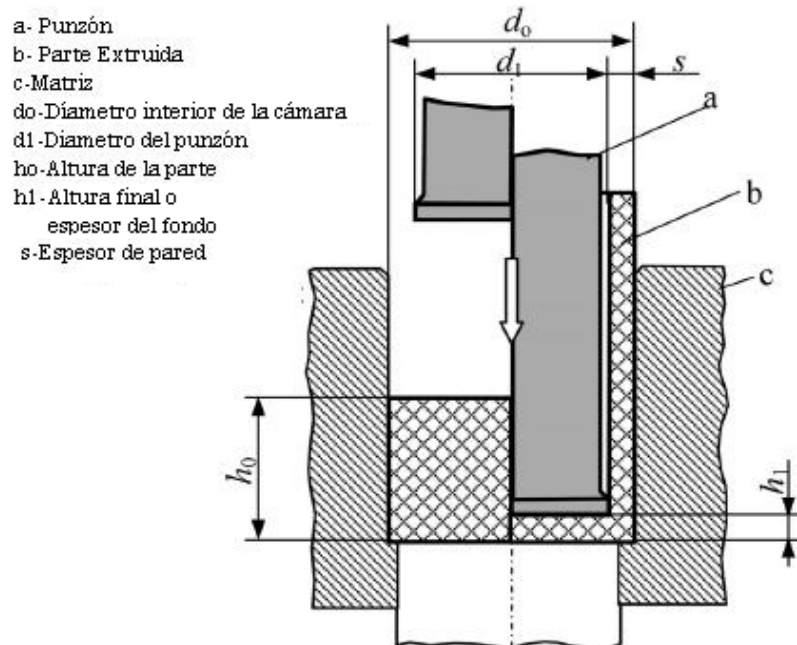


Figura 1.4: Geometría y dimensiones características en el proceso de extrusión indirecta. Posición izquierda sin deformar, posición derecha deformada. (Barisic, 2004)

Cuando el punzón comienza a desplazarse, el material fluye axialmente e incrementa su diámetro hasta d_o ($2r_o$) más el claro. Una vez que el material hace contacto completo con la matriz, el desplazamiento del punzón provocará que el material fluya entre la sección comprendida por el punzón y la matriz en sentido contrario al desplazamiento de la herramienta. Debido a que el material se desliza a lo largo de la superficie de presión del punzón bajo solicitaciones elevadas, la geometría de éste tiene gran influencia en la fuerza de fricción y por ende en la carga máxima requerida (Benani, 1995).

El desarrollo de los modelos de este trabajo se enfoca en la generación de secciones interiores circulares por lo que se profundizará en dicha geometría, sin embargo esta condición puede variar y es la geometría exterior del punzón la que determina la sección interior del perfil extruido. En el caso de extrusión inversa de secciones sólidas, el punzón es hueco con un orificio central por donde fluye el material.

Existen diversas geometrías de punzones utilizadas en la extrusión de tubos (*figura 1.5*). Los punzones planos significan un ahorro significativo desde el punto de vista de la manufactura, sin embargo su empleo representa un aumento en la carga requerida (Lange, 1985).

Los punzones con caras cónicas con aberturas de entre 160° y 175° son recomendados para procesos de fabricación de tuberías, latas o camisas de recubrimiento, ya que se mantiene una buena lubricación a lo largo del proceso y la formación de una región de flujo de velocidad menor es más lenta que con el empleo de otras geometrías.

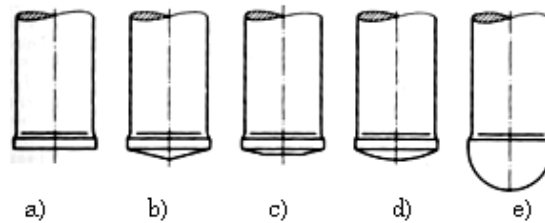


Figura 1.5: Geometría del punzón para extrusión inversa. a) Plano, b) Cónico, c) Plano y cónico, d) y e) Esférico (Lange, 1985).

En la figura 1.6 se muestra un punzón cónico-plano característico del proceso de extrusión inversa y la designación empleada para dimensionarlo:

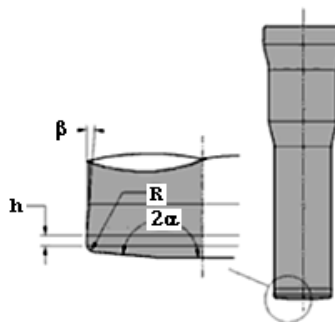


Figura 1.6: Punzón plano y cónico para extrusión inversa: 2α) abertura de entrada, h) superficie de presión, R) radio, β) ángulo de alivio (ASM International, 2005).

La ICFG (International Cold Forging Group) recomienda utilizar las siguientes relaciones en la construcción de punzones cónico-planos:

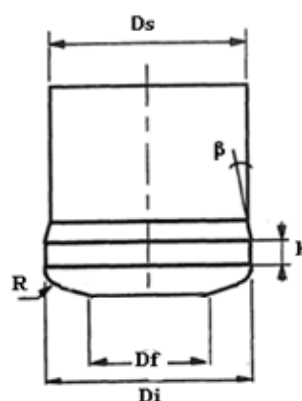


Figura 1.7: Nomenclatura para el punzón cónico plano (Bennani, 1994).

$$h = 0.5\sqrt{D_i} \text{ (mm)} \quad R = 0.075 D_i \quad \beta = 4^\circ \quad (1.1)$$

Aunque se requiere una carga menor utilizando geometrías esféricas, físicamente puede ocurrir una reducción prematura de la lubricación en la superficie de presión del punzón, incrementando el desgaste en la superficie y reduciendo su vida útil.

Adicionalmente, el contenedor o matriz puede extenderse hasta la longitud final del producto extruido, esto representa una restricción al movimiento del perfil y un reducción de la curvatura que suele generarse al comienzo de los procesos de extrusión; sin embargo representa a su vez un incremento en la carga necesaria para llevar a cabo el proceso y la generación de calor por fricción aumenta la posibilidad de que se presenten defectos en las secciones extruidas y variación en las propiedades mecánicas a lo largo del perfil. El contenedor puede mantenerse a una longitud menor para reducir la carga de extrusión.

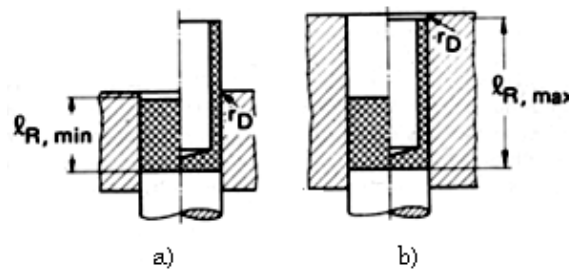


Figura 1.8 Material y geometría del contenedor: a) Material semi contenido b) Material contenido (ASM, 2000).

Con respecto a la longitud del punzón debe ser tal que se evite el pandeo durante su avance y se disminuya la posibilidad de un desalineamiento axial que provoque paredes de espesores variables a lo largo del perfil. La *tabla 1.1* muestra las relaciones experimentales que han resultado ser las más eficientes para procesos de extrusión indirecta:

Tabla 1.1: Relaciones experimentales diámetro-longitud del punzón (ASM, 2000)

Aluminio y aleaciones suaves de aluminio	8:1- 10:1
Aleaciones de alta resistencia de aluminio	5:1-7:1
Cobre y sus aleaciones	3:1-5:1
Zinc y sus aleaciones	6:1-9:1
Magnesio y sus aleaciones	4:1-6:1
Aceros al carbono	3:1-4:1
Aceros de baja aleación	2:1-3:1

El nivel de deformación en el proceso de extrusión inversa puede ser definido mediante la relación de extrusión:

$$r = \frac{d_1^2}{d_0^2} \quad (1.2)$$

Donde d_0 es el diámetro del contenedor y d_1 es el diámetro de la nariz o superficie de presión del punzón.

Las herramientas del proceso de extrusión se construyen con materiales de elevada resistencia al desgaste y de gran rigidez. Dentro de la interfaz Abaqus CAE, se pueden definir de la siguiente forma:

Herramienta Rígida (*superficie maestra*): Representa un conjunto de nodos, elementos o superficies cuyo movimiento es dependiente del movimiento de un solo punto llamado nodo de referencia (*NR*). La posición relativa de los nodos y elementos que constituyen el cuerpo rígido permanecen constantes durante todo el análisis, como consecuencia no se deforma pero puede describir grandes magnitudes de movimiento como cuerpo rígido. La ventaja principal de su utilización es el ahorro en el cálculo computacional ya que no se realizan cálculos de esfuerzos o deformaciones para la herramienta. Una cuestión que debe tomarse en cuenta es la penetración de la superficie analíticamente rígida dentro de una región definida como deformable.

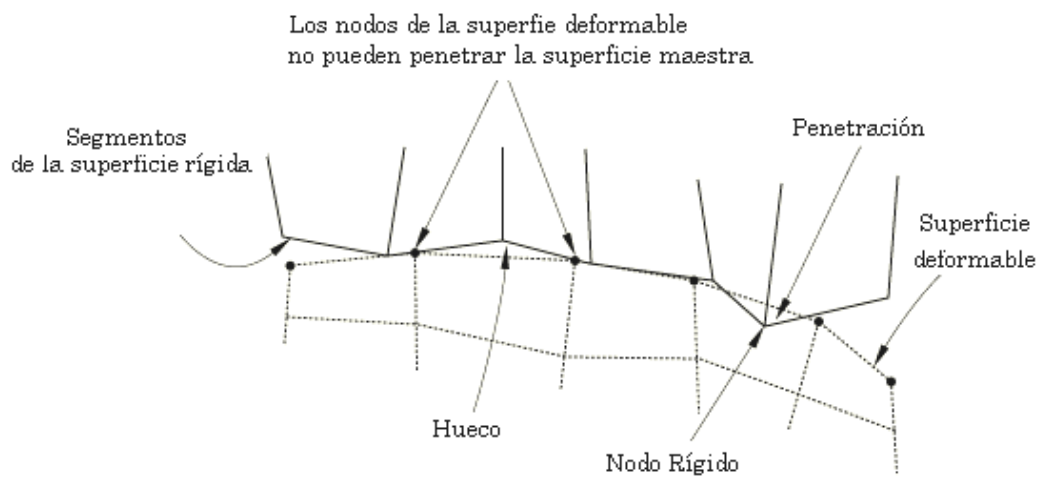


Figura 1.9: Penetración de un nodo en un región deformable (Simulia, 2006).

Herramienta Deformable: En este caso la herramienta se simula como un sólido elástico y al generarse un espacio discreto sobre ella (malla) es posible obtener la distribución de esfuerzos en la herramienta mientras deforma al material.

Como se observa en la *figura 1.9* puede ocurrir que gráficamente la herramienta rígida penetre en el material, lo que deja de tener significado físico. Sin embargo, es posible que esto se deba a:

- Una malla demasiado gruesa (muy pocos elementos).
- Cambios bruscos de dirección en la geometría de la herramienta.
- Velocidades de deformación elevada.
- Distorsión excesiva de los elementos de la malla.

Por ello, una malla adecuada en conjunto con la inclusión de radios donde el cambio de la geometría de la herramienta sea brusca (ángulos de 90°) y controles adecuados del proceso, pueden servir para predecir la geometría del producto extruido, mediante la simulación numérica.

1.6 Fricción y lubricación

La lubricación durante la extrusión tiene importantes efectos sobre:

- a) el flujo del material
- b) el acabado e integridad superficial
- c) la fuerza de conformado

Los requerimientos de un buen lubricante son:

- Bajo coeficiente de fricción
- Elevada resistencia al esfuerzo normal
- Buenas propiedades de adherencia
- Prevención de soldadura en frío (soldadura por presión)

Estas condiciones se cumplen para materiales no ferrosos lubricados con aceites y grasas o algunos otros minerales como disulfuro de molibdeno y grafito en conjunción con recubrimientos de fosfato. Algunos datos indican que los recubrimientos de fosfato con espesor de $1-30\mu\text{m}$ ($40-1200\mu\text{in}$) no tienen un efecto significativo en el aumento de la presión requerida para el proceso, aunque diferentes lubricantes con partículas sólidas pueden causar un incremento de hasta 20% en la fuerza máxima requerida, por generar obstrucciones en el flujo del material o el punzón. (Lange, 1985)

Para procesos de extrusión en caliente el vidrio es un excelente lubricante utilizado para aceros de bajo carbono e inoxidable, así como metales y aleaciones de alta temperatura. En el proceso *Sejournet*, se coloca un soporte circular de vidrio en la cámara a la entrada del dado, el material previamente calentado conduce calor al soporte con lo cual se funde una delgada capa de vidrio que actúa como lubricante en la interfaz de la cámara con el material.

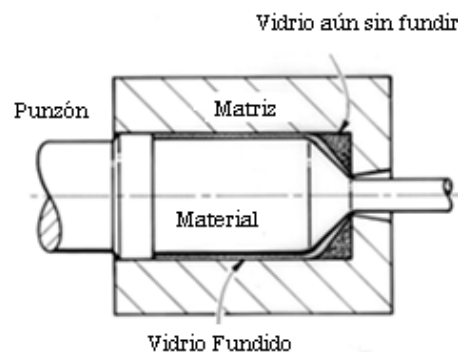


Figura 1.10: Proceso de reducción de fricción en extrusión en caliente *Sejournet* (DeGarmo, 1999).

En el caso de metales que tienden a adherirse al contenedor y al punzón, se suele emplear un recubrimiento de pared delgada fabricado con un metal más blando y de resistencia inferior, este proceso se conoce como encamisado o enlatado y suele emplearse cuando se desean extruir polvos reactivos que pudieran interactuar químicamente con el contenedor o bien como un elemento adicional a la lubricación en aceros y aleaciones de titanio y aluminio.

La fricción en los procesos de conformado mecánico depende de una variedad de parámetros. Con la intención de explicar el fenómeno empleando relaciones analíticas simplificadas se han construido diversos modelos entre los que destacan: Modelo isotrópico de Coulomb:

$$\tau = \mu p \quad (1.3)$$

donde τ es el esfuerzo de fricción, μ es el coeficiente de fricción y p representa el esfuerzo normal de contacto superficial. Este modelo es válido para contacto elástico y proceso de formado con bajas presiones de contacto. Para presiones más elevadas se emplea la siguiente relación:

$$\tau = mk \quad (1.4)$$

donde m es el factor de fricción cortante y k es el esfuerzo de fluencia cortante del material en el contacto con menor resistencia. Adicionalmente existe un modelo general que es una combinación de los modelos mencionados anteriormente y se expresa como:

$$\tau = f\alpha k \quad (1.5)$$

En esta última expresión f representa el factor de fricción y α la relación de área real de contacto contra el área aparente de contacto. Existen diversas técnicas para cuantificar los factores adimensionales involucrados en los modelos. En la literatura (Fereshteh-Saniee, 2004) se reporta que una de las más técnicas más efectivas es la prueba de compresión con anillos, en la que una probeta anular con un orificio de diámetro inicial se somete a compresión axial y se observa la variación de la dimensión del diámetro interior. Con ellos y diversas expresiones analíticas es posible relacionar la variación con el factor de fricción cortante en el experimento. La relación entre el factor de fricción y el coeficiente de fricción se expresa como:

$$\mu = \frac{m}{2} \quad (1.6)$$

Para la aleación de aluminio (AlCu₅PbBi) empleada en las simulaciones de este trabajo y el sistema de herramientas-lubricante los valores convertidos empleando la relación 1.6:

Tabla 1.2: Lubricantes para extrusión inversa (Barisic, 2005).

Lubricante	μ
Hidrolubricación	0.17
Aceite soluble	0.15
Estearato de Zinc	0.1
Molibdeno	0.05
Vaselina	0.03

Para el modelo de extrusión combinada el valor del factor de fricción es de 0.13. Abaqus® emplea el modelo Coulomb para definir las propiedades del contacto de superficies y forzar a que la herramienta no penetre en el material.

1.7 Velocidad y temperatura de extrusión

La velocidad a la que se lleva a cabo la deformación en un proceso de conformado mecánico es una variable importante que se encuentra en estrecha correspondencia con la carga necesaria para producir el flujo plástico de un metal debido al endurecimiento que experimenta el material. Por otra parte la velocidad provoca una variación de temperatura a lo largo del proceso, que a su vez se encuentra influenciada por:

- La temperatura inicial del material
- La generación de calor por trabajo de deformación
- La generación de calor por fricción entre el material y las herramientas
- La transferencia de calor del material extruido

Los productos extruidos se enfrían con mayor rapidez a velocidades de extrusión más bajas; cuando este efecto es pronunciado, se presenta un aumento real de la presión de extrusión a través del recorrido del vástago debido al aumento del límite de cedencia del material a medida que se enfría. La consecuencia es que se requieran velocidades de extrusión elevadas para aleaciones de alta resistencia cuando se extruyen en caliente, ya que en este caso, aumenta el efecto de la alta velocidad de extrusión en el enfriamiento del material. Sin embargo si se aumenta la velocidad del vástago, se incrementa la presión de extrusión por el aumento en la temperatura desarrollada debido a que la velocidad de deformación aumenta proporcionalmente con la velocidad de extrusión y la generación de calor es proporcional al trabajo de deformación. Aumentando aproximadamente diez veces la velocidad de extrusión, el incremento de presión requerida es de alrededor del 50% (Parkins, 1970). Cuando se trabaja en frío debe incorporarse el efecto de endurecimiento por deformación que se traduce en un aumento de la carga de deformación a velocidades mayores y la disminución del esfuerzo de cedencia por el incremento de la temperatura.

En general, la selección de velocidades de extrusión y temperatura adecuada se realiza mediante tanteos para cada aleación. Para una presión de extrusión se puede obtener una relación de extrusión más elevada empleando una temperatura más alta. Para una temperatura determinada, es posible una mayor relación de extrusión trabajando a presión más elevada.

En el diagrama mostrado una situación crítica ocurre cuando la velocidad de extrusión es infinita debido a que no existe disipación del calor generado por deformación. A velocidades más bajas es mayor la disipación de calor y aumenta la relación de extrusión admisible para una temperatura determinada de precalentamiento.

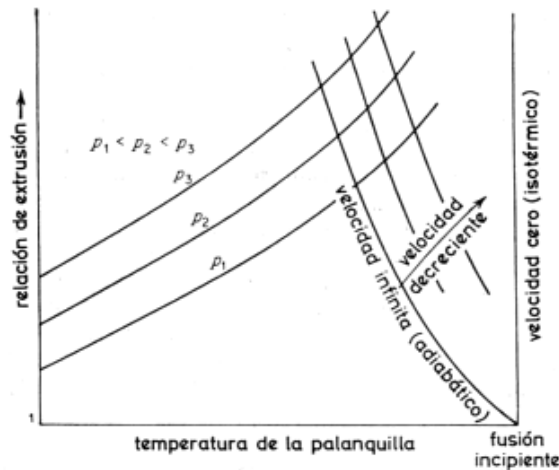


Figura 1.11: Interdependencia de temperatura, presión y velocidad de extrusión (Dieter, 1970).

El intervalo de extrusión en que se puede operar corresponde a la región que queda debajo de las curvas de presión constante y velocidad de extrusión. En la *tabla 1.3* se muestran la temperatura y la velocidad de salida del producto durante un proceso de extrusión directa:

Tabla 1.3: Parámetros característicos para extrusión de aleaciones de aluminio (Dieter, 1984).

Aleación	Tipo	Temperatura del material [°C]	Velocidad de salida [m/min]
2014-2024	Tratable térmicamente	420-450	1.5-3.5
5083,5086,5456	No tratable térmicamente	440-460	2.0-6.0
7001	Tratable térmicamente	370-415	0.5-1.5
7075, 7079	Tratable térmicamente	300-460	0.8-2.0
7049, 7150	Tratable térmicamente	300-440	0.8-1.8

1.8 Flujo del material durante la extrusión

El flujo del material durante la extrusión debe estudiarse debido a que:

- El perfil de velocidades ofrece información sobre el desplazamiento, la rotación y velocidad de las partículas del material (Totten, 2003).
- Se observan regiones de menor velocidad, conocidas como zona muerta, que incrementan las cargas de extrusión.
- Está relacionado con los esfuerzos que se presentan en el material.
- La alteración de las condiciones de contacto, de transferencia de calor o geométricas se aprecian en él.

- En la simulación por elementos finitos del proceso de extrusión la selección de una malla (espacio discretizado) adecuada, se traduce en el éxito de la solución del modelo y la exactitud de los resultados (Jean, 2000)

Analizar el flujo del material durante un proceso de extrusión significaría teóricamente obtener información de cada partícula del material durante el desplazamiento que ocurre para el conformado. Sin embargo obtener dicha información dentro de un contenedor de extrusión en el que la temperatura y presión son elevadas y realizar una medición es extremadamente difícil. Debido a ello, es posible extruir materiales de menor resistencia a la del aluminio o material en estudio, tales como parafina, plastilina o plomo con una carga mucho menor y observar mediante una malla trazada previamente en la sección longitudinal, la deformación que se produce (*figura 1.12*).

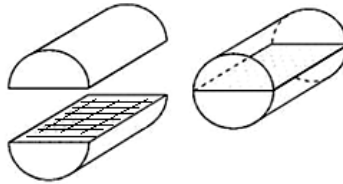


Figura 1.12: Partición en el material para el estudio del flujo de extrusión.

Una problemática común cuando se emplea dicha técnica es que para relaciones de extrusión superiores a 3 (para extrusión directa) ó 0.65 (para extrusión inversa), la malla se distorsiona de tal manera que se pierde la información. Una cuestión adicional es que para observar un modelo material durante las primeras etapas donde aun no se ha establecido el flujo, es necesario detener el proceso y observar la malla.



Figura 1.13: Modelo material en cera para visualización de flujo de extrusión (Totten, 2006).

Durante un proceso de extrusión directa de sección sólida, la velocidad del flujo en la región central es mayor lo que significa que se establece la zona muerta en la región más lejana del centro fluyendo a una velocidad mucho menor.

Desde el punto de vista práctico, el análisis en estado estacionario es una idealización debido a que el flujo en dicho estado requiere un tiempo infinito para establecerse. Los procesos de extrusión en frío están caracterizados por un flujo de material cuasi-estacionario durante la etapa central del proceso, en la formación de una zona muerta y el inicio de la penetración del punzón en el material generan un rápido aumento de los esfuerzos en las herramientas y el establecimiento de un valor de la carga de extrusión que por lo general se mantiene hasta la última etapa del proceso en la que se incrementa debido a que las partículas de la zona muerta son obligadas a fluir por el avance del punzón.

La diferencia entre el perfil de velocidad que se presenta entre un proceso de extrusión en frío y uno en caliente es que, durante la extrusión en frío las condiciones de lubricación permanecen más tiempo, sin embargo durante la extrusión en caliente, que se realiza en muchas ocasiones sin lubricación, los esfuerzos cortantes entre la pared de la matriz y el material distorsionan el perfil de velocidad como se muestra en la *figura 1.14*, provocando que la malla establecida en la sección longitudinal del material se pierda por la deformación cortante.

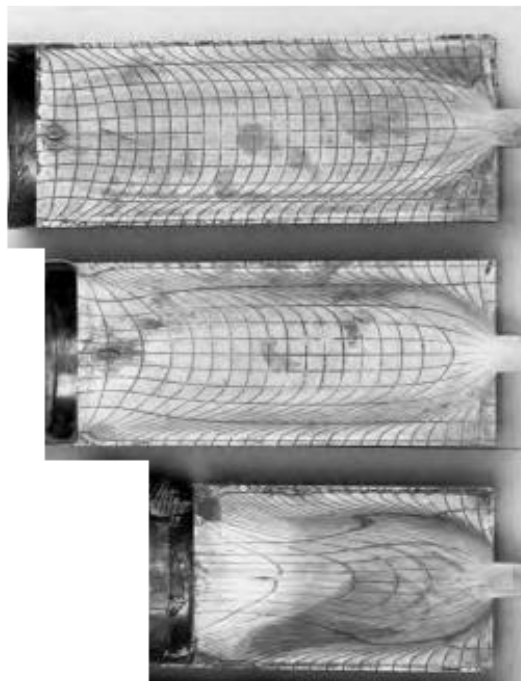


Figura 1.14: Perfil de velocidad en diferentes etapas de extrusión directa sólida en caliente de aluminio con un encamisado de CuCo_2 como lubricante. $\Phi_{\text{contenedor}}=110\text{mm}$, $\Phi_{\text{material}}=106.5\text{mm}$, $\theta=450^\circ\text{C}$, $V=32\text{mm/s}$ (Bauser, 2006).

Para evitar dicha pérdida, Valberger (Totten, 2003) desarrolló un método de contraste que consiste en observar el flujo introduciendo otro material mediante barrenos realizados a la muestra en 2 direcciones perpendiculares (*figura 1.15*) y se estudia el flujo del material reconstruyendo el patrón generado tras la deformación.

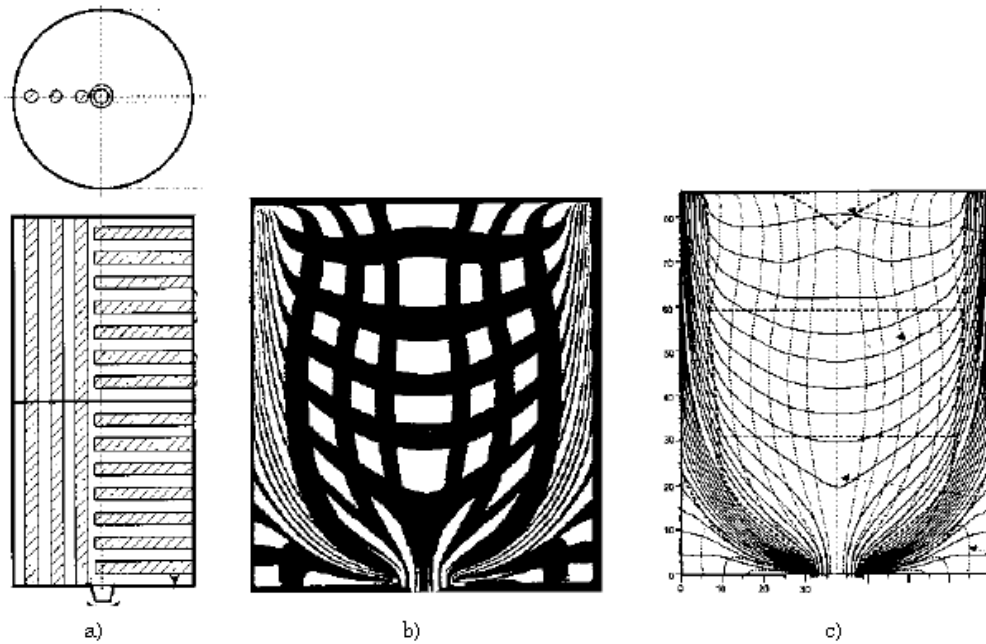


Figura 1.15: Determinación del perfil del flujo en un sólido parcialmente extruido a) Diagrama de inserción de material de contraste b) Patrón de deformación original c) Patrón reconstruido (Totten, 2006).

Algunos autores (Frisch y Thomsen, 1975) han sugerido que el endurecimiento por deformación en el metal provoca variaciones significativas en el perfil de velocidades y que la velocidad de extrusión pueda ser un factor que altere la geometría de la zona muerta.

La influencia del ángulo α sobre el flujo plástico del material durante un proceso de extrusión directa se aprecia en la *figura 1.16*. Aunque matrices con ángulo rectos suelen producir un incremento significativo en la carga necesaria de extrusión, ciertos materiales se extruyen utilizando dados rectos, debido al flujo del material con la zona muerta se produce una superficie brillante y satinada.

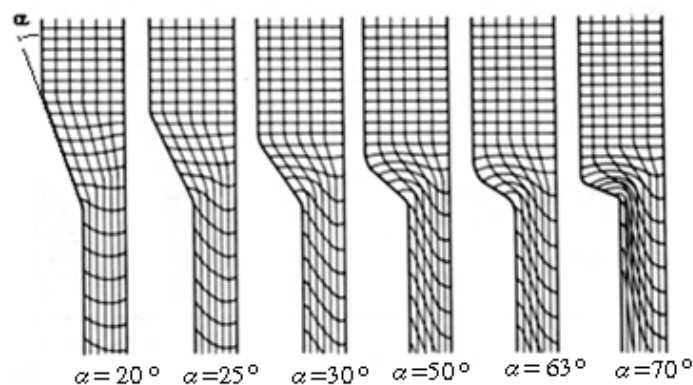


Figura 1.16: Flujo de un material durante extrusión directa con diferentes aberturas (α) (Lange, 1985).

La influencia de la geometría de la matriz (extrusión directa) o el punzón (extrusión inversa), modifica las condiciones de contacto del flujo del material con las herramientas, influyendo así sobre la presión de extrusión.

Bajo condiciones de fricción mínima entre la matriz y el material, el flujo que se presenta exhibe una zona localizada de deformación muy cercana a la región de contacto a la salida del dado de extrusión (1.17a). Sin embargo cuando se presentan condiciones de fricción entre el material y el dado o el punzón en el caso de extrusión inversa, el flujo en dirección radial se restringe debido al esfuerzo cortante en la zona provocando un incremento en la dimensión de la región estacionaria o zona muerta (1.17b), este tipo de flujo ocurre a menudo durante el proceso de extrusión con lubricación de metales y aleaciones como bronce-plomo, α -latón, plomo y cobre con recubrimiento de grafito como lubricante.

Si la extrusión se lleva a cabo en condiciones de fricción elevada entre el material y la pared del contenedor (1.17 c), el esfuerzo cortante en la pared provocará variaciones significativas en la velocidad de las partículas cercanas a la pared, y se observará que la región central del material fluye a mayores velocidades que el resto del material, dicha condición es característica en cobres de una sola fase y de la mayoría de las aleaciones de aluminio. Finalmente cuando la fricción que se incrementa a lo largo de la extrusión y se presenta una diferencia de temperaturas entre el centro y del exterior del material, la zona muerta es mucho mayor que la presente en otras condiciones. Este flujo es característico de proceso de extrusión en caliente de aleaciones de latón ($\alpha+\beta$) (1.17d)

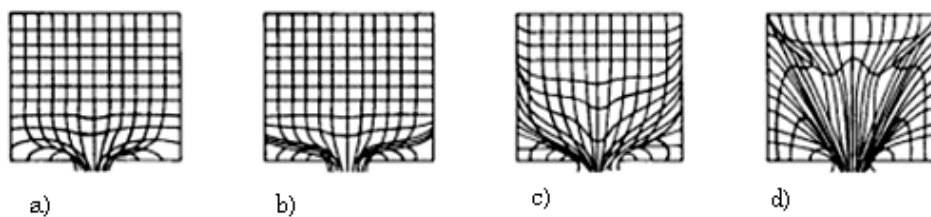


Figura 1.17: Patrones de flujo de un material durante el proceso de extrusión inversa sólida: (ASM, 2005).

Para el proceso de extrusión inversa, dos situaciones de flujo pueden ocurrir:

1.-Si las partículas experimentan un desplazamiento radial en comparación con su posición original, se puede establecer que hay deslizamiento del material, lo que se traduce en un menor desgaste la herramienta.

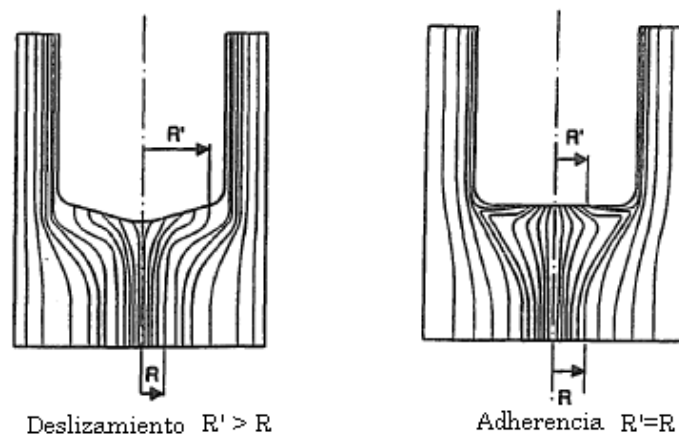


Figura 1.18: Situaciones de flujo sobre el punzón en extrusión inversa hueca (Bennani, 1994).

2.-Si el material se adhiere durante el avance del punzón no habrá diferencia en la dirección radial de las partículas desde el inicio del avance de la herramienta, aunque experimente un cambio a través del proceso. Lo anterior implica que las regiones cercanas a la superficie del punzón donde existe contacto no deslicen y provoquen un desgaste elevado de la nariz del punzón.

El desarrollo de los programas de elemento finito ha provocado que los modelos materiales hayan perdido el auge que experimentaron puesto que permiten realizar mediciones del proceso (esfuerzos, deformaciones, expansiones superficiales) sin recurrir a técnicas que eleven el costo y el tiempo de diseño de un proceso. Una de las etapas fundamentales del método consiste en seleccionar la forma en que se desea discretizar un espacio, esto podría considerarse como la forma en que se genera una malla sobre un modelo material.

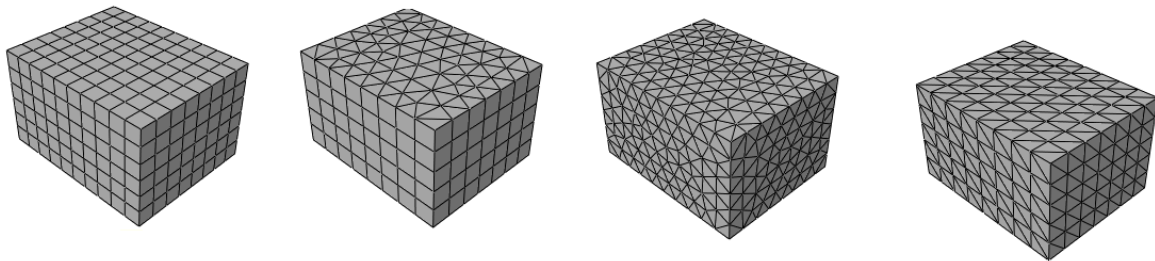


Figura 1.19: Diferentes mallas para una misma región.

Existen 5 clasificaciones de los métodos (Frey, 1999) con los que es posible discretizar una región; en cuyo caso la malla que se genera está conformada de una serie de elementos (elementos finitos) definidos por las posiciones de los nodos y la forma en que estos se unen (conectividad) y se citan a continuación:

- Método manual o semi-automático
- Método paramétricos (mapeo)
 - Interpolación algebraica
 - Basado en solución de ecuaciones diferenciales
- Método de descomposición de dominios
 - Descomposición por bloques
 - Descomposición espacial
- Método de creación de elementos/inserción de puntos
- Método constructivo

1.9 Equipos utilizados para extruir metales

La mayoría de los procesos de extrusión en aluminio se llevan a cabo en prensas hidráulicas las diferencias principales para un proceso de extrusión inversa son:

- Se utilizan punzones de mayor longitud para generar secciones más largas.
- Se extruye a mayores velocidades

De acuerdo a la dirección en que se mueve el vástago pueden clasificarse como

- Horizontales: En ellas el material reposa directamente sobre el cuerpo de extrusión, por lo que la parte inferior del material dentro de la cámara se enfriará más rápidamente y la deformación no será simétricamente uniforme, esto puede evitarse si se precalienta la cámara de extrusión. Las prensas horizontales se utilizan para la mayoría de las extrusiones comerciales de barra y tubo. En la actualidad hay alrededor de una docena de prensas en Europa (Bauser, 2006) capaces de desarrollar entre 75000 y 100000 [KN], y que poseen la capacidad de fabricar secciones transversales de hasta 800 [mm].
- Verticales: Ofrecen una mayor facilidad de alineación entre el vástago del punzón y el material, así como mayores velocidades de producción; sin embargo se requiere de una nave de gran altura para albergar las prensas y se requieren plataformas con desniveles para piezas extruidas muy largas. Las prensas verticales producirán un enfriamiento uniforme del material en el cuerpo de extrusión con lo que es posible obtener una deformación simétrica uniforme. En términos de capacidades generalmente se encuentran en el rango de 300 a 1000[Ton].

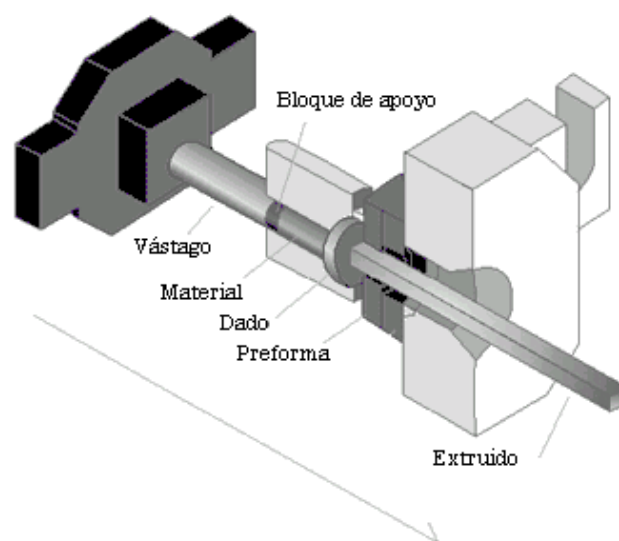


Figura1.20: Representación de un prensa horizontal para extrusión directa (Bauser, 2006).

Capítulo 2

Fundamentos del formado de metales

2.1 Esfuerzo-deformación

Se puede definir el esfuerzo la respuesta de un medio continuo a las solicitaciones aplicadas. Las fuerzas externas que pueden actuar sobre el cuerpo se pueden dividir entre fuerzas de superficie y fuerzas de cuerpo que actúan sobre la masa.

El análisis de un volumen diferencial cúbico de un cuerpo que se halle en equilibrio y sujeto a solicitaciones externas, indica la presencia de esfuerzos en el material que pueden reducirse a 3 componentes por arista dando como resultado 18 componentes bajo distintas combinaciones de esfuerzos. Realizando un balance de fuerzas en el equilibrio, esta cantidad se reduce a la mitad de componentes. El conjunto de esas 9 componentes que representan los esfuerzos definen el estado de esfuerzos, es decir, de las reacciones del cuerpo a las solicitaciones externas. La expresión matemática del estado de esfuerzos es:

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

Donde σ_{ij} representa un tensor de 2º orden y se conoce como tensor de esfuerzos de Cauchy. Existen ciertas direcciones en que ciertas componentes (esfuerzos cortantes) tienen valores nulos. En esas direcciones conocidas como direcciones principales, los esfuerzos $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ se conocen como esfuerzos principales. La magnitud de los esfuerzos principales puede ser determinada por la ecuación:

$$\sigma_p^3 - I_1\sigma_p^2 + I_2\sigma_p - I_3 = 0 \quad (2.2)$$

Donde los coeficientes I_1, I_2, I_3 , se conocen como invariantes, debido a que su valor es independiente del sistema coordenado elegido. El valor de los invariantes se puede calcular como:

$$I_1 = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33} \quad (2.3)$$

$$I_2 = (\sigma_{11}\sigma_{22} + \sigma_{22}\sigma_{33} + \sigma_{33}\sigma_{11}) + [(\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2 + \tau_{23}^2)] \quad (2.4)$$

$$I_3 = \sigma_{11}\sigma_{22}\sigma_{33} + 2\tau_{12}\tau_{13}\tau_{23} - (\sigma_{11}\tau_{23}^2 + \sigma_{22}\tau_{13}^2 + \sigma_{33}\tau_{12}^2) \quad (2.5)$$

Cabe mencionar que la componente esférica del tensor de esfuerzos no influye en la cedencia, matemáticamente se expresa como:

$$\sigma_H = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}}{3} \quad (2.6)$$

La deformación se define como el cambio de forma provocado por la aplicación de una carga. Cuando transcurre la deformación en un cuerpo sólido, los puntos que lo conforman experimentan un determinado desplazamiento. La deformación por tanto se mide a través de estos desplazamientos, pero es necesario excluir los efectos del cuerpo rígido tal como la traslación y rotación pura.

2.2 Modelos analíticos de la región plástica

La curva esfuerzo-deformación obtenida por carga a tensión uniaxial, se utiliza ampliamente para obtener información sobre la resistencia mecánica de los materiales. En el ensayo de tracción, se somete una probeta del material a una fuerza de uniaxial y se miden simultáneamente los alargamientos correspondientes. En metales sometidos a tensión, se presenta estricción durante las últimas fases de la prueba, por lo tanto la carga requerida para continuar la deformación disminuye. La forma de la curva de fluencia, desde el punto de carga máxima hasta la fractura, depende de la velocidad de estricción local, esto varía en función de la capacidad del material para endurecerse por deformación y es por ello que la curva en esta región no es lineal. Si la medida de la deformación está basada en medidas instantáneas, la curva obtenida se conoce como curva real de esfuerzo-deformación, mientras que si se obtiene con referencia a las dimensiones originales de la pieza se genera la curva de ingeniería de esfuerzo-deformación:



Figura 2.1: Comparación entre la curva esfuerzo-deformación de ingeniería y la curva correspondiente esfuerzo real-deformación real

(Dieter, 1975).

La teoría de plasticidad ofrece una descripción del comportamiento de los materiales en la zona de deformación en la que la ley de Hooke ya no es válida. En la región plástica, se presenta deformación permanente al retirarse la carga, y no existe una relación lineal entre los esfuerzos y las deformaciones como ocurre con la deformación elástica. En el tratamiento matemático del conformado plástico de los metales se requiere un análisis a grandes deformaciones.

Se han planteado diversos modelos analíticos, aunque describir de forma rigurosa el comportamiento de los metales en esas condiciones resulta complejo. Una expresión de gran utilidad es la curva potencial válida para la región de fluencia plástica hasta la carga máxima que fue planteada por Hollom en 1944 y se expresa como:

$$\sigma = k \cdot \varepsilon^n \quad (2.7)$$

donde n es el exponente de *endurecimiento*, k es el coeficiente de *deformación* y donde σ y ε son las reales. Si el exponente de endurecimiento $n=0$, el comportamiento representa un sólido perfectamente plástico y con $n=1$, un comportamiento perfectamente elástico. Para la mayoría de los metales el valor de n se encuentra entre 0.1 y 0.5. Algunos valores característicos para diversos metales y aleaciones se encuentran en la *tabla 2.1*:

Tabla 2.1: Valores característicos de k y n (Kammerer, 2007).

Material	k [N/mm ²]	n
C10	800	0.24
Ck10	730	0.22
15Cr3	850	0.09
16MnCr5	810	0.09
20MnCr5	950	0.15
Al99.5	110	0.24
AlMg3	390	0.19
CuZn4	880	0.33

Una representación logarítmica doble de esfuerzo y deformación reales hasta la carga máxima que se halle en concordancia con los datos será una línea recta como se muestra:

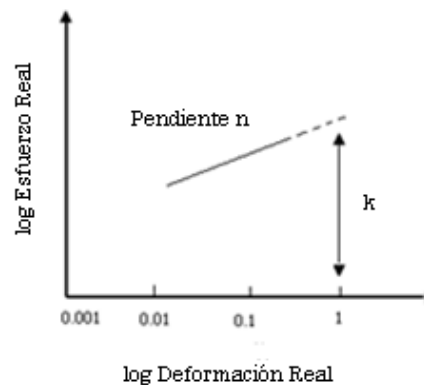


Figura 2.2: Representación logarítmica doble de la curva esfuerzo-deformación.

La pendiente de esta línea es n y k es el esfuerzo real para $\varepsilon=1$. Por lo tanto es posible expresar el exponente de endurecimiento como:

$$n = \frac{d(\log \sigma)}{d(\log \varepsilon)} = \frac{d(\ln \sigma)}{d(\ln \varepsilon)} = \frac{\varepsilon}{\sigma} \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad (2.8)$$

Por lo que la tasa de endurecimiento puede expresarse como:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = n \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.9)$$

Así mismo la velocidad de deformación puede expresarse con la siguiente relación matemática:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d[\ln(\frac{L}{L_0})]}{dt} = \frac{1}{L} \frac{dL}{dt} = \frac{v}{L} \quad (2.10)$$

Otros modelos que consideran la velocidad de deformación pueden expresarse:

$$\sigma = k \cdot \varepsilon^n \cdot \dot{\varepsilon}^m \quad (2.11)$$

La medida del esfuerzo y la deformación es de especial interés cuando se trata de esfuerzos multiaxiales, por ello en simulaciones de extrusión en caliente, también es utilizada la expresión de Norton-Hoff:

$$\sigma = k \cdot \varepsilon^n \cdot \dot{\varepsilon}^m \cdot e^{\frac{\beta}{T}} \quad (2.12)$$

$$\beta = \frac{Q}{R} \quad (2.13)$$

Donde n y m son constantes del material, y donde si $n=0$, no existe dependencia con el endurecimiento por deformación, Q es la energía de activación del material y R la constante universal de los gases. Un modelo que es igualmente válido para la prueba de torsión y para el proceso de extrusión en caliente que ha sido planteado por Zenner y Hollom se expresa como:

$$\sigma = k e^{n \cdot \ln Z}; Z = \dot{\varepsilon} \cdot e^{\frac{Q}{RT}} \quad (2.14)$$

Para el proceso de extrusión las formas básicas de la curva esfuerzo-deformación que se emplean para describir el comportamiento del material son:

- a) Rígido plástico sin endurecimiento: Este comportamiento es característico de los procesos en caliente donde el material recristaliza y no se considera el endurecimiento por deformación, por lo que al rebasar el esfuerzo de cedencia el nivel de esfuerzos permanece constante. Debido a que la deformación plástica gobierna el proceso se desprecia la región elástica.
- b) Rígido plástico con endurecimiento: En este caso se considera que el material presenta un endurecimiento por deformación, aunque la deformación elástica se desprecia.

- c) Elástico-plástico con endurecimiento: Este modelo considera la deformación elástica y una región plástica con endurecimiento.

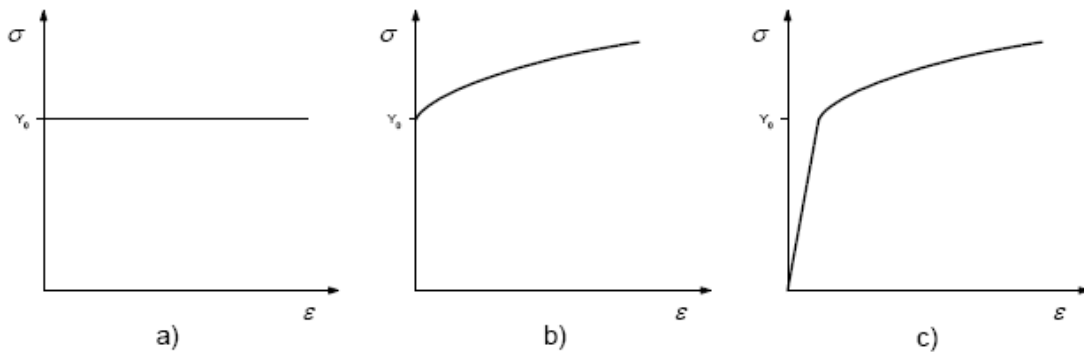


Figura: 2.3: Relaciones de esfuerzo-deformación: a) Rígido plástico sin endurecimiento, b) rígido plástico con endurecimiento y c) elástico-plástico con endurecimiento.

2.3 Mecanismos de deformación

El movimiento de dislocaciones es el principal mecanismo de deformación plástica. La aplicación de fuerzas durante el proceso provoca campos de esfuerzos que actúan sobre éstas. Si el esfuerzo resultante de la aplicación de las sollicitaciones alcanza cierta magnitud, existirá un desplazamiento. Las dislocaciones son generadas durante el proceso de solidificación que se produce desde la etapa de fundición.

El deslizamiento que puede ocurrir en un arreglo cristalino puede ser estimado por la densidad de dislocaciones, la magnitud de los patrones de dislocaciones y la cantidad de vectores de Burgers. Con respecto a la densidad de dislocaciones, la deformación plástica suele incrementar el valor en varios órdenes de magnitud (de 10^7 a 10^{12} [dislocaciones/cm²] para metales recocidos) dando como consecuencia variaciones en la distribución de la densidad de dislocaciones en el material, lo cual provoca que el movimiento de dislocaciones a través de regiones de alta densidad deba llevarse a cabo con un incremento en la carga requerida para su movimiento. Este fenómeno provoca, a niveles macroscópicos, un endurecimiento debido a la deformación plástica en el material; adicionalmente en metales policristalinos, los límites de grano y la diferencia de orientación entre los planos de deslizamiento de cada grano actúan obstaculizando su movimiento. El endurecimiento por deformación o trabajo en frío es un proceso industrial importante que se utiliza para endurecer metales y aleaciones que no responden a los tratamientos térmicos (Dieter, 1975).

La extrusión en caliente del aluminio se realiza a temperaturas características de entre 300 y 500°C, dependiendo del punto de fusión de la aleación de aluminio en el proceso. En este estado el material se caracteriza por una baja resistencia al movimiento de dislocaciones ya que en los procesos de conformado en caliente, la temperatura del proceso es superior a la temperatura de recristalización del material, lo que implica que el endurecimiento por

deformación es eliminado por los mecanismos de recuperación y recrystalización que transcurren a la temperatura de deformación, puesto que la velocidad de recrystalización es mayor a la velocidad de deformación. Debido a ello, existe una relación entre la velocidad de deformación, la resistencia al flujo plástico y la temperatura, la *figura 2.4* ejemplifica la influencia de estos parámetros, cuya validez se encuentra dentro de las curvas comprendida entre los puntos 1-2, ya que la pendiente de la recta de la región elástica se modifica también; la correspondencia exacta entre estos parámetros dependerá de las condiciones de deformación adicionales y de la microestructura del material.

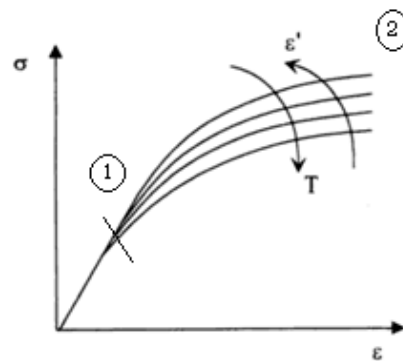


Figura 2.4: Curvas generales de esfuerzo deformación dependientes de la temperatura y la velocidad de deformación (Totten, 2003).

El límite de formado de metales durante la deformación plástica está determinado por la pérdida de ductilidad del material durante el proceso. De esta manera, cuando se desea relacionar las propiedades del material con su microestructura se deben tener en cuenta las etapas de conformado a las que ha sido sometido. Dentro de este contexto un factor importante es la anisotropía por deformación. Los procesos de deformación plástica, ya sea en frío o en caliente, producen un alineamiento de los ejes cristalográficos de los granos en una orientación preferente y en componentes extruidas con una microestructura fuertemente orientada, por lo tanto las propiedades mecánicas serán mayores en la dirección longitudinal donde los granos se hallan alargados o bien en la dirección perpendicular (transversal) y dependerá del fibrado mecánico (orientación microestructural). A menor tamaño de grano, mayor resistencia mecánica, pues las dislocaciones tendrán menor movilidad al estar impedido su movimiento.

Los límites de grano *anclan* las dislocaciones impidiendo su movimiento, un policristal resistirá mejor la tracción que un monocristal. La formación de una fuerte orientación preferente produce anisotropía en las propiedades mecánicas aunque cuando los granos individuales de un metal son anisótropos en sus propiedades mecánicas, y están ordenados de forma arbitraria en el segregado policristalino, las propiedades mecánicas a nivel macroscópico tienden a ser isotropas. Sin embargo la alineación de los granos, introduce nuevamente anisotropía en las propiedades mecánicas (Totten, 2003).

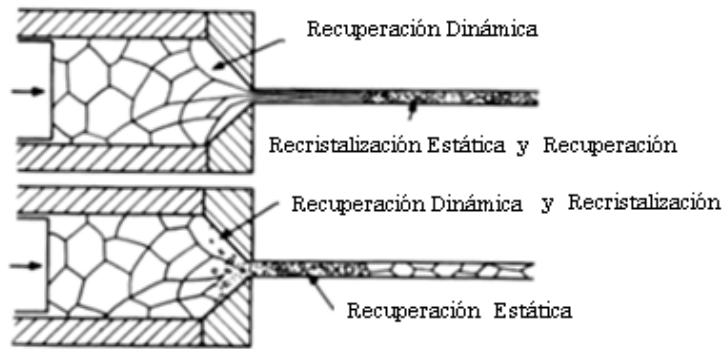


Figura2.5: Extrusión directa: Recuperación estática y dinámica (Lange, 1985).

El estudio microestructural de los perfiles extruidos a menudo presenta grandes proporciones de heterogeneidad en las secciones transversales. Esto aplica tanto para el tamaño y forma de los granos, como para la densidad de dislocaciones.

2.4 Criterios de fluencia

La predicción de las condiciones en las que empieza la deformación plástica cuando un material está sometido a un determinado estado de esfuerzos, es un aspecto importante del campo de la plasticidad. Las expresiones matemáticas que tienen como objetivo predecir bajo que estados de esfuerzos se producirá la fluencia dependiendo de ciertas propiedades del material a ser deformado se conocen como criterios de fluencia. Algunos de los criterios más empleados se describen a continuación.

2.4.1 Teoría del esfuerzo cortante máximo.

El criterio de fluencia de Tresca, establece que la cedencia aparecerá cuando el máximo esfuerzo cortante alcance un valor crítico. Se puede expresar como:

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (2.15)$$

donde σ_1 y σ_3 son los esfuerzos principales y. Para un ensayo a tracción $\sigma_1 = \sigma_0$ y $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ por lo que:

$$\tau_0 = \frac{\sigma_0}{2} \quad (2.16)$$

Es por tanto posible expresarlo de la siguiente forma:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_0 \quad (2.17)$$

El criterio de Tresca está en concordancia con los resultados experimentales; sus precisiones están desplazadas hacia la seguridad y se utiliza ampliamente para el diseño con metales dúctiles.

2.4.2 Criterio de von Mises

De acuerdo con este criterio la fluencia, se producirá cuando la diferencia entre los esfuerzos principales expresados por el segundo invariante del tensor de esfuerzos alcance un valor crítico. Matemáticamente se expresa como:

$$J_2 - k^2 = 0 \quad (2.18)$$

donde:

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (2.19)$$

Para conocer el valor de k, para un ensayo de tracción uniaxial, $\sigma_1 = \sigma_0$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, por lo que en el criterio de von Mises:

$$\sigma_{eficaz} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2.20)$$

En la siguiente figura se muestra la región de influencia de los criterios de cedencia sobre el plano octaédrico. Las líneas representan el límite elástico y las superficies externas predicen falla.

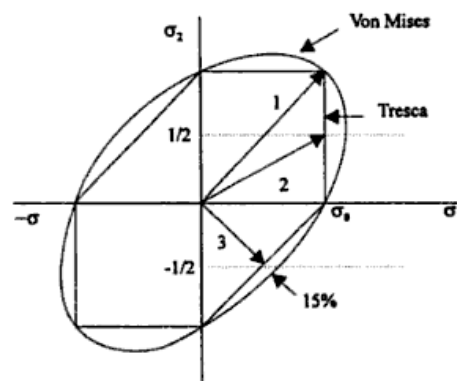


Figura 2.6: Representación de los criterios de von Mises y Tresca en el plano octaédrico (Sheppard, 1999).

Capítulo 3

Modelos y planteamientos del proceso de extrusión inversa

3.1 Evolución en el estudio de la extrusión

El cálculo de la carga de extrusión es uno de los parámetros más importantes a determinar. Diversas variables influyen en el cálculo de la carga necesaria para producir la extrusión:

- Tipo de extrusión
- Relación de extrusión
- Temperatura de trabajo
- Velocidad de deformación
- Condiciones de fricción en la matriz y en las paredes del cuerpo de extrusión.

En la *figura 3.1* se muestra la relación característica entre la carga requerida para la extrusión inversa contra el recorrido del punzón a lo largo del proceso:

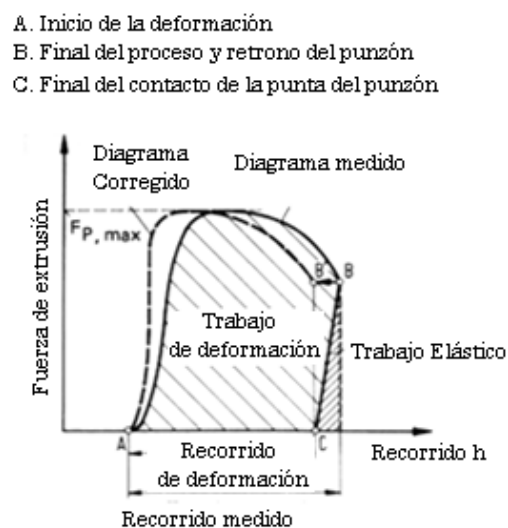


Figura 3.1: Diagrama característico de fuerza de extrusión contra el recorrido del vástago en extrusión inversa de latas (Lange, 1985).

La fuerza se incrementa rápidamente a su valor máximo en el que se mantiene durante la etapa de deformación mostrando un decaimiento paulatino al final del proceso.

La primera porción está caracterizada por la deflexión elástica del sistema material-herramientas y la creciente influencia del endurecimiento por deformación y la segunda parte, está caracterizada por la reducción del volumen del material que participa en el proceso de deformación, como se puede observar en el diagrama en la parte final existe una recuperación

elástica, debido a que en dicha etapa el punzón se retira y es sujeto a carga de tensión producto de la recuperación en las paredes de la lata o tubería.

Existen diversos modelos que han sido planteados para conocer la carga requerida para llevar a cabo el proceso de extrusión inversa. Algunos de ellos se han empleado tradicionalmente para obtener valores límites entre los que es posible ubicar la carga necesaria mediante la suposición de campos de velocidad que satisfagan la condición de incompresibilidad. Otros modelos se basan en análisis de equilibrio de fuerzas durante el proceso en diferentes regiones del material con lo que se obtienen valores sobre la carga requerida de extrusión.

Recientemente se han desarrollado modelos que permiten obtener la distribución de esfuerzos en el material y las herramientas. Dentro de éstos los modelos y simulaciones numéricas han cobrado especial importancia debido a que es posible conocer la forma en que los esfuerzos se comportan a lo largo del proceso

A continuación se presentan los fundamentos de los modelos analíticos planteados para la determinación de la carga. Posteriormente se muestran los modelos experimentales y las simulaciones numéricas más recientes que se han establecido para comprender y optimizar el proceso de extrusión inversa.

3.2 Método del límite superior

Este método es utilizado principalmente para obtener límites, de las cargas involucradas para llevar a cabo un proceso de conformación plástica. Para ello se requiere proponer un campo admisible de velocidades y esfuerzos con los que se pueda determinar la fuerza del proceso. Se pueden formular los dos teoremas del método del límite como sigue:

Teorema del límite inferior: La cantidad de trabajo realizada por las fuerzas de superficie con las velocidades propuestas es mayor o igual a la cantidad de trabajo desarrollado por cualquier otro campo de esfuerzos estadísticamente admisible. Un campo de esfuerzo es admisible si cumple con las ecuaciones de equilibrio, satisface las condiciones de frontera y no viola los criterios de cedencia. Este se emplea para el análisis del comportamiento elástico.

Teorema del límite superior: La cantidad de trabajo realizada por las fuerzas de superficie con las velocidades propuestas es menor o igual a la cantidad de trabajo realizado por las mismas causas correspondientes a cualquier otro campo admisible de velocidades. Un campo de velocidades es admisible si cumple con las condiciones de frontera y satisface la ecuación de incompresibilidad. Se aplica para el estudio de la deformación plástica.

Al resolver problemas prácticos se desea conocer el máximo requerimiento de carga así como la mínima fuerza que pudiera ser necesaria para realizar un proceso determinado. Sin embargo por cuestiones de facilidad y utilidad es más frecuente realizar el cálculo empleando el teorema del límite superior, ya que además se puede considerar que la fuerza requerida calculada representa una buena aproximación a los requerimientos que se puedan generar en el proceso.

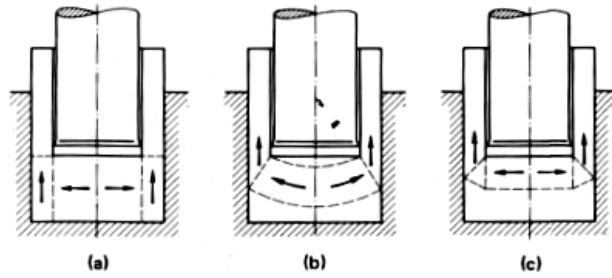


Figura 3.2: Campos de velocidad admisibles. a) Campo paralelo, b) Campo esférico, c) Campo combinado (Lange, 1985).

3.3 Método del planchón

El Método del planchón desarrollado por Dipper en 1949 (Lange, 1985) consiste en aislar un volumen diferencial del material durante la deformación plástica y realizar un balance de fuerzas en dicho elemento con un sistema de referencia asociado. El desarrollo del método produce una o varias ecuaciones diferenciales que involucran los esfuerzos desarrollados, y que, cuando se consideran las condiciones de frontera y los criterios de fluencia se obtiene la solución de las ecuaciones asociadas. La determinación de la carga de extrusión usando el método del planchón requiere del balance de fuerzas en dos secciones del material durante la extrusión inversa. Se establece la suposición de que el material es forjado axialmente entre el punzón y la superficie inferior del dado, y posteriormente, radialmente entre el material por debajo del dado y la pared del contenedor. La zona (1) es de deformación axial y la zona (2) es de deformación radial.

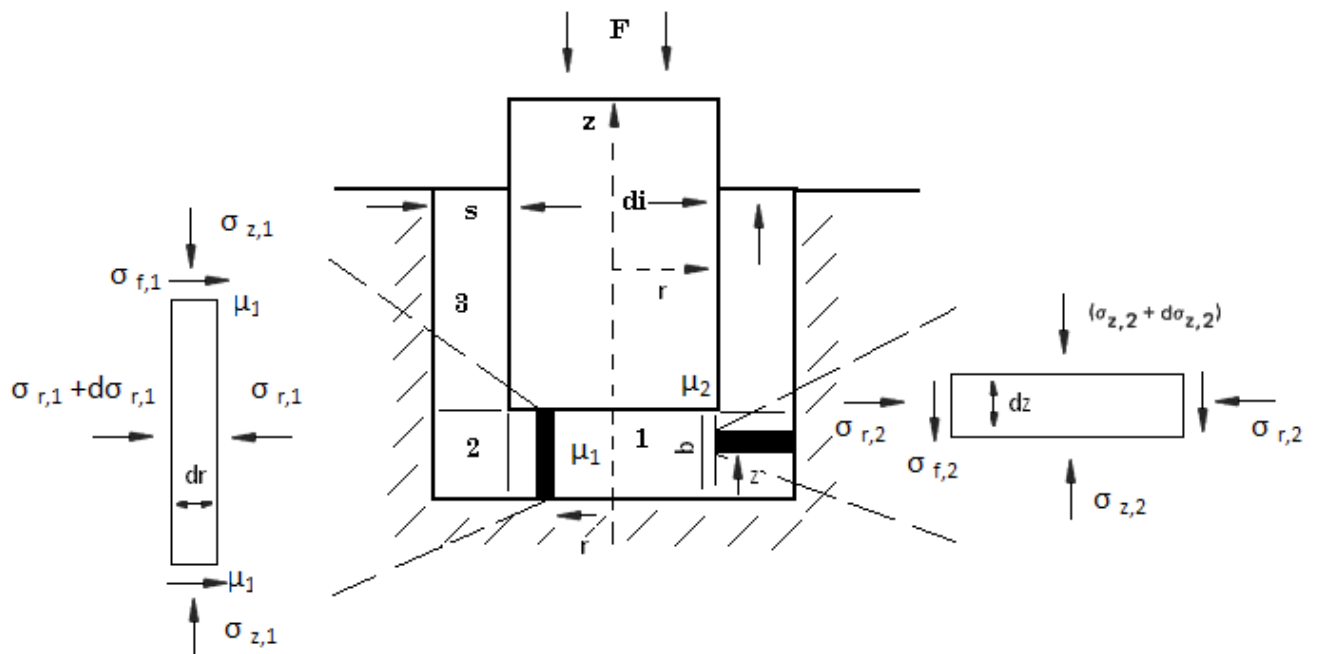


Figura 3.3: Balance de fuerzas en extrusión inversa como forja libre doble.

El balance de fuerzas calculado en la región anular (2) basado en un cilindro de *radio promedio* y donde el radio inicial es r_o (figura 1.4):

$$\left(\frac{d_i+s}{2}\right) \quad (3.1)$$

$$\left[-\sigma_{z,2} + (\sigma_{z,2} + d\sigma_{z,2})\right] \frac{\pi}{4} (d_o^2 - d_i^2) = 2\mu\sigma_{f,2} d_z \frac{(d_i+s)}{2} 2\pi \quad (3.2)$$

Considerando a s como el espesor de pared:

$$(d_i + 2s) = d_o \quad (3.3)$$

Desarrollando:

$$d\sigma_{z,2} \left(\frac{\pi}{4} ((d_i + 2s)^2 - d_i^2)\right) = 2\mu\sigma_{f,2} d_z \cdot (d_i + s) \quad (3.4)$$

Simplificando:

$$d\sigma_{z,2} \cdot s = 2\mu\sigma_{f,2} dz \quad (3.5)$$

Integrando con la condición de frontera: $\sigma_{z,2} = 0$ cuando $z = b$ debido a que cuando se alcanza la distancia $z=b$ la *región (1)* ya no ejerce presión radial sobre la *región (2)*.

$$\sigma_{z,2} = \frac{-2\mu\sigma_{f,2}}{s} (b - z) \quad (3.6)$$

El valor promedio del esfuerzo sobre el *área* A_2 :

$$\sigma_{z,2,m} = -\mu\sigma_{f,2} \frac{b}{s} \quad (3.7)$$

De acuerdo con el criterio de Tresca:

$$\sigma_{r,2,m} = \sigma_{z,2,m} - \sigma_{f,2} = \sigma_{f,2} \left(1 + \mu \frac{b}{s}\right) \quad (3.8)$$

Para la *zona (1)*, la ecuación de equilibrio de fuerzas queda:

$$\left[-\sigma_{r,1} + (\sigma_{r,1} + d\sigma_{r,1})\right] \pi r b = 2\mu_1 \sigma_{f,1} \pi r dr \quad (3.9)$$

$$d\sigma_{r,1} * b = 2\mu\sigma_{f,1} dr \quad (3.10)$$

Empleando la condición de frontera $\sigma_{r,1} = \sigma_{r,2,m}$ para $r = d_i/2$: (Cambio de presión radial promedio de la *zona (2)* a la *zona (1)*):

$$\sigma_{r,1} = \frac{-\mu\sigma_{f,1}}{b} \left(\frac{d_i}{2} - r\right) + \sigma_{r,2,m} \quad (3.11)$$

La presión radial promedio sobre el *área* $\left(\pi \frac{d_1^2}{4}\right)$ esta dada por:

$$\sigma_{r,1,m} = -\frac{1}{3} \mu\sigma_{f,1} \frac{d_i}{b} + \sigma_{r,2,m} \quad (3.12)$$

Sustituyendo $\sigma_{r,2,m}$ de la ecuación del criterio de Tresca:

$$\sigma_{r,2} = \sigma_{r,1,m} + \sigma_{r,2,m} = -\frac{1}{3}\mu\sigma_{f,1}\frac{d_i}{b} - \sigma_{f,2}\left(1 + \mu\frac{b}{s}\right) \quad (3.13)$$

Por lo que:

$$\sigma_{z,m} = \sigma_{r,m} - \sigma_{f,1} = \sigma_{f,1}\left(1 + \frac{\mu_1}{3} * \frac{d_i}{b}\right) - \sigma_{f,2}\left(1 + \frac{\mu b}{s}\right) = \textit{Presión de Extrusión} \quad (3.14)$$

Si se multiplica el valor de la presión de extrusión por el área correspondiente a la sección donde el mayor diámetro del punzón hace contacto con el material:

$$\textit{Fuerza de extrusión} = \sigma_{z,m} * \left(\frac{\pi * d_i^2}{4}\right) \quad (3.15)$$

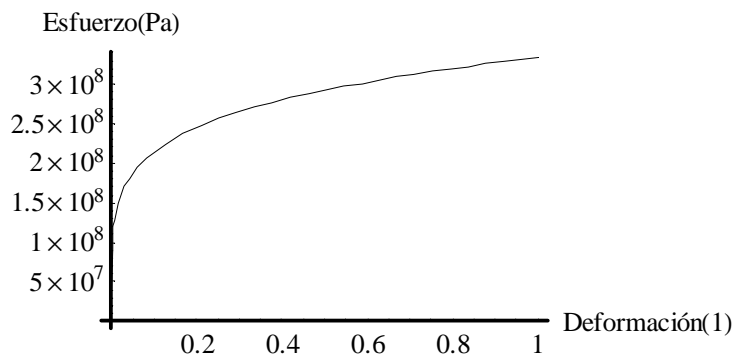
Los valores de σ_f son evaluados de la curva de fluencia correspondiente, en particular de modelo que se utilice para describir la región plástica, los valores de ε representan los valores de deformación correspondientes a los esfuerzos:

$$\sigma_{f,1}: \varepsilon_1 = \ln\left(\frac{h_0}{8s}\right) \quad (3.16)$$

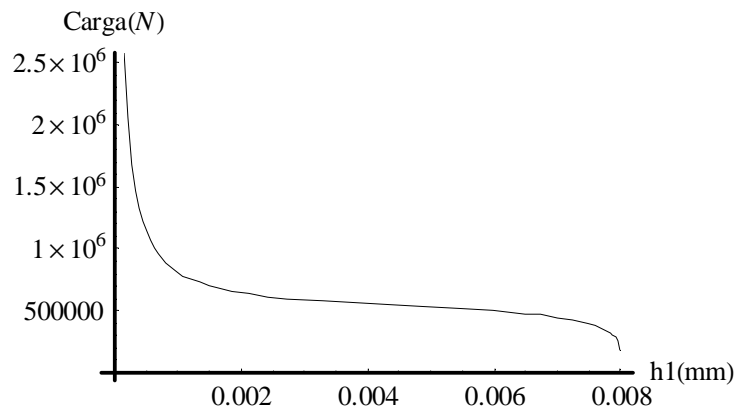
$$\sigma_{f,2}: \varepsilon_t = \varepsilon_1\left(1 + \frac{d_i}{8s}\right) \quad (3.17)$$

Si se utiliza la ecuación 3.14 que involucra la curva de fluencia de la región plástica y los valores dados por 3.16 y 3.17 es posible representar la carga de extrusión en función de una sola variable ya sea la altura final de tocho, el coeficiente de fricción o la altura inicial del material, obteniendo el comportamiento de la carga necesaria para el proceso con la variación de dichos parámetros. Las curvas se obtuvieron para el modelo de extrusión inversa planteado por Barisic empleando la paquetería Mathematica®.

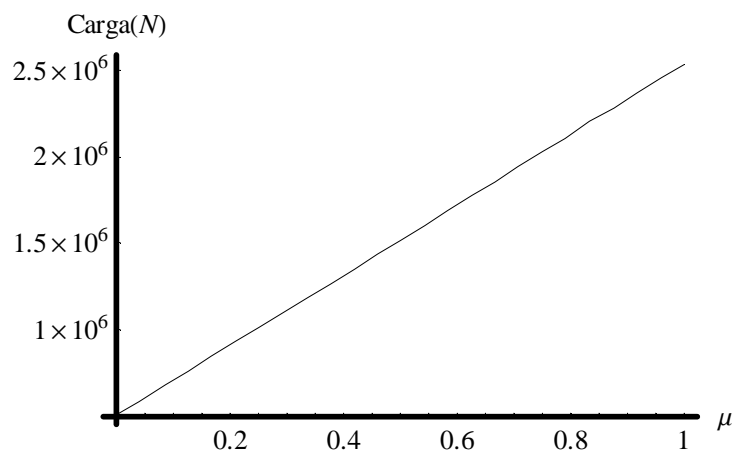
La curva que define la región se expresa por la ecuación de Hollom $\sigma = 334.33 \cdot \varepsilon^{0.192}$ para la aleación AlCu₅PbBi:



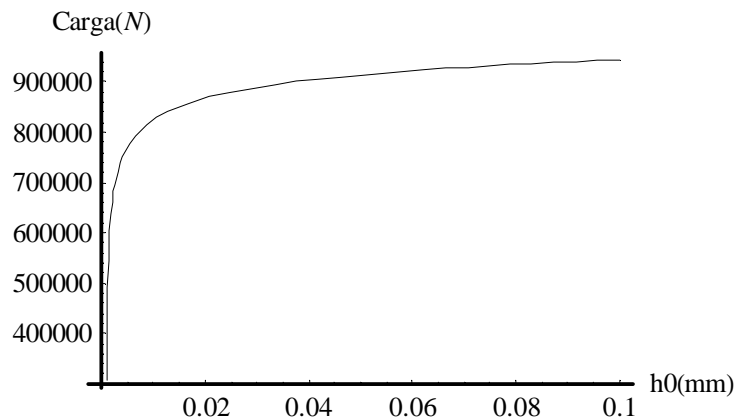
Si se grafica la *carga* en función de la *altura final* (h_1) o espesor del fondo (b), se observa que la carga decae cuando la altura final se aproxima a la longitud inicial y que se vuelve exponencial cuando se lleva el punzón hasta un espesor cercano a cero (para $\mu=0.15$):



Al realizar una curva de *carga* en función del *coeficiente de fricción* se observa un incremento lineal:



Por último se observa que la *carga de extrusión* se incrementa rápidamente entre (0,0.02) de la *altura inicial* y creciendo a tasas menores después de dicho valor:



La curva describe un comportamiento logarítmico, lo que implica que en el proceso de extrusión inversa la carga máxima teóricamente no se ve afectada de forma significativa por la altura inicial del tocho.

3.4 Modelos experimentales para la simulación de extrusión inversa

La experimentación es una parte fundamental en el desarrollo de los procesos y de la maquinaria de extrusión, ya que el proceso es complejo como anteriormente se ha explicado para obtener una aproximación matemática para el estudio metalúrgico y geométrico, esto es especialmente notable para los procesos combinados de extrusión.

Sin embargo, la necesidad de modelos más económicos que se adapten a los requerimientos cambiantes de la industria, ha hecho que los modelos se desarrollen a la par de las teorías reológicas o de plasticidad. Conforme los desarrollos tecnológicos hagan que de la obtención de un modelo analítico una actividad más complicada, las simulaciones numéricas cobrarán mayor importancia. Naturalmente la generación de estos modelos requerirá de la comprensión y experiencia de los procesos constructivos ya existentes.

A continuación se presentan algunos de los trabajos que se han desarrollado en los últimos años para estudiar los procesos de extrusión, con base en análisis experimentales de modelos materiales y de extensiones superficiales. Por otra parte se hace referencia a las herramientas que utilizan otros autores para simular a través del método de elemento finito, problemas de extrusión.

3.4.1 Método de extensión superficial en materiales blandos

Durante el proceso de extrusión inversa, las herramientas se someten a condiciones tribológicas severas los cuales provocan que la película de lubricante disminuya a lo largo del conformado de la pieza, hasta que eventualmente desaparece favoreciendo condiciones de soldadura por presión así como elevadas velocidades de desgaste en la matriz y en la superficie de presión del punzón, dando como consecuencia que el material se adhiera y el flujo se estacione en zonas de fricción elevada.

Con la finalidad de mostrar la influencia de éstas variables (fricción, variación del ángulo de entrada del punzón), Bennani *et al.* (1994) llevaron a cabo un experimento empleando modelos de parafina junto con simulaciones numéricas en FEM para corroborar los resultados. Ellos propusieron emplear cilindros coaxiales de cera de color contrastante alternados para verificar el flujo tras la deformación (*figura 3.4*)

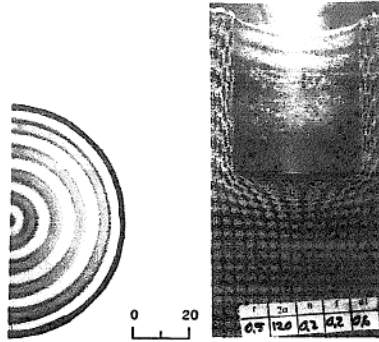


Figura 3.4: Modelo para la visualización del flujo empleando medios contrastantes (Bennani, 1994).

Adicionalmente se cuantificó la influencia del perfil geométrico de un punzón cónico-plano. Sin embargo debido a que las simulaciones se llevaron a cabo en paqueterías de versiones anteriores (Deform®), el flujo del material no muestra información clara sobre la existencia de regiones estacionarias, o sobre la deformación de la malla que ocurre en etapas no estacionarias del proceso, por ello el presente trabajo busca profundizar el análisis del flujo en las simulaciones empleando Abaqus 6.8®, y mostrar las posibilidades existentes para tal finalidad.



Figura 3.5: Modelo para la visualización del flujo empleando medios contrastantes (Bennani, 1994).

El estudio realizado se centró en las expansiones superficiales (*figura 3.6*) que se presentan bajo diversas condiciones de fricción y variación geométrica, manteniendo constantes las condiciones de lubricación. Donde el cálculo de la expansión de superficie (X) está dado por:

$$X = \frac{A_1 - A_0}{A_0} \quad (3.19)$$

donde A_0 y A_1 son las áreas inicial y final respectivamente como se muestra a continuación:

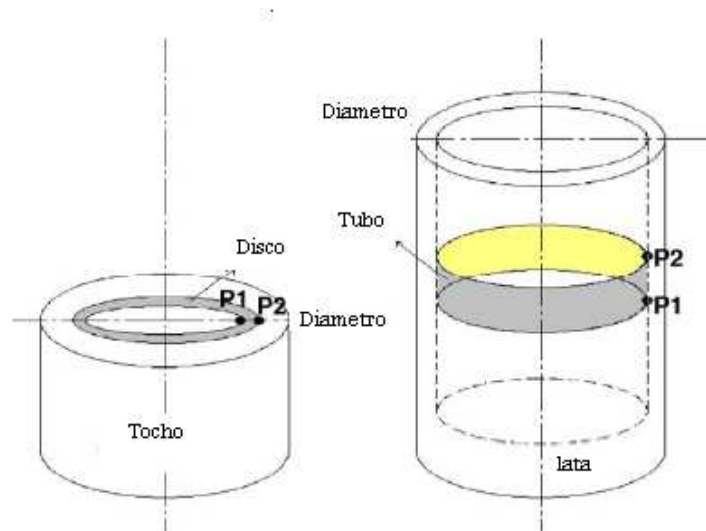


Figura 3.6: Representación esquemática de la expansión superficial.

En los modelos materiales que realizaron Bennani *et. al.* la longitud del tubo generado es limitada debido a que penetraciones mayores provocarían que la malla se distorsionara de tal forma que se perdería el contraste entre los materiales del modelo, esto suele ocurrir cuando se emplean modelos de cera. Sin embargo las conclusiones obtenidas señalan que la pérdida de lubricación así como el estancamiento del material en la región del punzón debe ser evitada para que el proceso pueda llevarse a cabo de forma satisfactoria.

3.4.2 Predicción de flujo con material de contraste

En análisis posteriores a los realizados por Bennani y Bay (1994), han conseguido realizar estudios de expansión superficial durante la extrusión inversa de aluminio introduciendo materiales de contraste dentro del material a extruir con propiedades mecánicas similares a las del material en cuestión. Esto representa una diferencia significativa con respecto a los modelos anteriores que pronosticaban el patrón del flujo en cera, parafina o plastilina y en general en material de propiedades mecánicas inferiores. La *figura 3.7* muestra el arreglo empleado por Uyyuru *et al.* (2008) para la visualización:

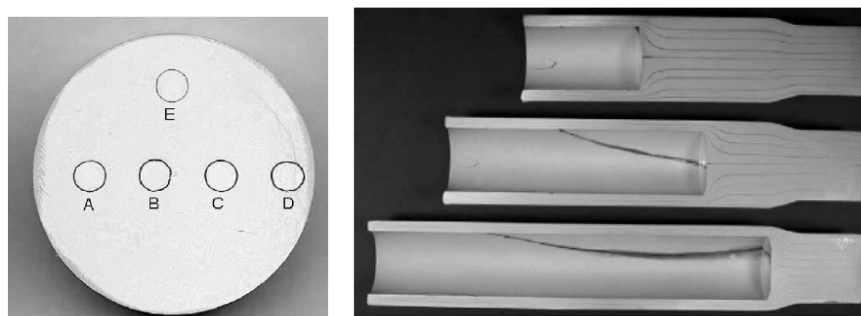


Figura 3.7: Material inicial y patrón del material de contraste (izquierda). Corte longitudinal de pieza de extruida en diferentes etapas (derecha).

Lo que se observa es el corte transversal de un cilindro de aluminio 2XXX (0.015% Cu) y un arreglo de círculos que se introducen en el material como tubos de pared delgada de la aleación de aluminio 6082, que por su alto contenido en cobre (1.0% de cobre) poseen un tono característico diferente al de la aleación del tocho. Esto permite que se realicen mediciones de la expansión superficial sobre el material de contraste sin afectar de forma significativa el comportamiento del conjunto a lo largo del proceso.

Uyyuru *et al.* midieron las expansiones superficiales encontrando concordancia entre los valores recabados experimentalmente y lo que las simulaciones numéricas predicen. Sin embargo, no se hace una descripción del modelo computacional que se utilizó para la simulación.

3.5 Simulaciones Numéricas para el Estudio de la Extrusión

Como se ha mencionado hasta ahora existen diversas técnicas para el cálculo de la carga para la extrusión inversa. Algunas de ellas son predicciones analíticas que establecen diversas condiciones o consideraciones para llevar al modelo matemático a un escenario más sencillo que ofrezca aun con ello buenas aproximaciones.

Los modelos más recientes generados por Svendsen *et al.* (2008) se han enfocado a entender el proceso de forma experimental con lo que se pretende optimizarlo sin embargo cada variación al modelo implica un costo por la manufactura y empleo del equipo de extrusión. Por ello las simulaciones numéricas ofrecen modelos más realistas y cuyos resultados pueden ser comprobados a través de la experimentación o bien de modelos analíticos a un menor costo y con una mayor eficiencia.

Como es de esperarse una nueva solución traerá consigo nuevas dificultades para su implementación, y tal cuestión ocurre en las simulaciones ya que durante la extrusión inversa la deformación del material es considerable y se hace necesario entender el fenómeno desde el punto de vista computacional.

Svendsen *et al.* han realizado simulaciones de extrusión directa en aluminio empleando Abaqus® proponiendo alternativas de mallado para lograr completar el proceso sin pérdida de información, y adicionalmente considerar el estancamiento de material en la zona muerta. La figura siguiente muestra el modelo axisimétrico que emplearon:

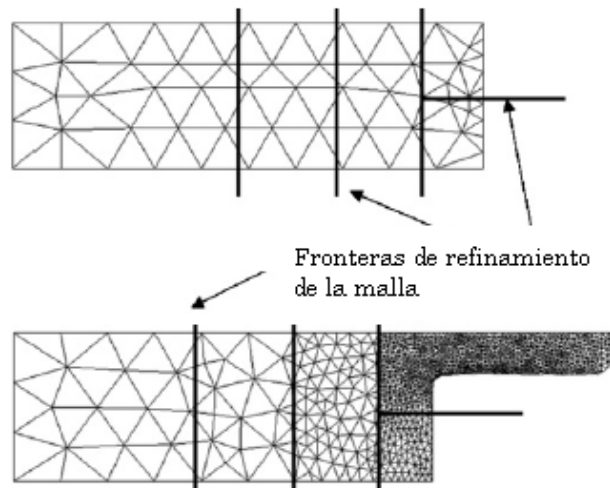


Figura3.8: Malla inicial y primeras etapas de mallado adaptativo propuesto por Svensen *et al.*

Debido a la distorsión de la malla, ocurre la penetración del material sobre la superficie de la herramienta lo cual deja de tener significado físico. Para solucionar este problema es necesario reparar la malla a lo largo del proceso o bien en etapas sucesivas y después continuar el análisis, esto se comentará más adelante con mayor detalle. Svendsen *et al.* optaron por realizar diversas particiones a lo largo de la sección del material y crear un mallado empleando elementos triangulares y un control de mallado adaptativo lagrangiano-euleriano (ALE) utilizando las capacidades del lenguaje Python® sobre el que se estructura Abaqus ®. En la *figura 3.9* se observa la penetración del material sobre la herramienta y las distorsiones de la malla.

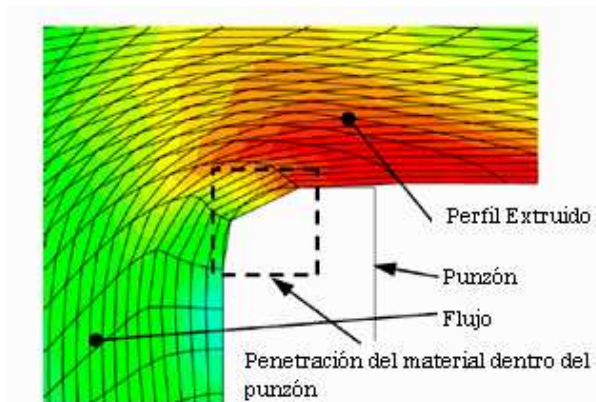


Figura3.9: Malla inicial y primeras etapas de flujo durante extrusión directa.

3.6 Técnicas de Remallado por Mapeo

Por otra parte, existen técnicas que varían la malla sólo durante una etapa. La técnica de mapeo de solución implica la extrapolación de los resultados de una malla distorsionada hacia una nueva malla con la definición que el usuario seleccione. Este proceso ocurre entre las

etapas de un análisis, por lo que el resultado es un poco más costoso desde el punto de vista computacional. (A. Pérez del Palomar y D. Bel, 2005)

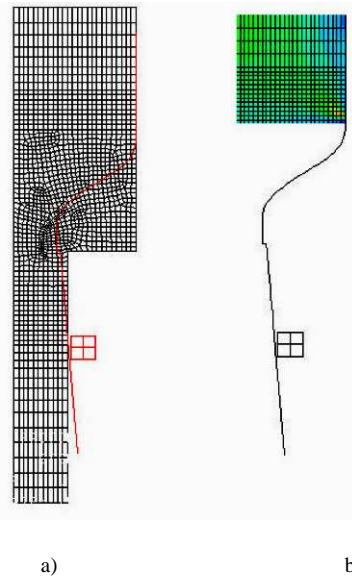


Figura 3.10: a) Malla de fondo con configuración de nodos b) Malla inicial para simular el proceso de extrusión directa.

En la *figura 3.10* se observa la malla de fondo que se empleará en una etapa posterior del proceso de extrusión, mientras que la *figura 3.10b*, muestra la malla inicial en la que ocurre la deformación hasta que la malla ya no es satisfactoria para continuar el proceso (esto puede deberse a una distorsión excesiva de los elementos o bien a que no existe una adecuada precisión en ciertas regiones del modelo). Esta técnica puede requerir múltiples mallas en etapas sucesivas para que el resultado converja.

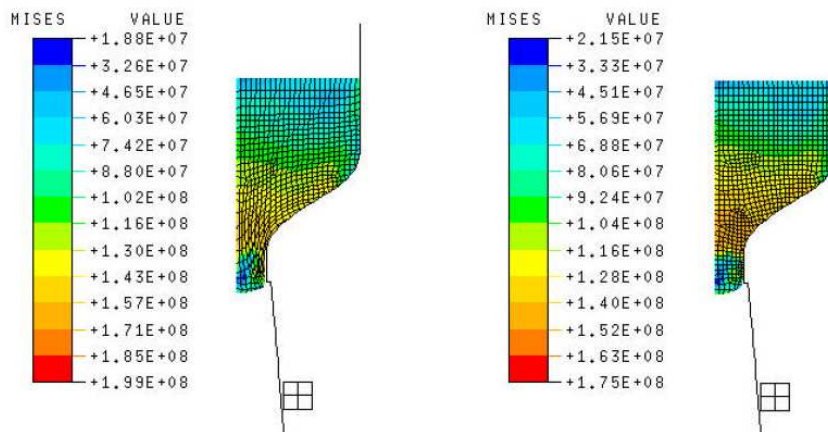


Figura 3.11: Paso intermedio antes del mapeo (izquierda), paso posterior al mapeo.

Capítulo 4

Modelos de extrusión inversa en Abaqus 6.8®

4.1 Modelo general

La construcción del modelo propuesto en Abaqus 6.8® comienza con la definición de la geometría de las herramientas (punzón, matriz, evector) y el material. Aprovechando la simetría de los elementos de la extrusión se construyó el modelo axisimétrico como una primera simplificación del análisis.

La geometría y las dimensiones que se emplearán están basadas en los experimentos realizados por Barisic (2004) para el caso de extrusión inversa.

4.1.1 Geometría del proceso de extrusión inversa

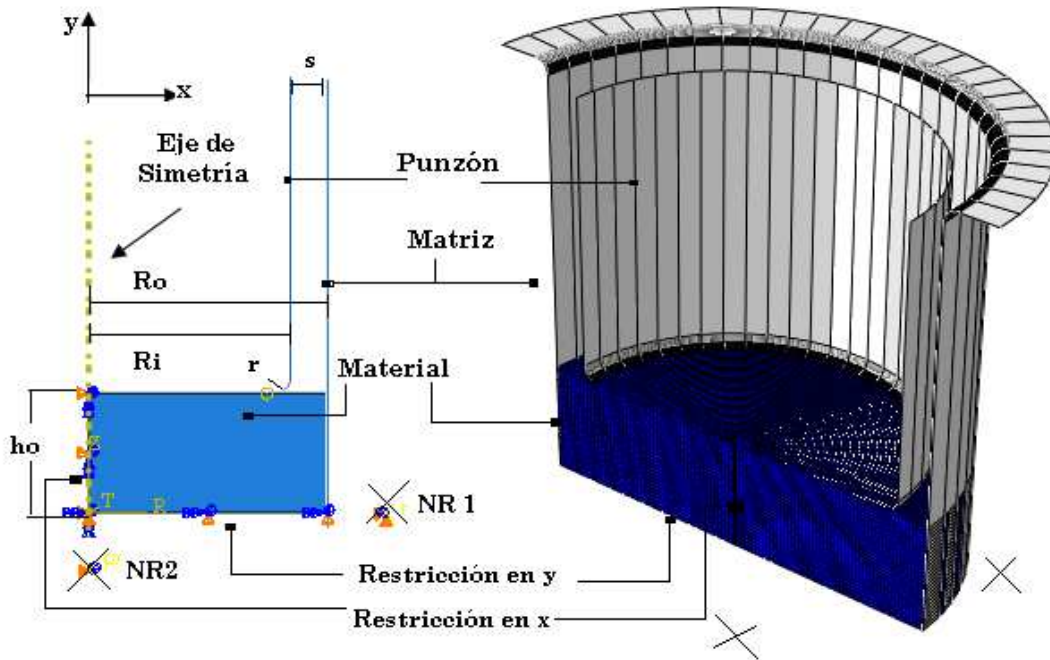


Figura 4.1: Representación del modelo axisimétrico; R_0 16mm, h_0 8mm, s 2.5mm, R_i 13.5mm, r 1mm. Relación de extrusión: 0.71

Como se mencionó en el *capítulo 1*, es posible simular el punzón y la matriz como elementos analíticamente rígidos o bien como deformables. Debido a que el costo computacional es

menor empleando un elemento rígido, se utilizarán así en el modelo general para posteriormente comparar diversas geometrías del punzón simulándolo como deformable. Tanto el punzón como la matriz están asociados a un nodo de referencia. Barisic *et al.* utilizaron un punzón plano para el desarrollo experimental, como se muestra en la *figura 4.1*.

4.1.2 Definición del material

La definición del material empleado para la simulación se describe a partir el modelo de Hollom para la aleación de aluminio AlCu₅PbBi. Los valores son introducidos a Abaqus® de forma tabular evaluando la ecuación en una hoja de cálculo.

$$\sigma = 334.33 \cdot \varepsilon^{0.192}$$

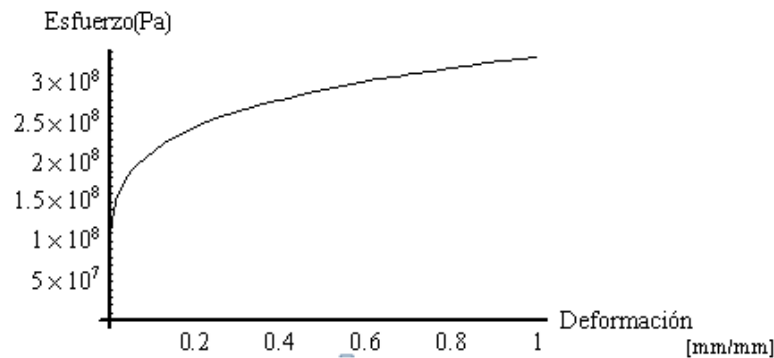


Figura 4.2: Curva de esfuerzo deformación del material AlCu₅PbBi en la región plástica.

Como se observa se presenta un comportamiento elástico-plástico con endurecimiento isotrópico. Las propiedades mecánicas y físicas empleadas en la definición:

Tabla 4.1 Propiedades físicas y mecánicas de la aleación AlCu₅PbBi

Densidad (ρ) [kg/m ³]	2800
Módulo de Poisson (ν) [1]	0.33
Módulo de elasticidad (GPa)	70
Resistencia a la fluencia (MPa)	150
Resistencia última a tensión (MPa)	280

El paquete Abaqus 6.8® dispone de una amplia variedad de modelos que describen el comportamiento de diferentes materiales sometidos a distintos tipos de pruebas. Las principales opciones consisten en elegir entre plasticidad independiente o dependiente de la velocidad de deformación (viscoplasticidad) y para la primera, entre endurecimiento isótropo o endurecimiento cinemático. El modelo de viscoplasticidad se usa para aplicaciones en las que se produzcan grandes velocidades de deformación, tales como casos dinámicos o de conformado rápido de metales. Este modelo emplea plasticidad independiente, debido a que

las pruebas fueron llevadas a cabo a una sola velocidad de deformación. Así mismo es posible introducir las propiedades térmicas del material y del proceso, sin embargo los análisis experimentales se consideraron isotérmicos.

4.1.3 Tipos de análisis

Dentro de Abaqus 6.8® existen diversos tipos de análisis (*steps*) que pueden ser ejecutados dependiendo del fenómeno que se estudia. Para un proceso determinado se debe seleccionar el tipo de análisis, el tiempo en el que se realiza y las características particulares de cada uno de ellos. La resolución del análisis generado en el ambiente gráfico de Abaqus CAE implica resolver sistemas matriciales y ya que es un método numérico (que se realiza a través de incrementos), la solución debe mantenerse con un error suficientemente pequeño como para no afectar el resultado global.

Para el análisis de extrusión es posible considerar:

- Proceso estático (Abaqus Standard®): Este proceso se emplea cuando los efectos inerciales pueden ser despreciados al igual que los efectos del material dependientes del tiempo tales como, fluencia lenta (*creep*) o visco-elasticidad. Los procesos estáticos dentro de Abaqus® poseen una variedad de controles para solucionar los problemas no lineales (tal como es el caso de la plasticidad) pero con costo de tiempo de procesamiento muy alto. La herramienta de remallado disponible en este paso se conoce como mapeo (*rezoning*) en donde se extrapola la solución de una malla deformada hacia una nueva.
- Proceso dinámico explícito (Abaqus Explicit®): Este análisis puede ser utilizado cuando los efectos inerciales no pueden ser despreciados o bien para procesos cuasi-estáticos. Una característica fundamental de éste son las herramientas de reducción de costo computacional entre las que se incluyen:
 - Escalamiento de velocidad: Esto significa que el tiempo del proceso puede ser reducido y por tanto la velocidad a la que se lleva a cabo incrementa. Al realizar esto se pueden presentar 2 errores:
 - Si la velocidad es incrementada demasiado los efectos inerciales cambiarán de forma drástica la respuesta del sistema. Por ello el incremento no debe ser excesivo.
 - El otro problema puede deberse a una definición del 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 incrementada es totalmente diferente a la del sistema original.

- Escalamiento de masa: Aumentar artificialmente la densidad por un factor f^2 , reduce el tiempo total (T) en T/f . Sin embargo incrementar la masa tiene el mismo efecto en las fuerzas inerciales que acelerar el proceso. Uno de los atractivos primordiales del escalamiento de masa es el hecho de que puede ser empleado en conjunción con modelos de material que consideren la velocidad de deformación.

Otra característica fundamental del análisis explícito es que es posible utilizar los métodos arbitrario y acoplado lagrangiano-euleriano para construir modelos más precisos que describan el modelo de extrusión.

En la simulación se comparará el análisis estático y dinámico con un tiempo de 0.5 [s] lo que implica una velocidad de 13.5 [mm/s] para el punzón.

4.1.4 Condiciones de contacto

La fricción y las condiciones de lubricación son variables primordiales en el flujo del material. En el modelo se imponen condiciones constantes de lubricación a lo largo del avance del punzón y entre la matriz y el material.

Para la aleación de aluminio (AlCu₅PbBi) empleada en el proceso de extrusión inversa en las simulaciones de este capítulo y el sistema de herramientas-lubricante los valores para el coeficiente de fricción son:

Tabla 4.2: Lubricantes para extrusión inversa, (Barisic, 2004)

Lubricación	μ
Hidrolubricación	0.17
Aceite Soluble	0.15
Estearato de Zinc	0.1
Molibdeno	0.05
Vaselina	0.03

Las propiedades de contacto se muestran en la *tabla 4.3*. Sin embargo los datos de carga experimental para la geometría planteada solo se encuentran para los coeficientes de fricción de 0.05 y 0.15 por lo que, aunque se presentará la variación de la fuerza de extrusión con respecto al coeficiente de fricción de la *tabla 4.2*, los valores de comparación con la literatura se referirán sólo a los dos coeficientes mencionados.

Tabla 4.3: Parámetros de contacto

Tipo de Interacción	Superficie-Superficie
Formulacion Mecánica	Contacto con fricción
Restricciones	Cuerpo Rígido en Herramientas
Coefficiente de Fricción	0, 0.03, 0.05, 0.1, 0.15, 0.17,1

4.1.5 Condiciones de frontera

En esta sección se definen los grados de libertad que se restringen para cada uno de los elementos de la simulación (punzón, matriz y material) ya que es necesario desplazar el punzón, (en una sola dirección y sin rotaciones) para que penetre dentro del material y que la matriz permanezca fija durante la deformación. Debido a que la simulación es axisimétrica, se imponen un par de condiciones de simetría al material, la *figura 4.1* muestra dichas condiciones:

- Matriz (empotramiento): Condición de no desplazamiento en x , y . Restricción de movimiento al nodo de referencia *NR 1*, y no rotación sobre z .
- Punzón (desplazamiento y rotación restringidos): Restricción a desplazarse en x y a rotar sobre z , aplicado al nodo de referencia *NR 2*.
- Punzón (desplazamiento): Movimiento a lo largo de y (*sentido negativo*) con una distancia total de 6.5mm y velocidad constante de 13.5mm/s.
- Material (desplazamiento restringido en x): Restricción de movimiento de la cara izquierda en la dirección x , ya que esta cara se encuentra sobre el eje de la pieza y no describe movimiento en dicha dirección.
- Material (desplazamiento restringido en y): La superficie inferior del material se restringe a desplazarse sobre el eje y , sólo se permite desplazamiento sobre el eje x . Esta condición simula el eyector debajo de la pieza.

4.1.6 Generación de malla

La generación de los nodos, elementos y conectividades que definen una malla implica ciertas elecciones. En el modelo general se consideran únicamente los métodos manuales o semiautomáticos (*sección 1.1.6*), y algunas variaciones como son:

- Tipo de elemento: Triangular o Cuadrilátero
- Número de elementos

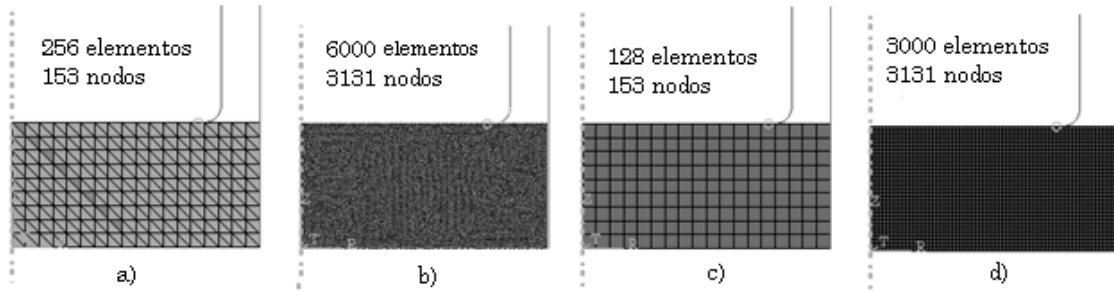


Figura 4.3: Mallas generadas por métodos semiautomáticos.

4.1.7 Resultados y visualización

Una vez que se selecciona la malla, se realizó el análisis, por lo que Abaqus® crea un archivo mediante líneas de comando (*input file*) del modelo gráfico que se ha construido. Así mismo analiza el modelo con las condiciones impuestas; el tiempo en que se obtiene una solución depende de ellas. Posteriormente una interfaz gráfica dentro del módulo de visualización permite obtener los valores numéricos de las variables de salida (que el usuario solicita) tales como desplazamientos nodales, fuerzas de reacción, velocidades, esfuerzos, entre otras y la geometría final del perfil extruido en diferentes etapas.

La *figura 4.4* muestra la distorsión que se presenta cuando se emplean las mallas de la *figura 4.3* propuestas una vez que se realiza el análisis del modelo. Como se observa ocurre la penetración de la herramienta aunque está se encuentra definida como analíticamente rígida y con condiciones de contacto de fricción entre superficies. En los resultados se muestra la distribución de esfuerzos en el material (mediante colores), sin embargo no se presentan sus correspondientes numéricos debido a que los análisis terminaron prematuramente por la distorsión de los elementos.

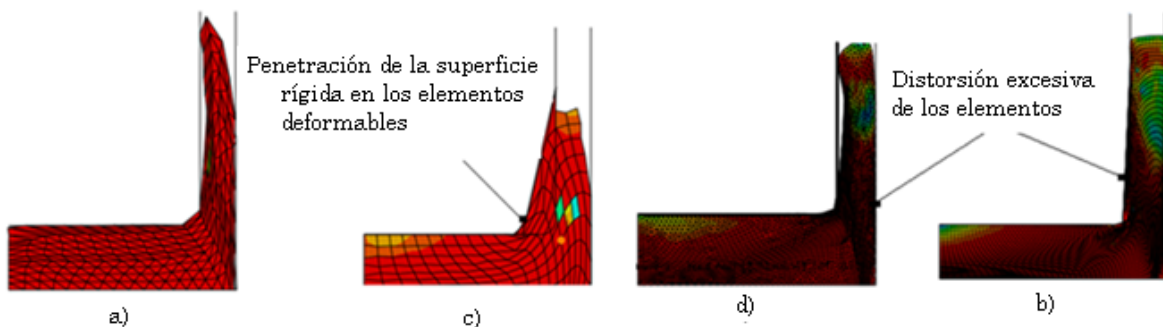


Figura 4.4: Perfiles extruidos con las mallas propuestas: Análisis Explícito, $\mu=0.15$.

El empleo de un método de remallado, con transferencia de valores entre una malla y otra, así como el empleo de los métodos de partición por bloques y aristas se hacen necesarios. A

continuación se aplican estos conceptos para mejorar la calidad y precisión de la malla con la finalidad de encontrar un modelo computacional que ofrezca un resultado aceptable (comparado con lo reportado en la literatura) y con el menor costo desde el punto de vista del tiempo de solución.

4.2 Técnicas de mallado y reparación de malla

Las técnicas de reparación de malla disponibles en Abaqus 6.8® se muestran a continuación y están clasificadas de acuerdo a:

- La capacidad para alcanzar un fin particular, ya sea precisión o control de distorsión.
- El impacto en la malla inicial: suavizando la transición de los elementos (*smoothing*) o bien, generando mallas múltiples adicionales.
- En que momento ocurre el remallado con respecto al tipo de análisis (*step*).

Tabla 4.4: Técnicas de remallado en Abaqus®

	Precisión	Control de Distorsión	Malla Única	Mallas Múltiples	Criterios:
Malla Adaptativa (Adaptive Lagrangian-Eulerian ALE)		√	√		A través de los pasos (steps) del proceso
Remallado Adaptativo (Adaptive Remeshing)	√			√	En etapas separadas del proceso.
Mapeo de Solución (Mesh to Mesh solution mapping)		√		√	Entre diferentes análisis

4.2.1 Mapeo de solución

Si se desea utilizar un análisis estático para simular la extrusión es necesario utilizar las capacidades existentes dentro del ambiente Abaqus Standard® para reparación de malla, al que se conoce como mapeo de solución (*rezoning*). Debido a que este método implica generar una nueva malla es necesario extrapolar o interpolar los resultados de un análisis anterior con el que no fue posible terminar el proceso por la distorsión de la malla a una nueva definición de la misma.

Los pasos necesarios para ejecutar este proceso se enlistan a continuación:

- Generar el modelo mediante un análisis estático dentro del ambiente Abaqus Standard®.
- Imponer las condiciones mencionadas para el modelo general.
- Solicitar la generación de los archivos de reinicio (.res).
- Someter el modelo a análisis.

Las mallas generadas con elementos triangulares son más útiles cuando se desea remallar mediante un cambio en la conectividades debido a que la paquetería proporciona mejores herramientas para ello y por tanto se prefiere utilizar la *malla b* de la *figura 4.3* para un análisis estático.

El análisis no puede ser realizado completamente empleando la malla inicial. A continuación se muestran algunas etapas del proceso y el campo de esfuerzos asociados al material:

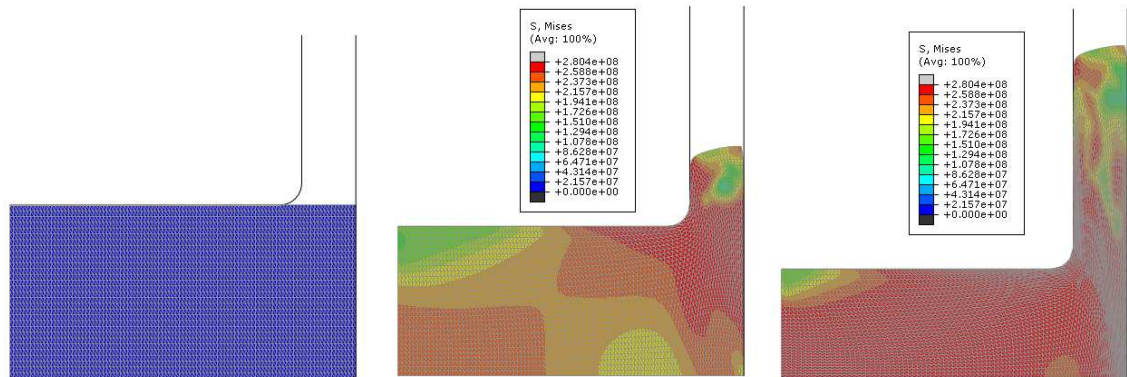


Figura 4.5: Etapas del proceso mediante análisis estático (malla b).

Se remalla entonces en un análisis adicional mediante las siguientes acciones:

- Importar la malla deformada (*orphan mesh*) y modificar el tipo, número o conectividades de los elementos.
- Aplicar nuevamente las condiciones de frontera y las asignaciones de material correspondientes.
- Modificar el archivo mediante líneas de comando y solicitar el mapeo de solución (*map solution*) del análisis anterior hacia la nueva malla en un paso o incremento determinado para extrapolar el estado de esfuerzos y los desplazamiento nodales de la malla deformada.
- Generar el archivo de líneas de comando para la nueva malla (*input file*).

El ambiente gráfico de Abaqus CAE no permite evaluar dicha función, por lo que se utilizan las capacidades de Python® a través de la interfaz Ms-Dos para realizar el análisis empleando ejecución remota.

En la *figura 4.6* se muestra el proceso de mapeo en la parte deformable del modelo. El análisis estático con la *malla b* no puede continuar después de 98 incrementos, lo que representa un avance del punzón de 2.5 [mm] o un 38% del avance total y como se observa los elementos han sufrido grandes distorsiones. La nueva malla generada posee al inicio del recorrido del punzón la distribución de esfuerzos final del análisis anterior, aunque al cambiar la topología, dimensión y número de los elementos la distribución de esfuerzos se encuentra definida en forma diferente.

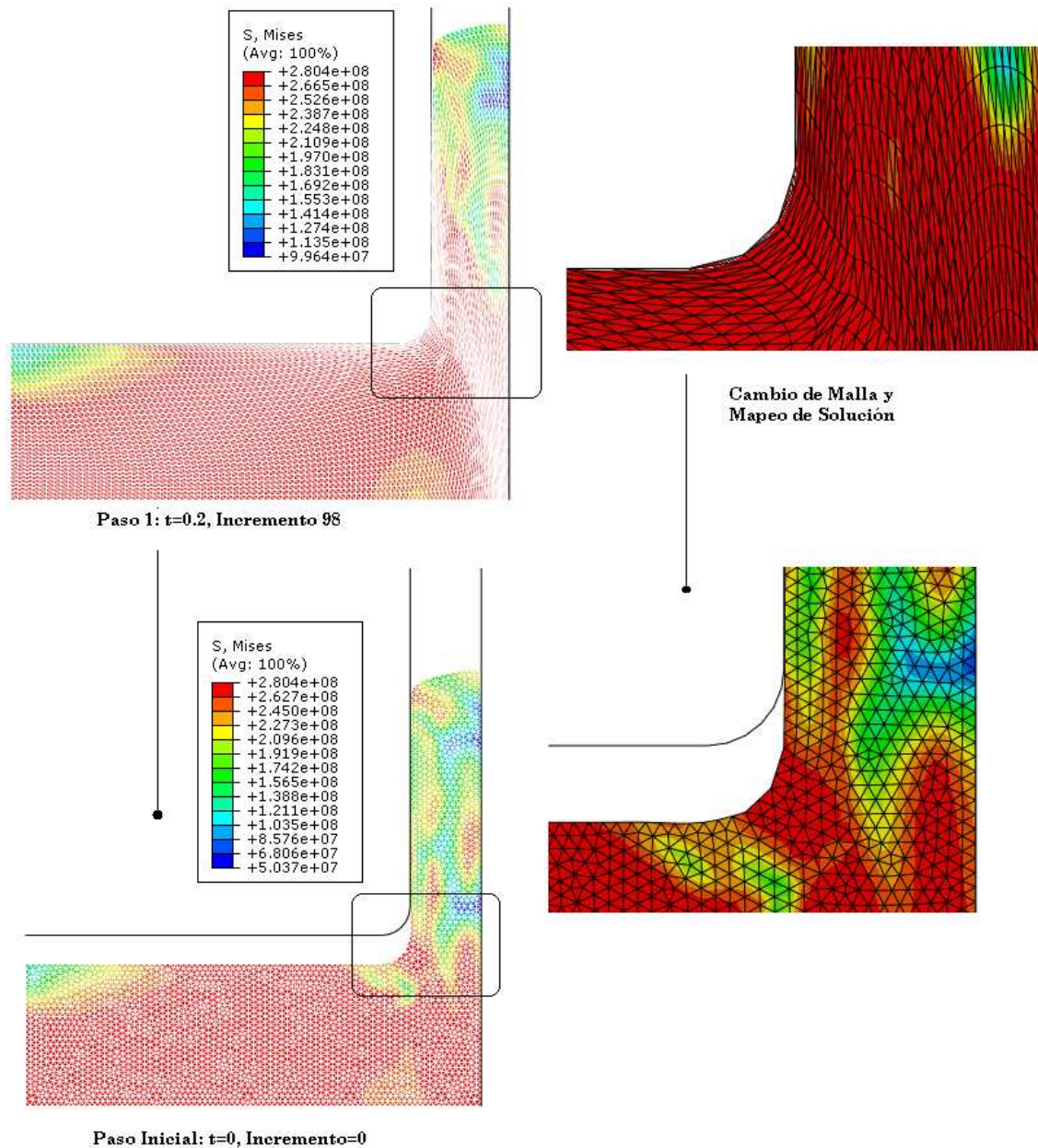


Figura 4.6: Cambio de malla y mapeo de solución.

Una vez transferido el estado final a la malla inicial se continúa el proceso, solicitando que el punzón se desplace el porcentaje restante para extruir la totalidad de la pieza (*figura 4.7*)

Aunque los análisis estáticos implican una menor cantidad de incrementos y estos están asociados al tiempo de cómputo (*sección 4.3*), el tiempo necesario para extrapolar la solución mediante un modelo adicional al que se deben imponer nuevamente las condiciones de frontera hacen que la selección del método que se presentó satisfactoriamente en ésta sección sea más útil en procesos no estacionarios donde se requiera de mayor precisión más que de un control de distorsión.

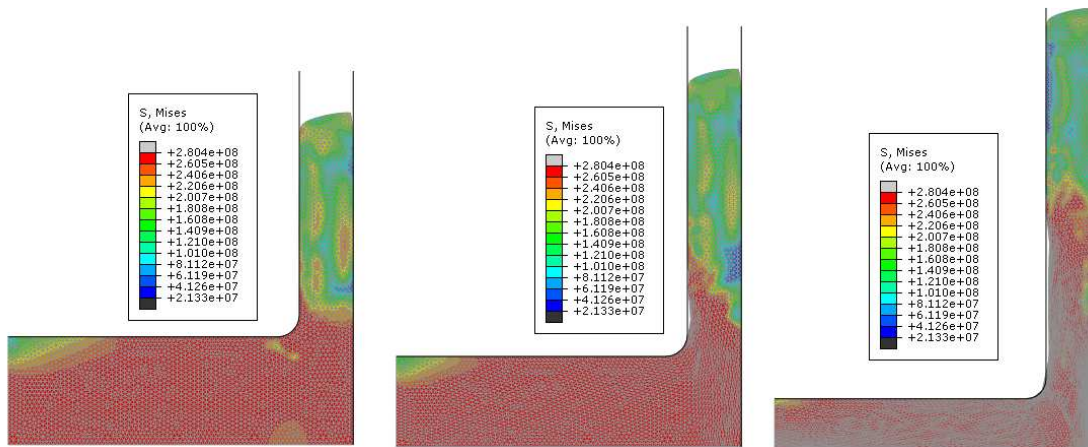


Figura 4.7: Análisis después del mapeo.

En la *figura 4.6* se observa que la transición de una malla deformada hacia una nueva malla modifica la distribución de esfuerzos en la material; la *figura 4.7* por su parte muestra que la malla inicial del proceso con una malla deformada contiene ya dicha distribución y con la nueva topología es posible terminar el proceso de extrusión.

4.2.1 Mallado adaptativo lagrangiano- euleriano

La técnica de remallado ALE (Adaptativo Lagrangiano- Euleriano) es una herramienta para lograr la convergencia de los análisis de grandes deformaciones o pérdida de material que se realizan dentro del ambiente Abaqus Explicit®, permitiendo que la malla se mueva de forma independiente al material. Durante este análisis una sola malla se transforma mediante el ajuste de la forma de los elementos sin alterar la topología (*conectividad*) de la malla.

Debido a que la regeneración de la malla se realiza a lo largo de una etapa del proceso, no se requieren de pasos adicionales para exportar la información de la malla deformada. El reposicionamiento de los nodos y elementos se conoce como remallado y la extrapolación de la solución de la vieja malla a la nueva, se conoce como advección. Abaqus® permite determinar con que algoritmo y con que frecuencia se obtenga la información de la malla (barrido) se realice el remallado y la advección:

- Reposicionamiento volumétrico: Esta opción reposiciona un nodo mediante el calculo del centro de masa de los elementos que rodean a un nodo. Si se desea reposicionar un nodo (M) como el de la *figura 4.8*, el sistema volumétrico hará que la posición final del nodo se desplace hacia C3 y se aleje de C1. Este método es muy robusto y aunque es más costoso desde el punto de vista computacional sus resultados suelen ser estables en grandes deformaciones.
- Reposicionamiento laplaciano: Este método utiliza las coordenadas de los nodos adyacentes de los elementos que conectan con un nodo M a reposicionar. Para este caso el nodo sería desplazado según las coordenadas del los nodos L3 y L2 para

obtener una dimensión mas homogénea de la longitud de los elementos conectados por L4 y L1. Cabe destacar que este método es mucho más eficiente en tiempo de procesador, pero no suele ser capaz de remallar en situaciones de deformación elevada.

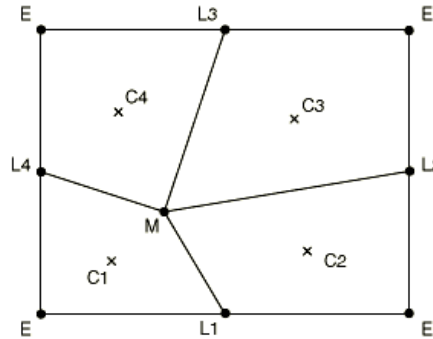


Figura 4.8: Reposicionamiento de un nodo (M) durante los barridos de malla (Simulia, 2006).

Por otra parte el suavizamiento genera una mejor transición en las regiones en que los elementos cambian de dirección. Se utilizarán las mallas de mayor cantidad de elementos (*b*, *d*) de la *figura 4.3* en conjunto con la herramienta ALE empleando los parámetros de la *tabla 4.5*, cuyo significado ya se ha presentado y donde su valor numérico proviene de las recomendaciones (Simulia, 2006) para modelos de conformado o manufactura y son:

Tabla 4.5: Parámetros de método ALE

Frecuencia de remallado	5
Barridos por incremento	10
Algoritmo de advección	Volumétrica
Suavizamiento	Activo

A continuación se muestra la secuencia del proceso empleando la malla *d*. Para la *malla b* no fue posible terminar el análisis por el colapso de los elementos triangulares en la región del filete del punzón.

Se muestra en color el campo resultante de desplazamientos nodales en el material; el estudio de dichas regiones permite establecer las zonas de menor desplazamiento a lo largo del proceso y concluir por ello donde se forma una zona muerta. Llevar la extrusión hasta la región de menor desplazamiento provocaría un incremento muy significativo en la carga de extrusión, esto se muestra en las curvas (*sección 3.1.21*) que plantea el método del planchón.

Como se observa, la región que presenta menores desplazamientos nodales se encuentra en el filete de la herramienta donde se obliga al material a fluir, lo que significa que los elementos se estacionan ahí sin desplazarse, solo deformándose plásticamente, esto puede interpretarse como fricción adherente durante el inicio del proceso; si se desea obtener un resultado gráfico que permita comparar la geometría final obtenida de un proceso de extrusión, la malla

propuesta no satisface dicho criterio al ocurrir un desplazamiento excesivo del nodo superior en las últimas etapas de la extrusión.

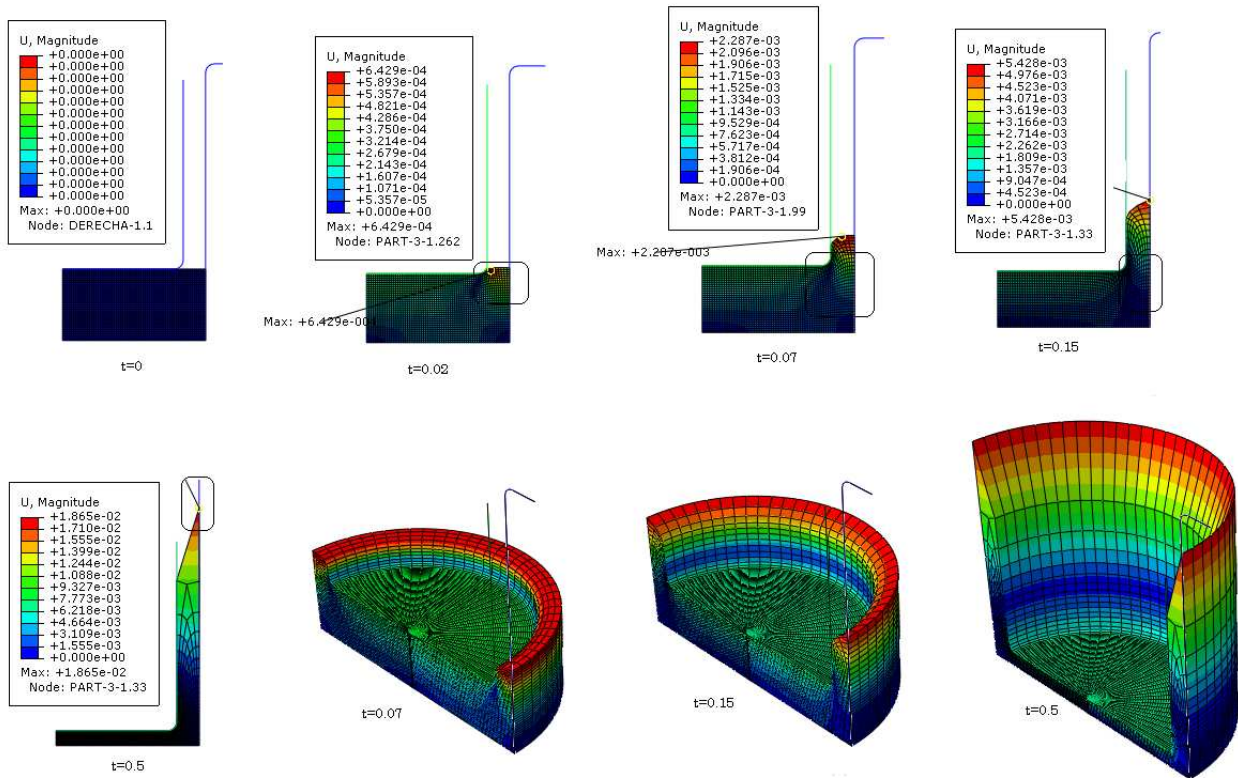


Figura 4.9: Visualización gráfica del material extruido (malla d), empleando el método ALE, análisis explícito, $\mu=0.15$.

4.2.2 Selección y construcción de mallas

Hasta ahora se han presentado dos métodos de reparación de malla que se utilizan en análisis diferentes:

- 1.-Conservando la topología inicial dentro de un mismo análisis (ALE).
- 2.-Modificando la topología (mapeo) y continuando el proceso en un paso adicional.

Desde el punto de vista del tiempo de cómputo un análisis estático es más eficiente, pero el método existente en Abaqus Standard® para remallar es muy costoso en este aspecto.

Por otra parte un paso dinámico ofrece la herramienta de remallado ALE que no requiere de pasos adicionales y que conserva la conectividad total de la malla; para un proceso cuasi-estacionario, como lo es el proceso de extrusión, utilizar el sistema ALE para realizar diferentes variaciones al proceso es más conveniente.

Sin embargo la *malla d*, no ofrece una descripción adecuada desde el punto de vista gráfico y los desplazamientos nodales muestran etapas de fricción adherentes (*sección 1.4*), es por ello que es necesario generar una malla más adecuada con elemento cuadriláteros.

La construcción de una malla basada en modelos materiales, tiene como finalidad crear una malla mediante *separación de dominio* y por el método de *inserción de puntos*, como se mencionó en la *sección 1.2.6* aprovechando que se conoce como fluye el aluminio durante el proceso de extrusión inversa (*figura 4.10*) ya que modelos materiales han sido llevados a cabo por diferentes autores entre ellos Schmitt (Lange, 1985). Con ésta información se aproxima una malla inicial al perfil obtenido del modelo durante la etapa estacionaria del proceso.

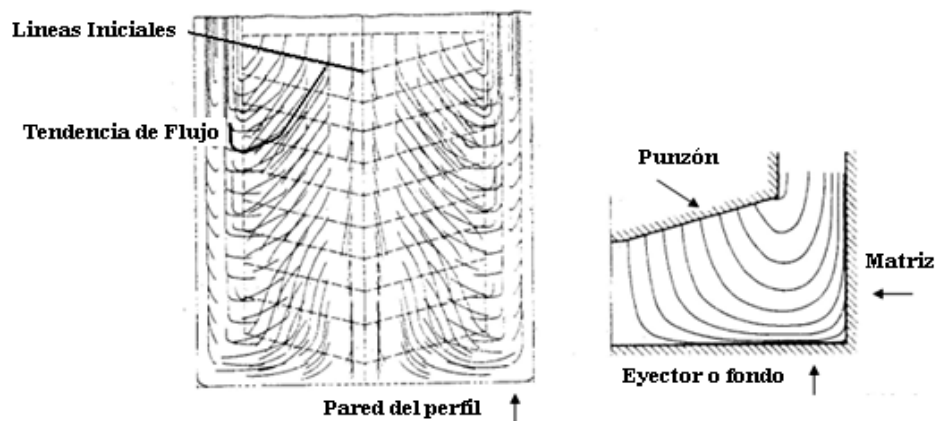


Figura 4.10: Líneas de Flujo durante extrusión de latas de aluminio (Lange, 1985).

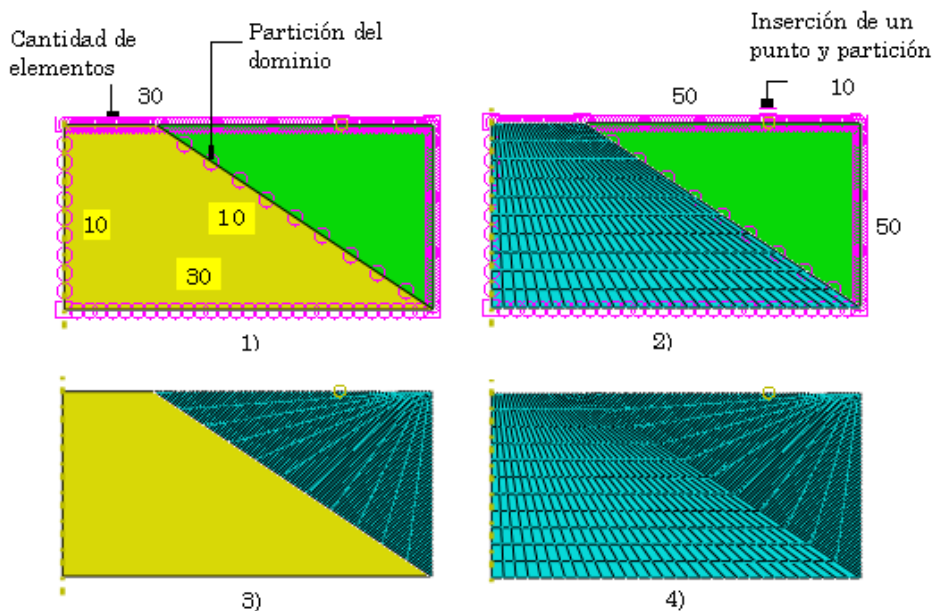


Figura 4.11: a) Etapas para generar la *malla (e)*: 1) Separación de dominio y selección de la cantidad de elementos por lado 2) Mallado estructurado 3) Inserción de punto y división de la arista 4) Mallado final (900 Nodos, 809 elementos).

Empleando esta nueva definición de malla se realiza nuevamente el análisis con las condiciones mencionadas en el modelo general.

En la *figura 4.12* se muestra el campo de desplazamientos en el material durante el avance del punzón. Se observa que el desplazamiento nodal máximo ocurre en la superficie de presión del punzón, justo donde existe un cambio de dirección en la geometría de la herramienta

Se aprecia que la opción de suavizamiento de malla se ejecuta antes de que el proceso comience, si se compara la *malla d* de la *figura 4.9* y de la *figura 4.12* en $t=0$ en donde el avance del punzón no ha comenzado, pero ya se observa que existen desplazamientos nodales. Para los instantes posteriores mostrados en la *figura 4.12* se muestran, en el recuadro, las regiones de mayor desplazamiento nodal a diferencia de la *malla d*, en donde se observa un flujo adherido a la superficie del punzón provocando que los elementos se deformen al adherirse al punzón, sin deslizar.

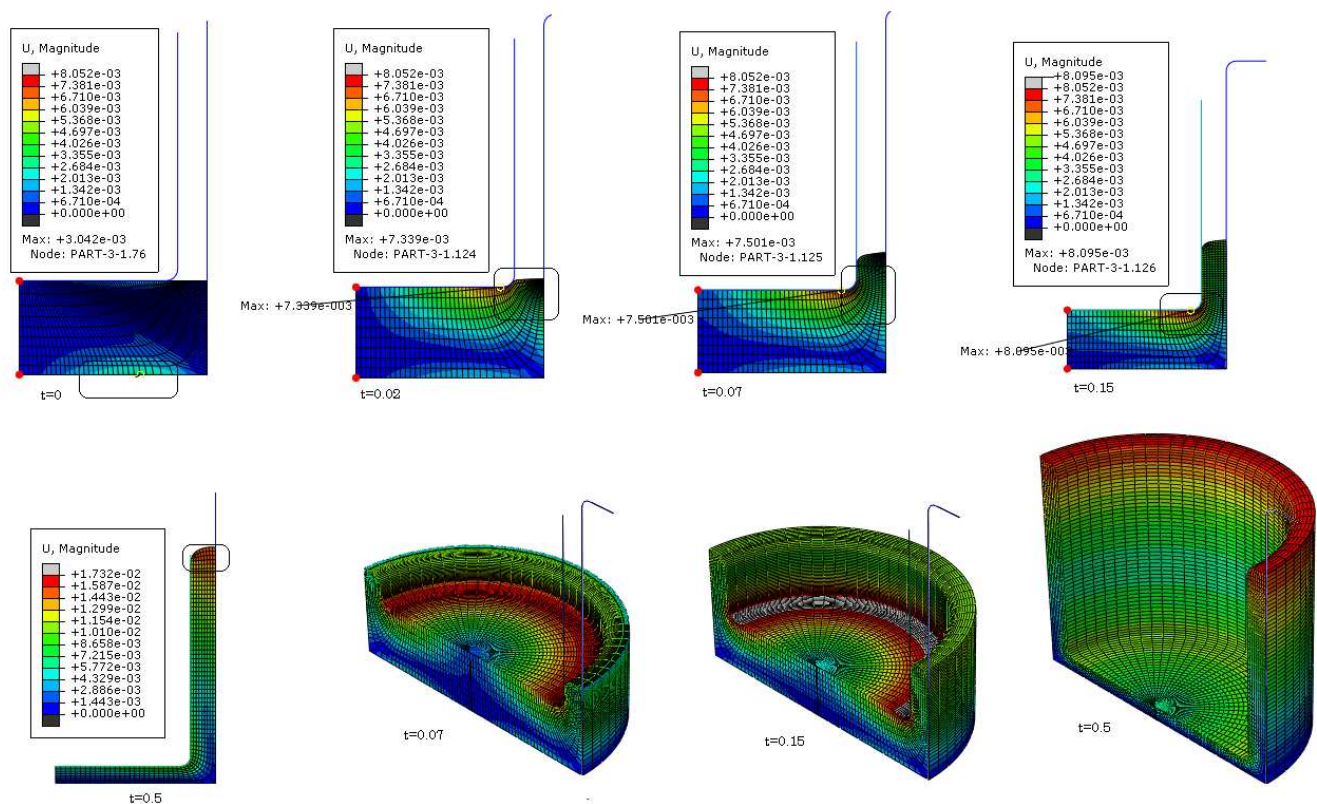


Figura 4.12: Malla (e): desplazamientos nodales durante la extrusión, $\mu=0.15$.

Si se observan los esfuerzos en el material en los mismos instantes que los mostrados para los desplazamientos nodales, se nota que el efecto de la transición suavizada en las etapas iniciales provoca mayores esfuerzos en dichas regiones aunque posteriormente se establece un esfuerzo máximo en la superficie de presión del punzón en las etapas intermedias del proceso.

Hasta este punto el criterio de selección de una malla determinada está dado por la forma final del perfil de extrusión y por la forma en que se desplazan los nodos durante el proceso. Debido a que el método de elemento finito es utilizado en muchas ocasiones con la finalidad

de observar las características geométricas terminales de una pieza tras una serie de deformaciones o procesos, emplear la malla propuesta, con un menor número de nodos y elementos que las mallas anteriores proporciona mejores resultados gráficamente sobre la forma de un perfil extruido y donde se observa claramente la formación de una región estacionaria.

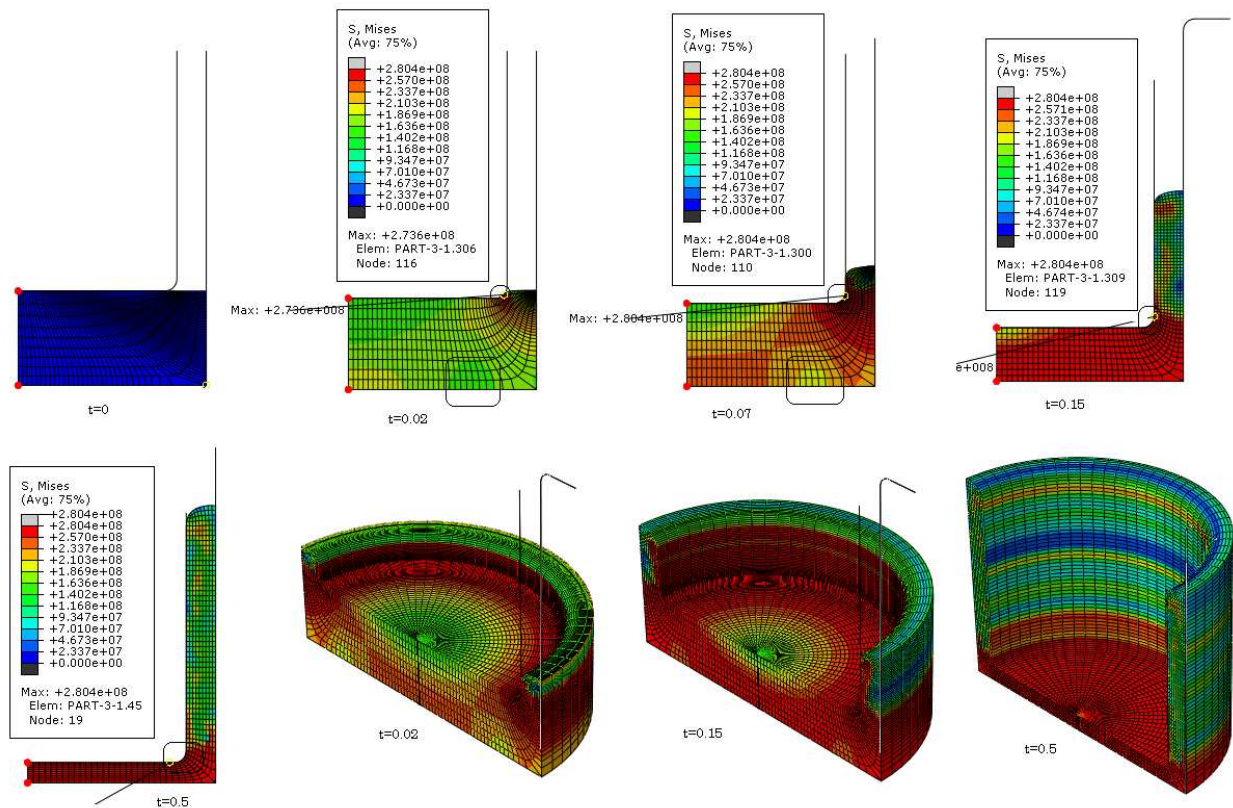


Figura 4.13: Malla (e): distribución de esfuerzos en el material. $\mu=0.15$.

4.3 Economía computacional

La intención de esta sección es mostrar el comportamiento de la *carga de extrusión vs recorrido del punzón* para los métodos que posee el análisis dinámico explícito, ya que hasta ahora se han logrado obtener resultados tanto gráficos como físicos adecuados pero muy costosos en tiempo de procesador (alrededor de 20 hrs por análisis.) El ahorro se da en términos de la cantidad de incrementos necesarios para terminar un mismo análisis variando la condición de masa o de velocidad y debido a que cada incremento emplea un cierto tiempo en realizar diversos cálculos, incrementos menores reducirán el tiempo de procesador necesario para obtener una solución. Sin embargo queda la cuestión de que factores utilizar ya que no se sugiere nada en la literatura especializada y observar si esta variación afecta la respuesta del sistema.

4.3.1 Escalamiento de masa

Los análisis se llevan a cabo empleando la herramienta de remallado ALE en conjunto con la *malla (e)*, bajo las condiciones planteadas en el modelo general y solo para el coeficiente de fricción de 0.15. Se estableció un factor de escalamiento de masa iniciando con un valor de $1e^8$ para motivos de análisis y posteriormente considerando los resultados experimentales realizados por Barisic *et al.* y los que se obtienen de la simulación, se modificó el factor.

Tabla 4.6: Variación del factor de escalamiento

Factor de Escalamiento	Incrementos	Tiempo de Cómputo[s]/[min]	Fuerza Máxima de Extrusión[KN]
100,000,000 ($1e^8$)	10,040	29/ 0.48	1508
50,000,000 ($5e^7$)	11,499	31/ 0.55	1151
10,000,000 ($1e^7$)	21,350	58/ 0.97	1461
5,000,000 ($5e^6$)	30,433	78/ 1.3	1202
1,000,000 ($1e^6$)	69,624	161/ 2.68	913
500,000 ($5e^5$)	99,997	223/ 3.71	857
100,000 ($1e^5$)	213,998	443/ 7.38	941
50,000 ($5e^4$)	311,999	633/ 10.55	965
10,000 ($1e^4$)	688,088	1,332/ 22.2	1149
5,000 ($5e^3$)	1,116,208	3,063/51.05	1170
1,000 ($1e^3$)	2,205,723	4,016/ 66.93	1340
500 ($1e^2$)	2,789,680	12,609/210.15	1270

La *tabla 4.6* muestra la variación de la fuerza de extrusión, los incrementos y el tiempo de cómputo como función de los incrementos.

Las *figura 4.14* muestra los incrementos en función del logaritmo del factor de escalamiento de masa. Las *gráficas 4.14, 4.15* muestran la variación del tiempo del proceso y los incrementos necesarios para obtener una solución satisfactoria; surge la cuestión de que si dichos valores se modificarían empleando diferentes procesadores ya que la capacidad de realizar operaciones por unidad de tiempo varía, sin embargo el comportamiento y las proporciones deben mantenerse.

Se utiliza el logaritmo de la variable independiente para mostrar claramente la tendencia del factor de escalamiento contra los incrementos; sin embargo si se construye una curva log [incrementos] vs log [factor de escalamiento] se observaría una relación prácticamente lineal, tal como ocurre entre los incrementos necesarios en un paso dinámico explícito contra el tiempo de procesador.

Los procedimientos que requieren más de 300,000 incrementos pueden verse afectados por el error de redondeo y los procedimientos que emplean más de 2, 000,000 incrementos deben ser analizados empleando una precisión doble (Simulia, 2006), esto se puede apreciar claramente al comparar la *tabla 4.6* donde se observa que aun para factores de escalamiento menores con un numero muy elevado de incrementos, la carga de extrusión comienza a aumentar.

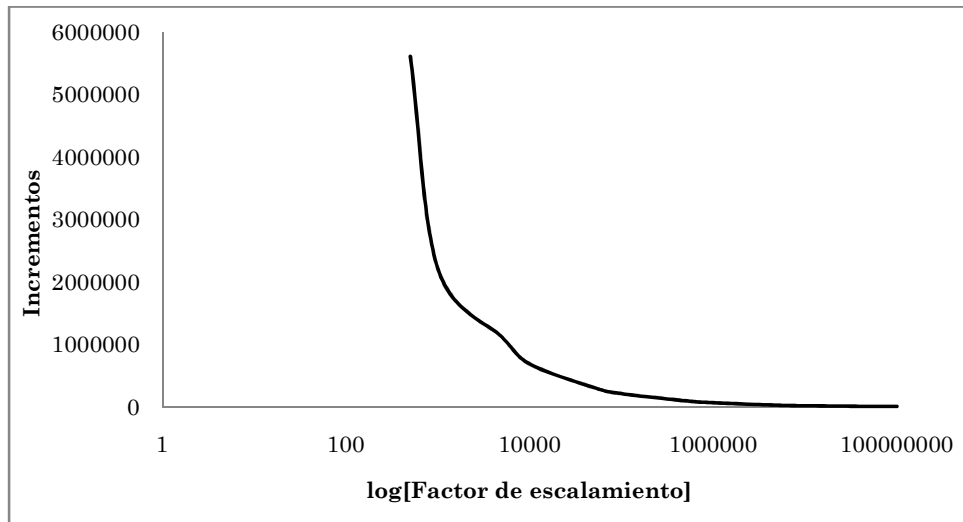


Figura 4.14: Incrementos vs logaritmo del factor de escalamiento.

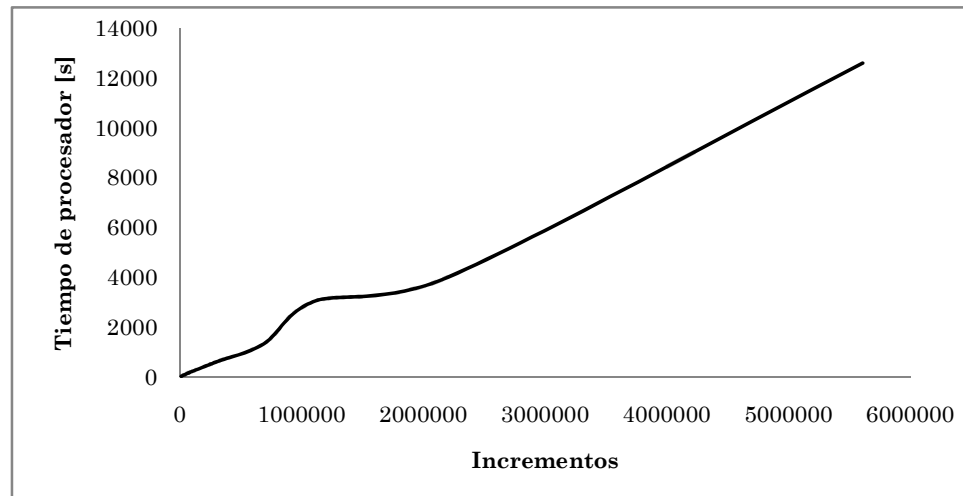


Figura 4.15: Tiempo de procesador en función de los incrementos necesario.

La figura 4.16 muestra la variación de la carga de extrusión conforme el punzón recorre los 6.5 [mm] de desplazamiento en la dirección y , para diferentes factores de escalamiento. La curva muestra los resultados obtenidos para los factores desde $1e^8$ hasta $5e^4$ variándolos como se muestra en la tabla 4.6; la línea horizontal representa el valor experimental obtenido por Barisic en 2004 (870[KN]).

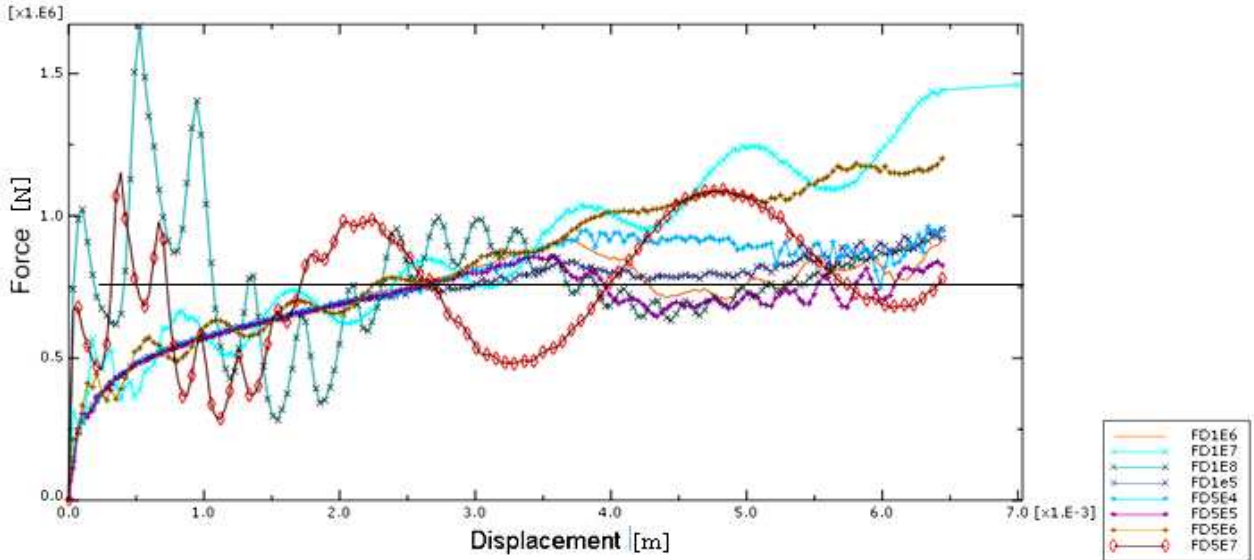


Figura 4.16: Fuerza de extrusión vs desplazamiento del punzón para diferentes factores de escalamiento de masa. $\mu=0.15$.

Se observa que para los factores de escalamiento de $1e^6$, $5e^5$, $1e^5$ y $5e^4$, la máxima variación es de alrededor del 10% entre ellos y las curvas son muy similares en la región inicial de desplazamiento. Con la finalidad de observar esta diferencia, la figura 4.17 muestra los valores de escalamiento de masa desde $5e^5$ e inferiores.

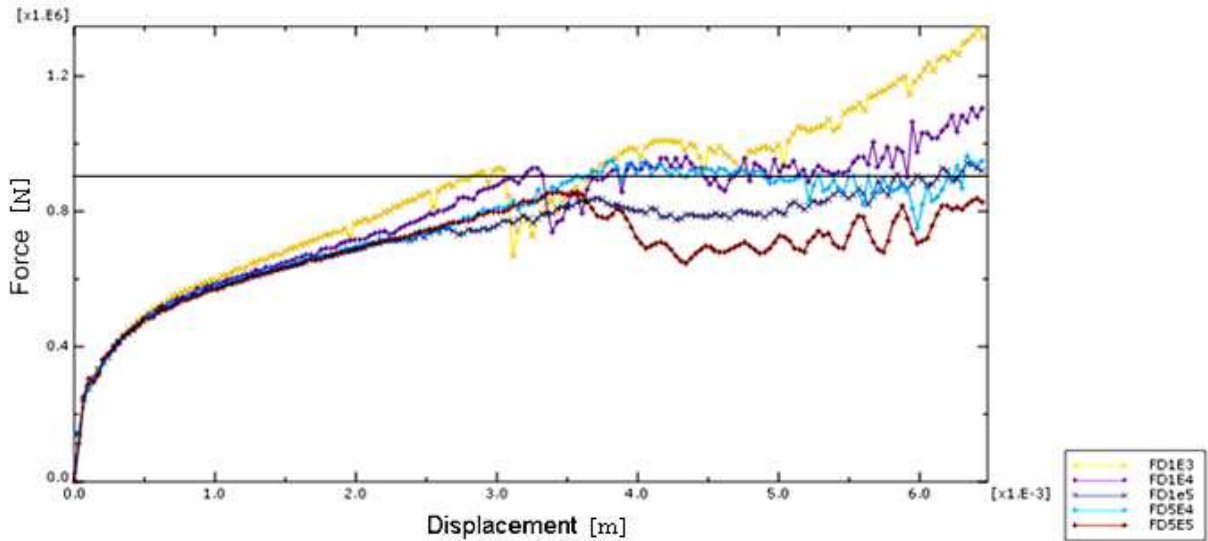


Figura 4.17: Fuerza de extrusión vs desplazamiento del punzón para diferentes factores de escalamiento de masa. $\mu=0.15$.

Se observa que para la curva de fuerza vs desplazamiento es prácticamente la misma hasta 2 [mm] de recorrido del punzón (figura 4.17), sin embargo, en la última etapa para factores cada vez menores la carga continua incrementándose, esto puede deberse a que los análisis con factores más bajos emplean más de 300,000 incrementos lo que puede provocar errores de redondeo (Simulia, 2006) y deben analizarse con una precisión doble la cual generaría un costo computacional adicional, por lo que mantener un análisis explícito abajo de 300,000 es

lo más conveniente sin añadir tiempo de procesamiento. Para el caso en estudio un factor de $1e^5$ satisface la condición anterior y ofrece resultados con una diferencia máxima de alrededor de 8% con el valor máximo experimental.

4.3.2 Escalamiento de velocidad

Cuando se aplica un escalamiento de velocidad en un análisis se refleja en el tiempo en el que la extrusión se lleva a cabo para un mismo desplazamiento del punzón. Como ya se ha mencionado, los análisis de escalamiento de masa se realizaron a 13.5 [mm/s] que representa una velocidad industrial de extrusión de aleaciones de aluminio.

En esta sección se incrementará la velocidad reduciendo el tiempo de extrusión para observar la variación en la carga de extrusión y el tiempo de procesador que se emplea para intervalos menores.

Como se observa en la *tabla 4.7* las velocidades desarrolladas son mucho mayores y puede argumentarse que la respuesta del material no puede permanecer a tan elevadas velocidades del punzón. Sin embargo debido a que la prueba de compresión fue realizada a temperatura ambiente y a una velocidad de deformación constante, los modelos matemáticos proporcionados por Barisic *et al.* para la región plástica de la aleación en estudio no relacionan la velocidad de deformación con variación en el esfuerzo de fluencia, lo que implica que la carga variará no en función de dicho parámetro, sino, en el caso de la simulación, por las expansiones superficiales o por la cantidad de incrementos necesarios para el proceso.

Tabla 4.7: Variación de los parámetros con el escalamiento de velocidad.

Tiempo del paso[s]	Velocidad del punzón [mm/s]	Fuerza Máxima de Extrusión[KN]	Incrementos	Tiempo de Cómputo [s]/[min]
0.01	650	907	1,208,290	2690/44.50
0.005	1,300	938	603453	1335/22.35
0.001	6,500	790	121,672	311/5.11
0.0005	13,000	825	62,205	172/2.52
0.0001	65,000	1,740	11,989	40/0.6
0.00005	130,000	1,654	9,311	32/0.53

La relación entre los incrementos y el tiempo del paso (tipo de análisis) se acoplan linealmente de forma más notoria que con el empleo del factor de escalamiento de masa. Si se construye una curva del logaritmo del tiempo del paso contra la fuerza de extrusión se engloban los resultados en los que se aprecia que la carga aumenta en un determinado punto cuando la velocidad provoca que los efectos inerciales afecten de forma importante el proceso de extrusión.

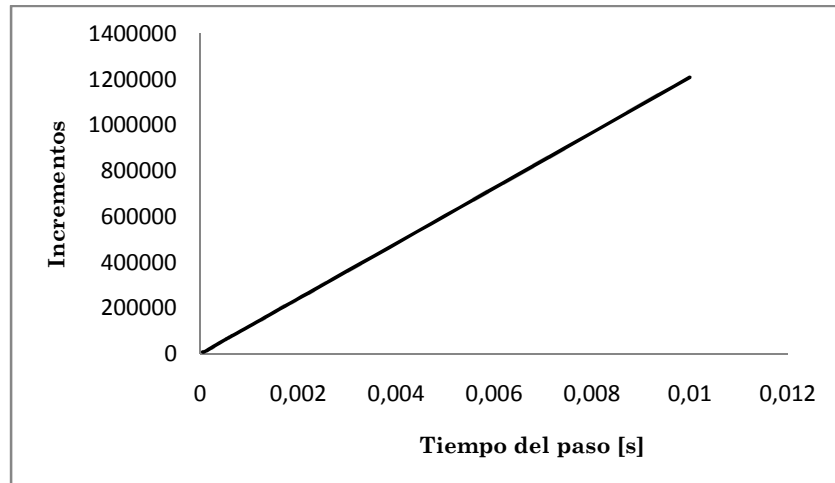


Figura 4.18: Incrementos vs tiempo del paso.

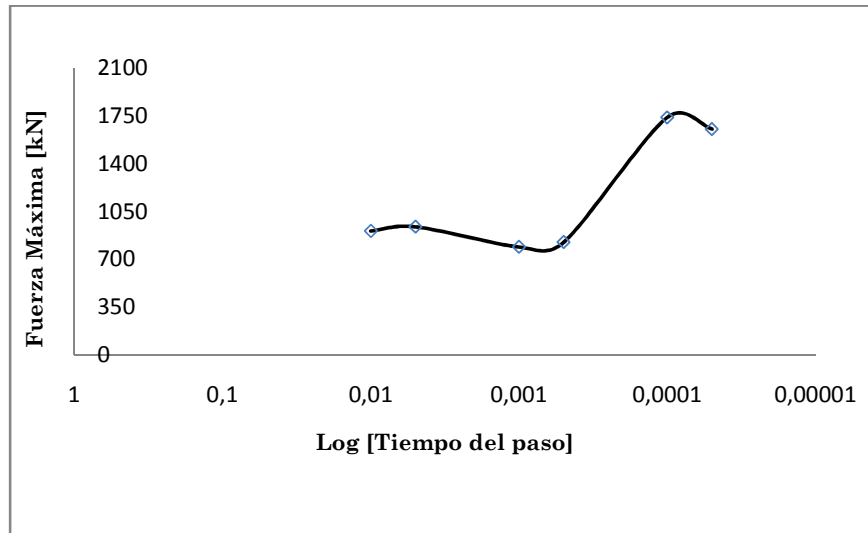


Figura 4.19: Fuerza máxima de extrusión vs logaritmo del tiempo del paso.

Es necesario seleccionar un tiempo donde los incrementos necesarios se mantengan debajo de 300,000 sin alterar el comportamiento del material, como ocurre para velocidades de desplazamiento más elevadas ya que se observa (*figura 4.21*) un comportamiento diferente con respecto a velocidades inferiores en las que los efectos inerciales no influyen en la respuesta del sistema.

Por ello seleccionar un análisis con un tiempo de paso de 0.0005 mantiene la carga de extrusión cercana al valor experimental reportado por *Barisic* (*figura 4.20*, línea horizontal) y con un bajo costo de procesamiento.

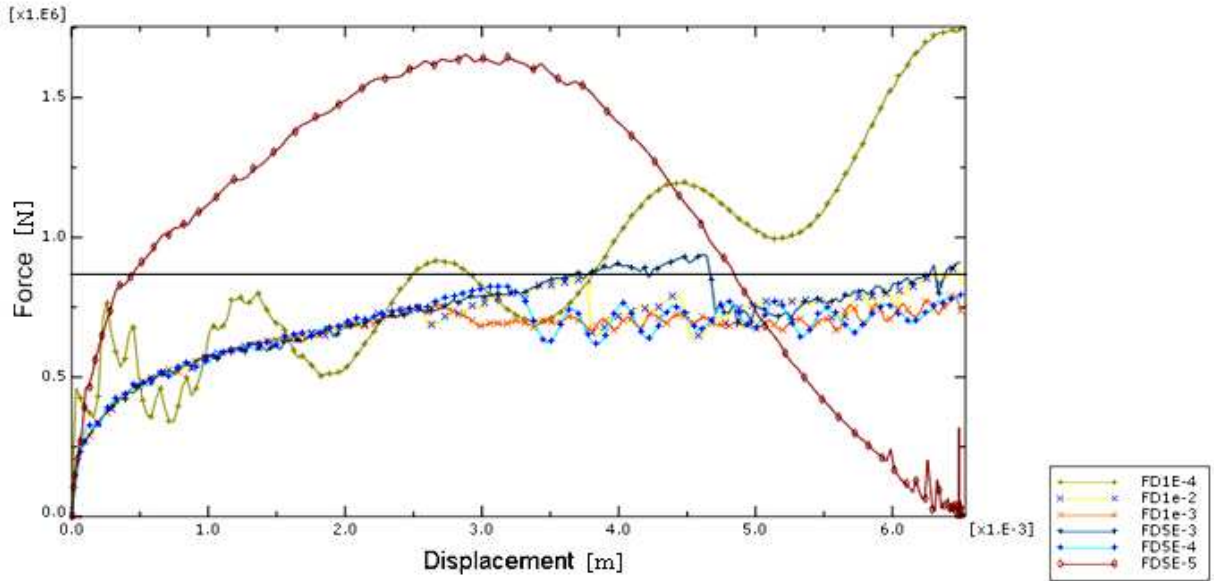


Figura 4.20: Fuerza de extrusión vs desplazamiento para diferentes velocidades del punzón, $\mu=0.15$.

Los perfiles finales para cada uno de los análisis realizados para los cuales se modificó la velocidad de desplazamiento del punzón según lo especificado en la *tabla 4.7*, se muestran en la figura siguiente. Se observa que para un tiempo de $5e^{-5}$ los efectos inerciales modifican sustancialmente la respuesta del material.

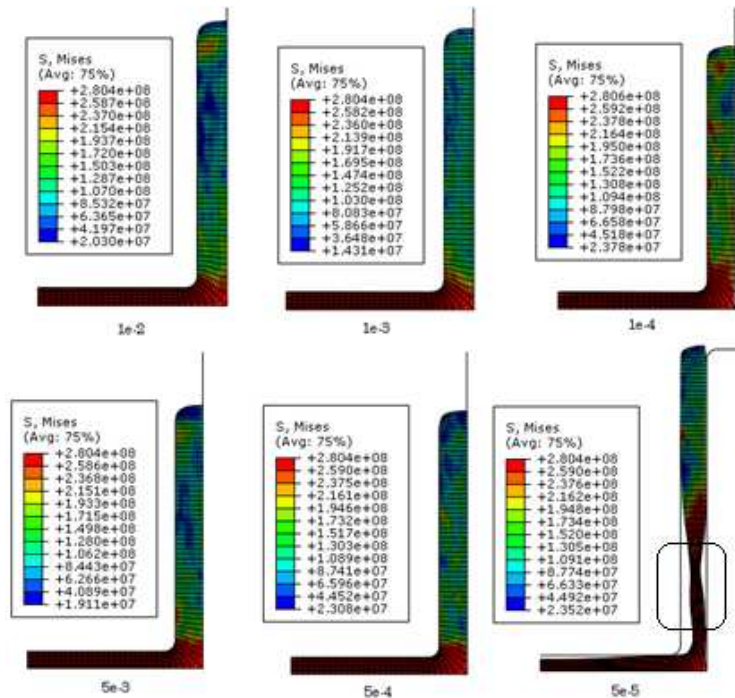


Figura 4.21: Perfiles al final del proceso para diferentes velocidades del punzón.

Hasta este punto se han presentado las herramientas con las que es posible construir un modelo más económico desde el punto de vista del tiempo de procesador, ya que el diseñador realiza una variedad de modificaciones con la finalidad de optimizar un procedimiento de

conformado y lo deseable es tener tiempos menores de análisis con el menor error de asociado (con respecto a una variable reportada).

La selección entre un factor de escalamiento o incremento en la velocidad del análisis (reducción artificial del tiempo del proceso) pueden utilizarse en un rango de valores que dependen de la naturaleza del fenómeno, en donde su variación puede reducir el tiempo de cómputo sin aumentar significativamente el error en los resultados numéricos, al menos en el proceso de extrusión inversa planteado si se compara con valores experimentales reportados en la literatura.

Elegir entre escalar artificialmente la velocidad o la masa del modelo es posible cuando el análisis que se realiza es independiente de la velocidad de deformación, es el caso analizado donde la definición del material se da a través del modelo de Hollom que no considera dichos efectos. En los siguientes apartados de este capítulo se modificarán otras variables asociadas al proceso utilizando la malla (e) con suavizamiento, el sistema de remallado ALE mediante pasos dinámicos y un factor de escalamiento de $1e^5$, aunque sería posible llevar a cabo el análisis mediante otro factor de escalamiento que cumpla la condición de incrementos y cercanía al valor de la literatura, al igual que un escalamiento de la velocidad en las mismas condiciones.

4.4 Variación del coeficiente de fricción

Los análisis anteriores fueron llevados a cabo manteniendo constante el coeficiente de fricción ($\mu=0.15$). Ahora se emplearán los valores numéricos de la *tabla 4.2* sobre coeficientes de fricción y empleando un factor de escalamiento de $1e^5$ se modificará para encontrar la curva de *fuerza de extrusión vs coeficiente de fricción*.

Tabla 4.8: Influencia del coeficiente de fricción en la carga de extrusión

Coeficiente de fricción	Fuerza Máxima de Extrusión [KN]/ Experimental
0	570
0.03	686
0.05	714/750
0.1	846
0.15	939/870
0.17	934
1	2836

Si se observa la curva que se obtiene empleando el modelo analítico (*sección 3.3.1*) se aprecia que tanto en la simulación como en dicho modelo se predicen comportamientos lineales en ambos casos cuando las condiciones de fricción se vuelven más severas; mantener este valor dentro del mínimo posible es recomendable pues a menores cargas, el tamaño de los equipos involucrados en el proceso es menor.

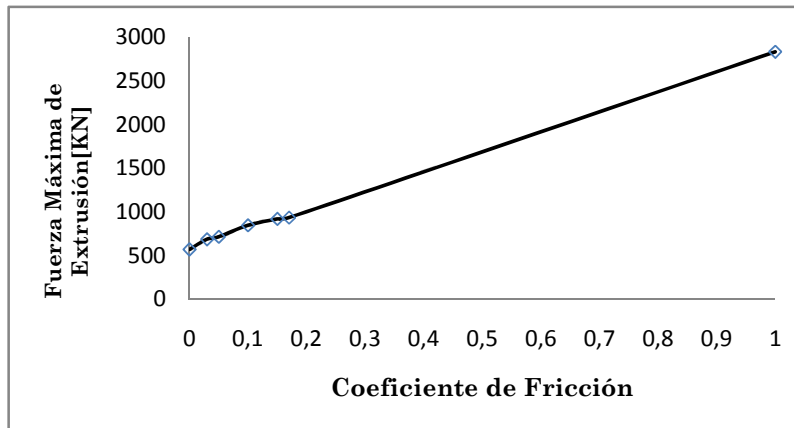


Figura 4.22: Fuerza máxima para diferentes coeficientes de fricción.

La carga máxima de extrusión aumenta conforme se aumenta el coeficiente de fricción y según se muestra en la *curva 4.22* el incremento es prácticamente lineal. Un caso crítico ocurre cuando el coeficiente de fricción es 1, lo que implica un comportamiento adherente en la superficie del punzón por lo que la fuerza se incrementa conforme el proceso se desarrolla. Esta curva indica que el mantenimiento de la lubricación a lo largo del recorrido del punzón es de vital importancia pues a mayores coeficientes o factores de fricción mayor, es el requerimiento de carga para la extrusión.

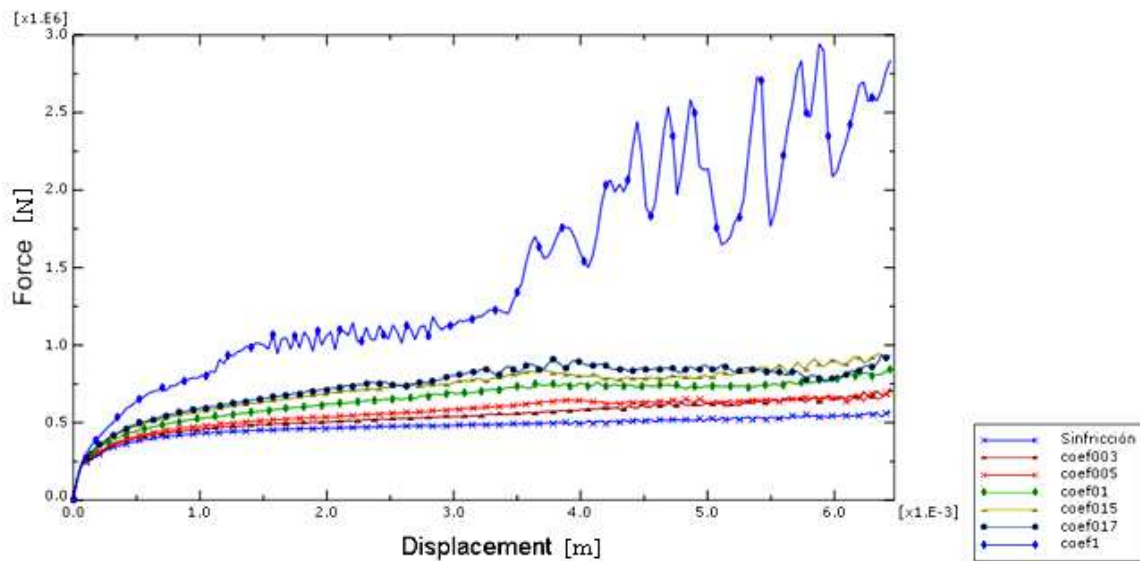


Figura 4.23: Variación de la fuerza de extrusión en función del desplazamiento del punzón para diferentes coeficientes de fricción.

4.5 Variación de la geometría

4.5.1 Influencia de la matriz

Cuando se modifica la altura de la matriz implica una reducción del área y del tiempo de contacto con el material. En ocasiones es preferible utilizar una matriz contenedora para evitar que se presenten flexiones en la parte inicial o final de las etapas de extrusión, sin embargo existe una repercusión tanto en la carga de extrusión por el incremento en la fuerza de fricción y en la generación de calor. El modelo construido hasta ahora simula una matriz contenedora, por lo que en este apartado se modifica la altura de la matriz.

Tabla 4.9: Influencia de la altura de la matriz en la carga de extrusión $\mu=0.15$

Altura de la matriz[m]	Carga de extrusión [KN]
0.008	740
0.012	753
0.015	820
0.02	939

Al comparar los valores máximos se observa que a mayor altura del contenedor, la carga de extrusión aumenta, esto se debe a que el material entra en contacto con la pared de la matriz que provoca esfuerzos de corte en la superficie del material.

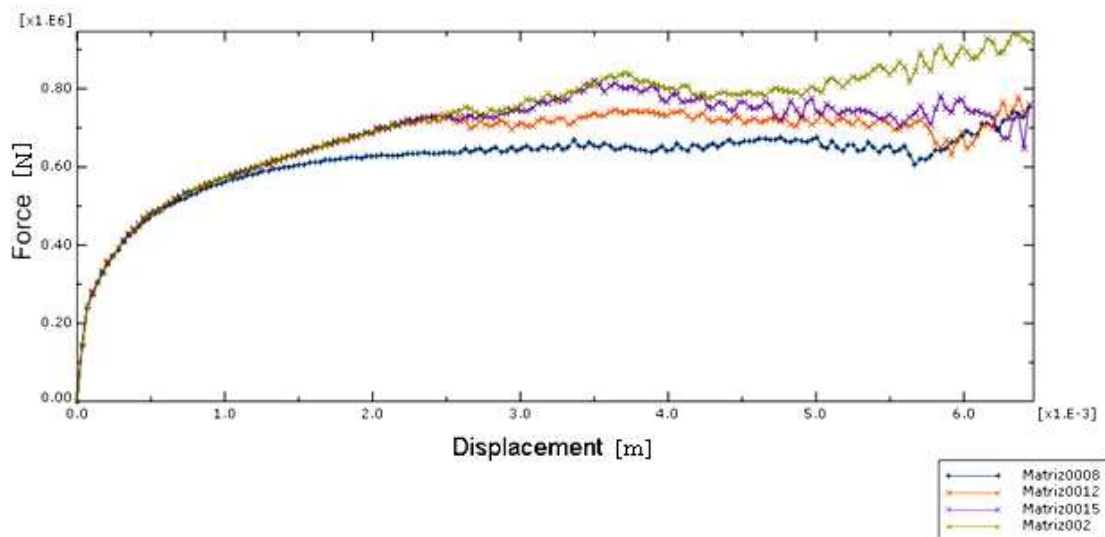


Figura 4.24: Variación de la fuerza de extrusión en función del desplazamiento del punzón para diferentes alturas de la matriz

En la siguiente figura se muestran los perfiles de extrusión al final del proceso de extrusión inversa; se observa que a menor altura de la matriz los esfuerzos en el perfil son de menor magnitud en comparación con dimensiones mayores.

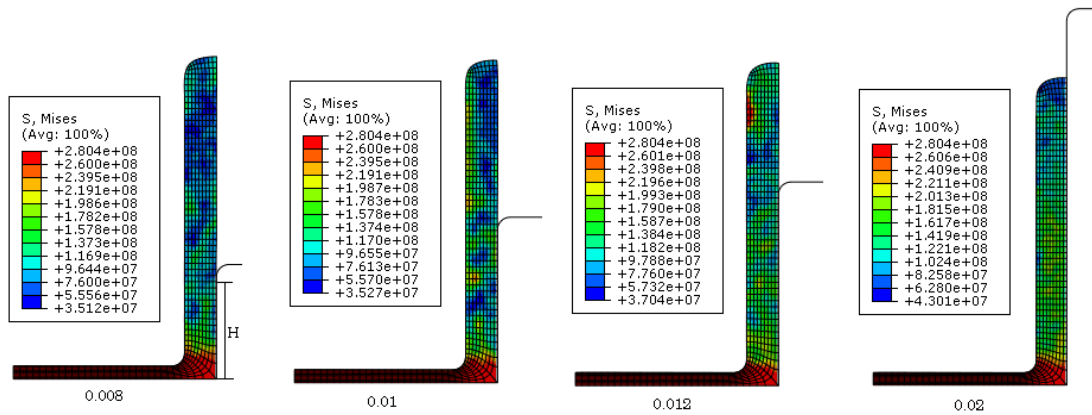


Figura 4.25: Etapas finales del proceso de extrusión para diversas alturas de la matriz.

La diferencia máxima es aproximadamente del 26% entre el valor mínimo y máximo para las diferentes alturas de la matriz.

4.5.2 Influencia de la geometría del punzón

Se compara la diferencia entre punzones deformables (acero) y analíticamente rígidos con una misma geometría. Para punzones cónico-planos se modificará el ángulo α (figura 4.25) para cuantificar el efecto sobre la carga de extrusión y los esfuerzos en la herramienta.

Las recomendaciones de la ICFG como se ha mencionado en el primer capítulo, para punzones cónico-planos incluyen la superficie de presión, al ángulo de alivio y los radios de los filetes. De los estudios de Bennani y Bay (1994) se concluye que el ángulo de presión es de fundamental para el control adecuado del proceso, el presente trabajo cuantifica su influencia sobre la carga de extrusión.

Utilizando las relaciones 1.1, los valores geométricos para punzones cónicos:

$$h = 0.5\sqrt{Di} \text{ (mm)} \quad R = 0.075 Di \quad \beta = 4^\circ$$

$$h = 1.83mm \quad R = 1.0125 \quad \beta = 4^\circ$$

En la figura siguiente se muestra la geometría de los punzones propuestos así como la malla generada en la región. Esta malla se generó empleando elementos cuadriláteros con una mayor densidad de elementos en la región de contacto con el material, puesto que durante el contacto entre superficies deformables la penetración entre los elementos puede ocurrir cuando la densidad de los mismos en la región de contacto es pequeña.

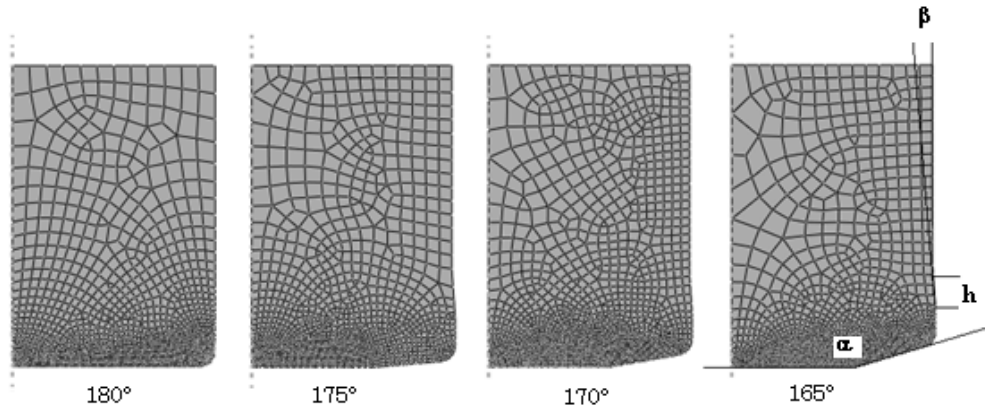


Figura 4.26: Punzones propuestos

Los valores máximos obtenidos se muestran a continuación:

Tabla 4.10: Influencia del ángulo de presión en la carga de extrusión

2α [°]	Carga Máxima de Extrusión [KN]
180 (Plano)	1196
175	835
170	786
165	750

La curva construida en este caso muestra la fuerza de extrusión en función del tiempo del análisis. En dicho modelo, empleando una herramienta deformable se añadió un paso adicional para el cual el punzón se retira de la pieza. Esto se observa en la serie de curvas de la figura 4.27 donde en el instante 0.5 [s] la carga cae abruptamente que coincide con la retirada del punzón eliminando el contacto con el material.

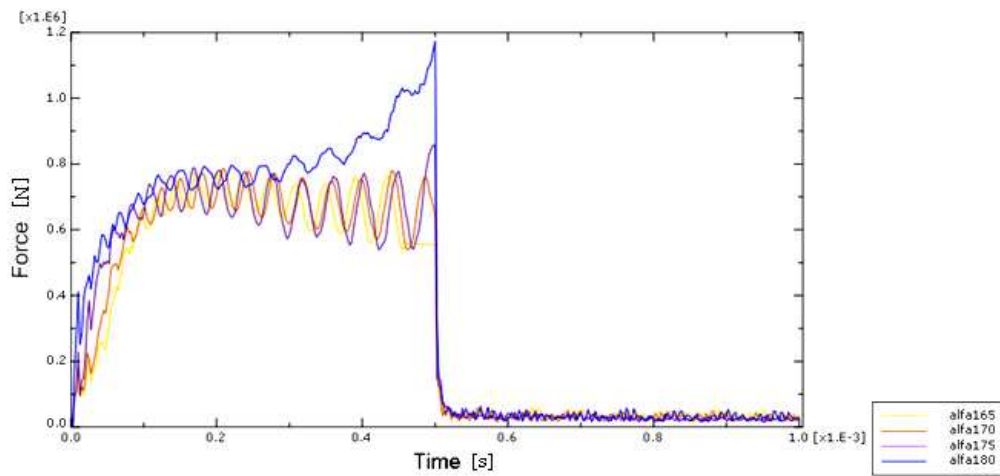


Figura 4.27: Variación de la fuerza de extrusión a lo largo del tiempo para diferentes ángulos de nariz del punzón.

Capítulo 5

Extrusión combinada: directa-inversa-radial

5.1 Modelo general

Existen otros procesos de extrusión que se emplean para fabricar piezas con protrusiones radiales como engranes o flechas automotrices con estriados externos. Dentro del ámbito computacional las simulaciones de un proceso de extrusión combinada específicamente directa-indirecta-radial, conlleva una serie de dificultades para completar el análisis de forma satisfactoria debido a que se presentan desplazamientos nodales en varias direcciones.

A. Farhoumand y R. Ebrahim (2008) realizaron un experimento empleando aluminio comercial para fabricar una pieza (*figura 5.1*) mediante un proceso de extrusión combinada (directa-inversa-radial).

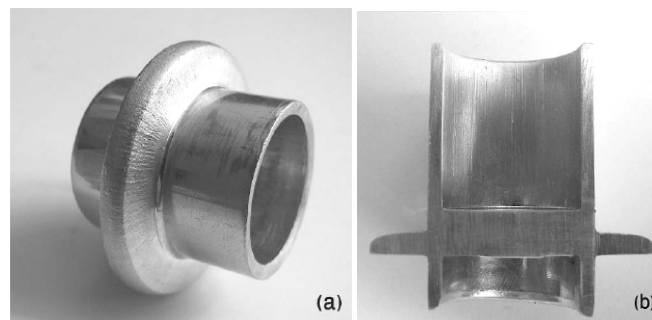


Figura 5.1: a) Pieza terminada, b) Corte Transversal

La definición del material empleado fue expresada mediante una curva de Hollom en acuerdo con los datos obtenidos mediante una prueba de compresión:

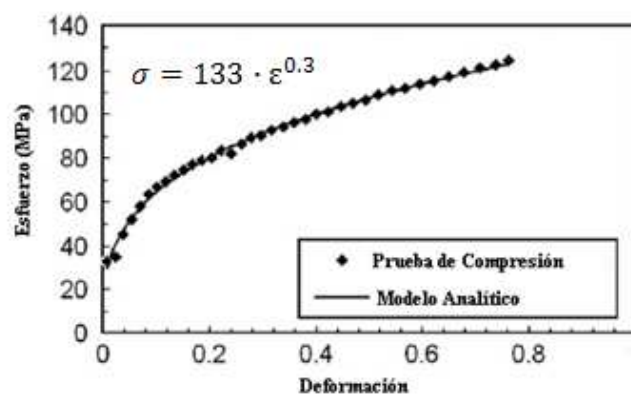


Figura 5.2: Curva para la región plástica del aluminio empleado (Farhoumand, 2008)

Como se observa el modelo representa un sólido elasto-plástico con endurecimiento isotrópico. Las propiedades adicionales del material se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla 5.1 Propiedades físicas y mecánicas del aluminio

Densidad (ρ) [kg/m ³]	2700
Módulo de Poisson (ν) [1]	0.33
Módulo de elasticidad (GPa)	70
Resistencia a la fluencia (MPa)	30
Resistencia última a compresión (MPa)	124

Con la finalidad de emplear los conceptos obtenidos de la simulación de extrusión inversa y aplicarlos a un proceso de extrusión mas complejo se construyó en Abaqus 6.8® el modelo del proceso combinado (directa-inversa-radial) y se compararon los resultados con los generados por A. Farhoumand y R. Ebrahim (2008).

5.2 Geometría del proceso

Las condiciones de la simulación se abordaron con mayor profundidad en el capítulo anterior, por lo que ahora se presentan con mayor brevedad. La geometría del proceso que se construyó en este trabajo para la simulación combinada axisimétrica se muestra a continuación:

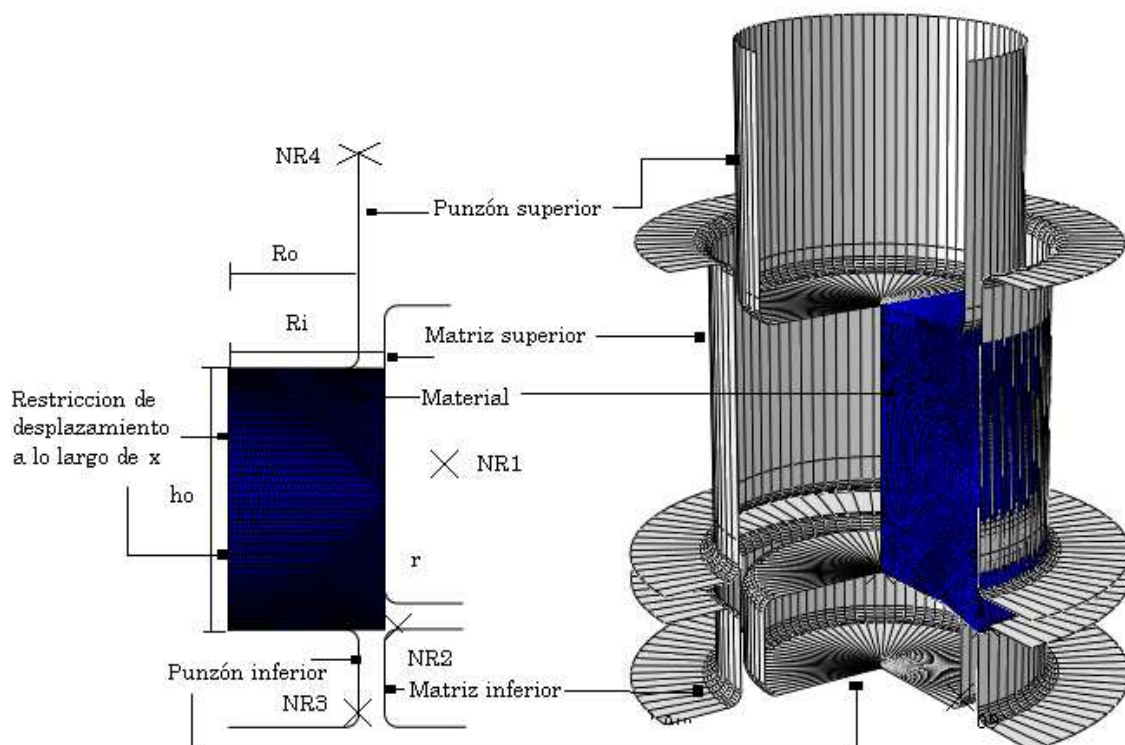


Figura 5.3: Representación del modelo. $R_0=24$, $R_i=20$, $h=20$, $r=1$, $s=2$. Dimensiones en mm.

5.3 Condiciones de la simulación

• Tipo de análisis

Las opciones empleadas para el análisis del proceso de extrusión combinada se muestran en la *tabla 5.2*:

Tabla 5.2 Características del análisis

Tipo de Análisis	Dinámico Explícito
Tiempo de paso[s]	3.75
Herramienta de remallado	ALE
Factor de Escalamiento	1.e7

El tiempo en que la simulación experimental se llevó a cabo fue de 75[s] con una velocidad de desplazamiento del punzón de 0.2 [mm/s]; sin embargo un análisis dinámico de ésta magnitud implicaría un tiempo computacional muy elevado. Por ello se empleó un tiempo de 3.75 [s] empleando un factor de escalamiento de $1e^7$.

• Condiciones de contacto

Las condiciones experimentales de fricción entre el punzón, las matrices y el eyector con el material consideraron un factor de fricción de 0.13 (espuma de afeitado) y por medio de la *ecuación 1.6* se convierte a su correspondiente coeficiente de fricción (0.037).

• Condiciones de frontera

En la *figura 5.3* se muestran esquemáticamente las condiciones de frontera que pueden formularse como sigue:

- Dado o matriz superior (empotramiento): Restricción de desplazamiento en x , y , así como restricción de rotación alrededor de z aplicada al *NR 1*.
- Dado o matriz inferior (empotramiento): Restricción de desplazamiento x , y así como restricción de rotación alrededor de z aplicada al *NR2*.
- Punzón inferior (empotramiento): Restricción de desplazamiento y rotación en x , y así como restricción de rotación alrededor de z aplicada al *NR 3*.
- Punzón superior (restricción de movimiento): Se impide al punzón a desplazarse sobre el eje x , lo que implicaría una extrusión asimétrica y se impide la rotación alrededor del eje z , esta condición se aplica al *NR 4*.
- Punzón superior (desplazamiento): Se solicita a la herramienta a que se desplace un total de 15[mm] con una velocidad constante de 0.01 [mm/s].

- Material (restricción de desplazamiento axial): Se limita el movimiento del lado izquierdo del material (coinciden con el eje de la pieza) a describir movimiento sobre el eje y ($x=0$).

5.4 Construcción y selección de malla

La generación de mallas adecuadas en conjunción con las diversas condiciones que se han descrito juega un papel importante en el éxito de una simulación. Esto es cierto cuando las deformaciones que se presentan en los elementos de la malla son de gran magnitud. En este caso se tienen 3 direcciones de flujo, lo que hace que la malla inicial deba considerar dichas condiciones; en el *capítulo 4* se utilizaron de base los modelos materiales para construir una configuración en el estado inicial del espacio discretizado. Sin embargo no se dispone de la información de dichos modelos en procesos de esta naturaleza, sólo se conocen intuitivamente las direcciones de flujo. Se compararon diversas técnicas y tipos de mallado para obtener la solución.

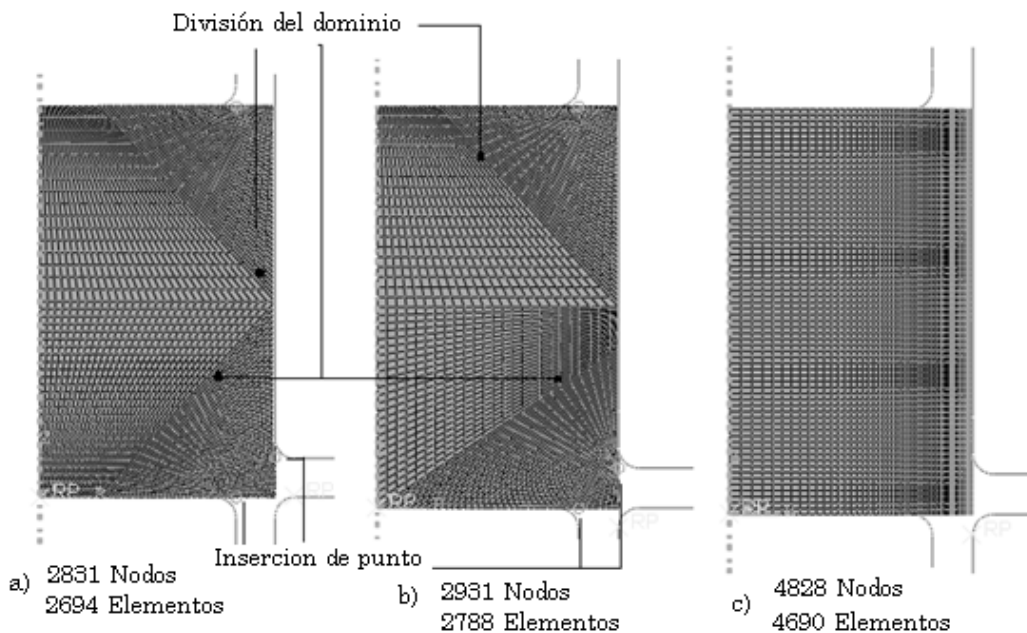


Figura 5.4: Representación de las malla utilizadas

5.5 Resultados y visualización

Una vez construido el modelo con las condiciones descritas se muestran los resultados para las 3 diferentes mallas propuestas. La *figura 5.5* muestra la fuerza de extrusión en función del recorrido del punzón; en ella se muestra el valor máximo obtenido en los experimentos realizados con la aleación por otros autores, y la variación que se obtiene al emplear las mallas. Se observa que utilizar un mayor número de elementos (*malla c*) no necesariamente facilita la simulación del proceso.

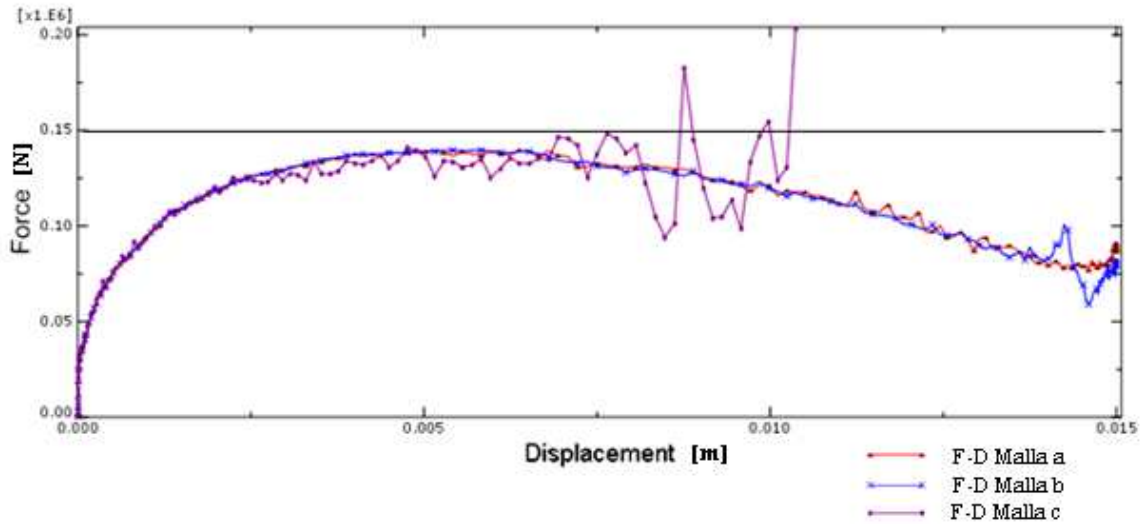
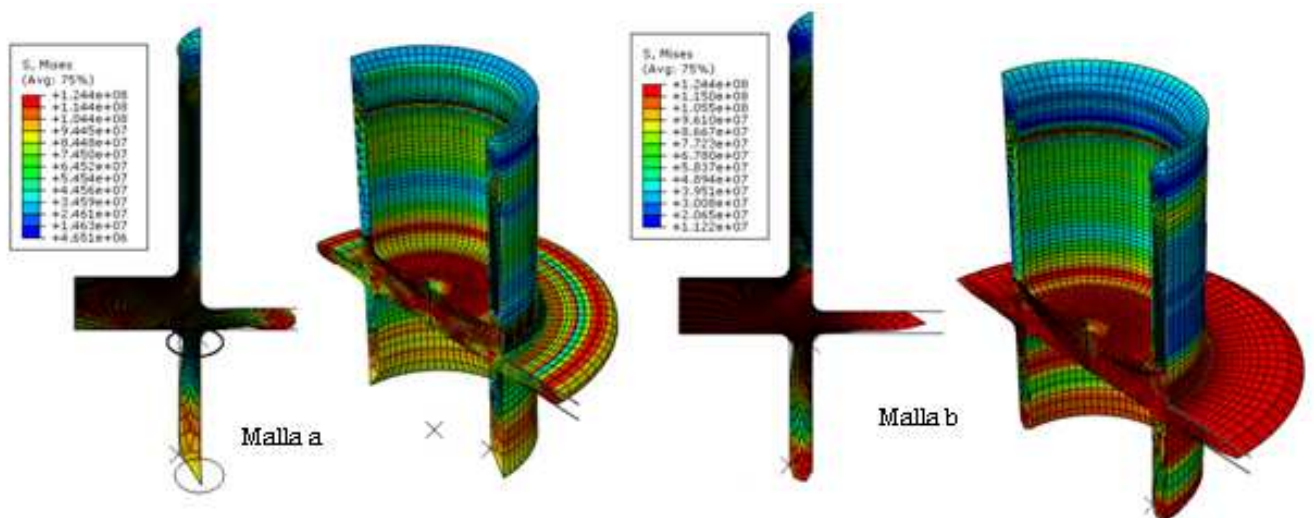


Figura 5.5: Fuerza de extrusión a través del desplazamiento del punzón para diferentes mallas.

Se observa que ciertos elementos se adhieren a la superficie de las herramientas lo que provoca que se deformen plásticamente en las últimas etapas del proceso sin desplazarse. Sin embargo puede atribuirse dicha cuestión a la resolución gráfica del sistema de visualización de Abaqus®, ya que la curva de *fuerza vs desplazamiento* y los valores máximos encontrados se aproximan al valor obtenido experimentalmente reportado en la literatura representado por la línea vertical en la figura 5.5.



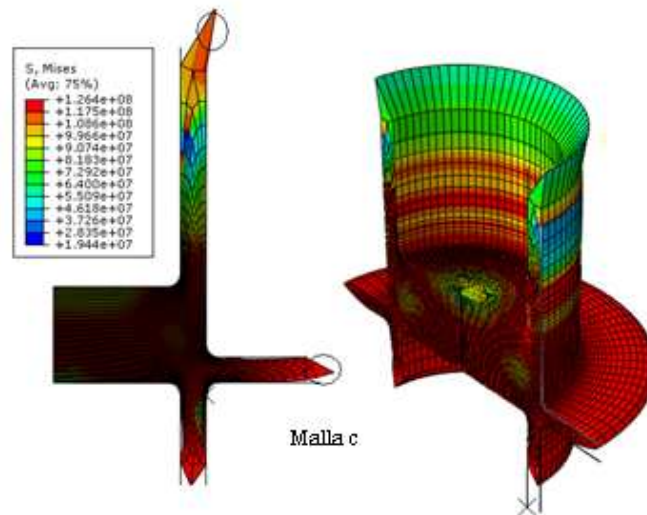


Figura 5.6: Distribución de esfuerzos para las diferentes mallas.

5.6 Mallado acoplado CEL

Las simulaciones tridimensionales existentes sobre los procesos de extrusión son escasas debido a que la distorsión que sufre la malla a lo largo del proceso es tal, que la refinación que se tiene que emplear genera costos computacionales que son simplificados con simulaciones axisimétricas. Sin embargo las nuevas capacidades de Abaqus 6.8 ® permiten acoplar las mallas eulerinas con el sistema de malla arbitrario lagrangiano. Esto significa que una malla de fondo establece de antemano por donde fluirá el material adoptando la definición de nodos y elementos que se encuentran fijos en el espacio.

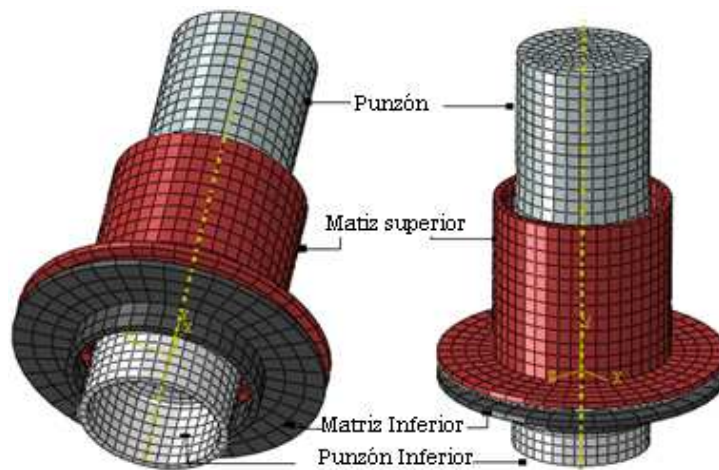


Figura 5.7: Ensamble del conjunto de herramientas para extrusión combinada empleando malla euleriana.

La construcción de la geometría y las condiciones mencionadas en el modelo general se utilizan para generar esta simulación tridimensional. En la *figura 5.7* se muestra la geometría de los elementos. La construcción de una malla estacionaria (euleriana) implica la asociación local de material creando una partición en el dominio (*capítulo 1*) a la cual se le asignan las

propiedades del material (*figura 5.8*) que se desea extruir mediante un campo predefinido en el estado inicial (*predefined field*).

Para este tipo de análisis (dinámico explícito) se emplea *contacto general* como la opción de interacción entre las superficies de las herramientas y el material; esta opción es una versión más extensa del contacto superficie a superficie del modelo axisimétrico.

Como se observa en el ensamble, el punzón superior e inferior se encuentran dentro de la malla euleriana; esta es una de las bondades del sistema planteado debido a que el análisis encuentra en el contacto entre la partición del dominio en la malla euleriana y las superficies deformables sin tener que hacer explícita dicha interacción.

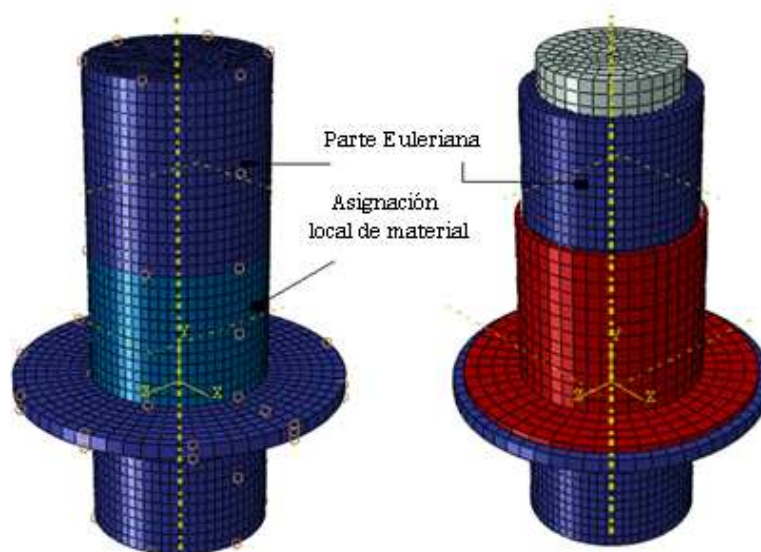


Figura 5.8: Ensamble del conjunto para extrusión combinada mediante la herramienta CEL.

En la *figura 5.9* se muestra la pieza final y algunas etapas del proceso a lo largo del recorrido del punzón. Se observa que los elementos de la malla permanecen estacionarios, y cambian su definición cuando el material pasa a través de ellos; algunos permanecen vacíos (sin definición del material) al final de la extrusión y se aprecian en color azul.

La parte más externa de la extrusión radial es una de las regiones más críticas en cuanto a deformación en el análisis axisimétrico y se observa en la *figura 5.6* que los nodos de dicha sección se desplazan mucho más que el resto, y si se compara la forma final con la de la *figura 5.1* se observan claras diferencias.

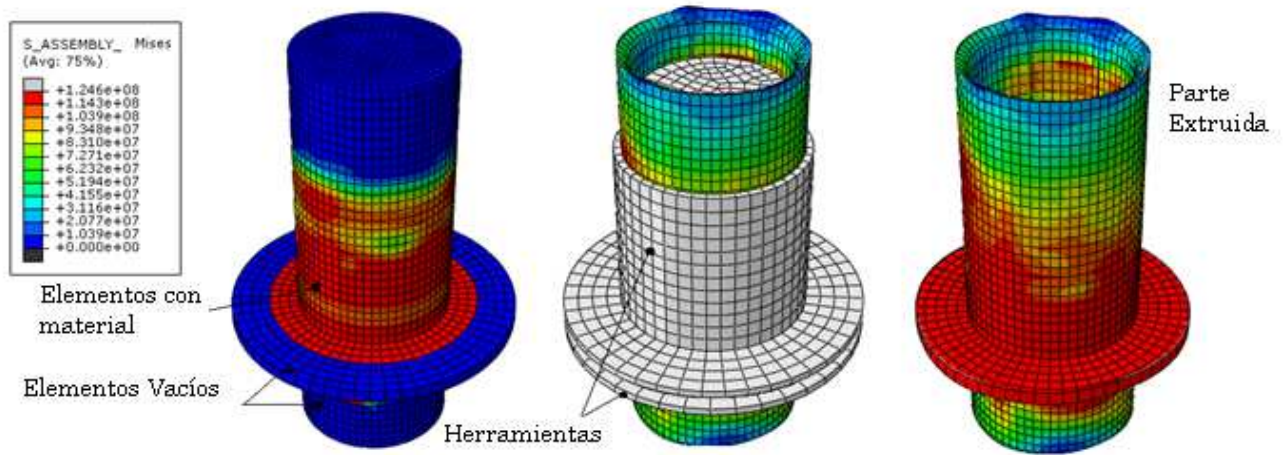


Figura 5.9: Forma final del proceso de extrusión combinada.

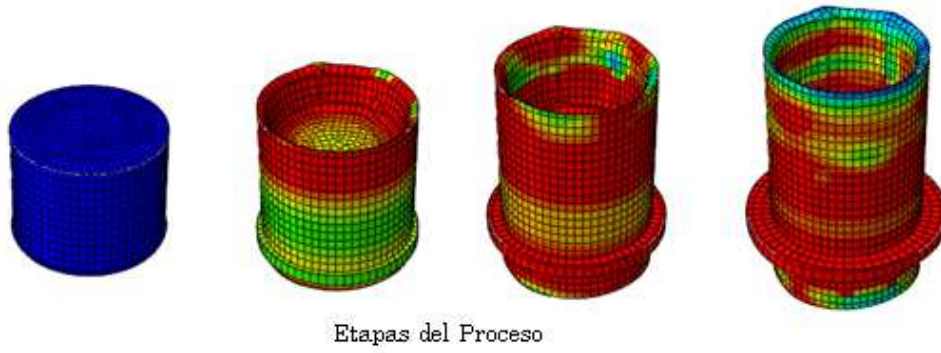


Figura 5.10: Etapas de la deformación en el proceso de extrusión combinado.

Capítulo 6

Conclusiones

La selección adecuada de la malla es de vital importancia cuando se trabaja dentro del entorno del método del elemento finito. Este trabajo mostró de forma satisfactoria la aplicación de la herramienta de mallado por mapeo, remallado arbitrario y acoplado lagrangiano-euleriano en varios procesos de extrusión.

Para el proceso de extrusión inversa axisimétrico la selección de elementos cuadriláteros produjo mejores resultados en comparación con el empleo de elemento triangulares con una misma cantidad de nodos cuando se utilizan dentro del análisis dinámico explícito, mostrando a diferencia de la malla planteada por Svendsen *et al.* para el caso de extrusión directa un mejor control de distorsión con los elementos de 4 nodos generados por mallado estructurado con múltiples particiones del dominio.

Sin embargo para el análisis del modelo mediante un paso estático, los elementos que mostraron una mayor capacidad para simular la extrusión inversa fueron los triangulares generados por malla estructurada o mallado libre.

La incorporación de una herramienta de remallado es necesaria cuando se desea analizar un proceso de extrusión, ya sea directa o combinada, dentro de un paso estático o dinámico. Dentro de las posibilidades existentes el sistema de mallado adaptativo arbitrario lagrangiano-euleriano mostró ser una herramienta versátil en análisis axisimétricos capaz de proveer una solución adecuada ante una variedad de condiciones.

La transferencia de resultados entre análisis de Abaqus Standard® mediante pasos estáticos extrapola tanto los esfuerzos como las deformaciones hacia una malla con una nueva topología, sin embargo, debido que el proceso de extrusión es fundamentalmente estacionario el cambio de conectividades hace que la convergencia del resultado más compleja; esto se mostró utilizando un paso estático y mapeo de solución.

La creación de una malla mediante partición de dominios e inserción de puntos fue capaz de representar el modelo gráfica y numéricamente aceptables comparados con los experimentos realizados por Barisic *et al.* Con la finalidad de hacer más eficiente el cálculo se compararon dos métodos dentro del paso dinámico explícito, para acelerar el análisis y disminuir los incrementos necesarios en que se obtiene la solución (*tabla 4.6, 4.7*). Entre dichas herramientas de aceleración se encuentra el factor de escalamiento de masa y el escalamiento de velocidad. Ambos mecanismos mostraron grandes divergencias en los resultados dentro de un rango de valores; sin embargo cuando se acota, los resultados muestran diferencias de entre 5 y 10% con respecto a un valor de experimental de referencia y con un ahorro computacional de 100 veces para el valor seleccionado ($1e^5$) con respecto al tiempo de procesador necesario sin herramientas de aceleración. Si bien es cierto que el tiempo

dependerá de la capacidad física del procesador, debido a que todos los análisis fueron ejecutados en una misma computadora pueden establecerse los valores comparativos para seleccionar un método de eficiencia computacional. Sin embargo la selección debe mantenerse dentro de un rango en el que la respuesta del sistema no se vea afectada por el incremento en los efectos inerciales que modifiquen drásticamente la respuesta del sistema; esto se aprecia en la *figura 4.21* para un tiempo de $1e^{-5}$ que provoca que el material siga fluyendo generando una estricción localizada aun cuando el punzón se ha detenido.

El coeficiente de fricción mostró una relación lineal con la carga de extrusión encontrándose un mínimo de 570[KN] contra un máxima de 934[KN] (*tabla 4.8*) empleando los valores de coeficiente de fricción que experimentalmente encontró Barisic *et al.* para la aleación utilizando el método de anillos de compresión. Sin embargo se observa que cuando se imponen condiciones de contacto adherentes ($\mu=1$) la carga de extrusión muestra un comportamiento diferente que con respecto a valores inferiores. En la simulación con los coeficientes de fricción ($\mu=0.15$ y $\mu=0.05$) se encontró una diferencia de 7.9% y 4.8% respectivamente comparado con el valor experimental

La *figura 4.24* muestra que la matriz tiene influencia en la carga de extrusión, así mismo ocurre una disminución en los esfuerzos generados en el material, debido a que el tiempo de contacto con la pared es menor. Con respecto a la geometría del punzón puede establecerse que la variación de la carga de extrusión se reduce cuando se incrementa el ángulo de la nariz (α), y es máximo cuando se utiliza una geometría plana. Cuando se compara una herramienta rígida con una deformable bajo una misma geometría es posible establecer que el costo de emplear una deformable si no se desean conocer los esfuerzos desarrolladas es de alrededor de 120% superior en incrementos necesarios. Sin embargo, se observa en la *figura 4.27* que la diferencia entre la carga cuando se emplean un punzón deformable contra uno analíticamente rígido es de alrededor del 27% mayor para la primera.

Para simular un proceso de extrusión, con flujo de material en varias direcciones, el análisis debe realizarse mediante los controles de remallado adaptativo ALE para lograr que el análisis se complete de forma satisfactoria. Así mismo, es importante mencionar que el flujo de material se lleva preferentemente por donde la resistencia es menor, por lo que cuando se realicen procesos de extrusión combinada debe tenerse especial atención en las dimensiones finales de la pieza, ya que si se necesitan tolerancias muy estrechas para el producto final y se desea evitar etapas posteriores de maquinado, es preferible utilizar matrices cerradas para extruir a costa de un incremento de carga.

Si la paquetería de elemento finito se utiliza como una herramienta para predecir la geometría final de una pieza, el sistema de mallado acoplado lagrangiano-euleriano es el más conveniente. Esta herramienta permite generar mallas estacionarias por donde el material fluye sin que esta se deforme. En este trabajo se han presentado los antecedentes necesarios para aplicar dicha herramienta a otros procesos de conformado mecánico ya que una causa común de la terminación de análisis por elemento finito es la correcta selección de la malla o la excesiva distorsión que se presenta en los elementos de la misma.

Bibliografía y Referencias

1. Alting Leo. *Procesos Para Ingeniería de Manufactura*, Ed. AlfaOmega, México, 1990.
2. ASM Handbook. *Metal Working: Bulk Forming 14A*, Ed. International Handbook Committee, E.U.A, 2000.
3. ASM International. *Physical Metallurgy for Engineers*, Ed. International Handbook Committee, E.U.A, 2000.
4. ASTM American Society of Tool and Manufacturing Engineers. *Fundamentals of Tool Design*, Ed. Prentice- Hall, E.U.A, 1970.
5. Avitzur Betazalel. *Metal Forming: Processes and Analysis*, Ed. McGraw-Hill, E.U.A, 1968.
6. Barisic B., Car Z., Ikoni M., *Modeling approach at determining of backward extrusion force on AlCu5PbBi material*, Metalurgija, Croacia, 2004.
7. Bauser Martin, Sauer Günther, Klaus Siegert. *Extrusion*, Ed. ASM International, E.U.A, 2006.
8. Bay N., B. Bennani., *Limits of lubrication in backward can extrusion: Analysis by the finite-element method and physical modelling experiments*, Journal of Materials Processing Technology, Francia, 1994.
9. Bel D, Pérez Del Palomar A., *Simulación de flujos de extrusión de perfiles de aluminio con Abaqus*, 5º Congreso Español de Usuarios de Abaqus, España 2005.
10. Crane E.V. *Plastic Working of Metals and Non-Metallic Materials in Press*, Ed. John Wiley & Sons, E.U.A. 1960.
11. Davis Joseph R. *Tool Materials Handbook Committee*, Ed. ASM International, E.U.A 1995.
12. DeGarmo E. Paul, Black J. Temple, Kohser Ronald A. *Materiales y procesos de fabricación*, Ed. Prentice Hall, México 1990.
13. Dieter George E. *Mechanical Metallurgy*, Ed. Mc Graw-Hill, E.U.A 1970.

14. Farhoumand A., Ebrahimi R. *Analysis of forward–backward-radial extrusion process*, Materials and Design, Irán, 2008.
15. Fereshteh-Saniee F., Pillinger I., Hartley P., *Friction Modelling for the physical simulation of the bulk metal forming processes*, Journal of Material Processing Technology, Reino Unido, 2004.
16. Frisch J. and Thomsen. E.G, *An experimental Study of Metal Extrusion at various Strain Rates*, ASTM, 1975.
17. Hortig C., Kayser T., Parvizian F., Svendsen B., *Thermomechanical modeling and simulation of aluminum alloy behavior during extrusion and cooling*, Journal of materials processing technology, Alemania 2008.
18. Frey Pascal Jean, George Paul-Louis, *Mesh Generation. Applications to finite Element*, Hermes Science, Reino Unido, 2000.
19. Kalpakjian Serope. *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, Ed. Addison-Wesley Company, E.U.A., 1995.
20. Krishna Uyyuru Rama, Valberg Henry. *Physical and numerical analysis of the metal flow over the punch head in backward cup extrusion of aluminum*, Journal of Materials Processing Technology, Noruega, 2005.
21. Lange Kurt. *Handbook of Metal Forming*, Ed. Mc Graw Hill, E.U.A., 1985.
22. Obayashi Shiro, Soo-ik Oh, Taylan Altan. *Metal Forming and the Finite-Element Method*, Ed. Oxford University Press, Nueva York 1990.
23. Parkins R.N. *The extrusion of Metals* .Pearson, 2ª Ed. John Wiley & Sons, E.U.A., 1970.
24. Pradip Saha. *Aluminum extrusion technology*, Ed. ASM International, Reino Unido, 2000.
25. Rase Howard F. *Diseño de Tuberías para Plantas de Procesos*, Ed. Blume, España 1970.
26. Robert E. Reed-Hill. *Principles of Physical Metallurgy*, Ed. Continental, E.U.A., 1980.
27. Rowe G.W, Strurgess C.E., Hartley P. *Finite-element plasticity and Metal forming analysis*, Ed. Cambridge University Press, Reino Unido 1991.
28. Sheppard E., *Extrusion of Aluminum Alloys*, Ed. Springer. E. U.A., 1999
29. Simulia. *Abaqus Documentation V 6.8*, 2006.

30. Tisza Anglada M., Staff VV, L. Llanes. *Fractura de materiales*, Ed. Universidad Politécnica de Cataluña, España, 2002.
31. Totten George E., MacKenzie Scott D. *Handbook of Aluminum. Vol 1. Physical Metallurgy and Processes*, CRC Press, E.U.A, 2003.
32. William F., Canddell Robert M. *Metal Forming, Mechanics and Metallurgy*, Ed. Prentice-Hall, E.U.A., 1983.