

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Aeroespacial

Estudio del llenado de la matriz en procesos de extrusión por elementos finitos

Autor: Enrique Jesús Fernández Camacho

Tutor y publicador: Francisco Javier Doblas Charneco

Tutor: Luis Valentín Bohórquez Jiménez

Dpto. de Ingeniería Mecánica y Fabricación
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Aeroespacial

Estudio del llenado de la matriz en procesos de extrusión por elementos finitos

Autor:

Enrique Jesús Fernández Camacho

Tutor y publicador:

Francisco Javier Doblás Charneco

Profesor Contratado Doctor Interino

Tutor:

Luis Valentín Bohórquez Jiménez

Profesor Contratado Doctor

Dpto. de Ingeniería Mecánica y Fabricación
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020

Trabajo Fin de Grado: Estudio del llenado de la matriz en procesos de extrusión por elementos finitos

Autor: Enrique Jesús Fernández Camacho

Tutor y publicador: Francisco Javier Doblado Charneco Tutor: Luis Valentín Bohórquez Jiménez

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

Resumen

En este trabajo se ha estudiado el proceso de llenado de las matrices de extrusión en operaciones de extrusión directa. El interés principal del estudio radica en determinar el punto en el recorrido del pistón en el cual se produce la fuerza máxima ejercida por el pistón.

Para este estudio se ha utilizado DEFORM 2D, un programa de elementos finitos orientado a la simulación de procesos de fabricación. Con él se han llevado a cabo simulaciones de operaciones de extrusión directa en frío con el objetivo de poder analizar la evolución de ciertas variables dependientes de interés (fuerza ejercida por el pistón, velocidad de deformación, velocidad cinemática, etc.) en función de ciertas variables independientes (relación de extrusión y ángulo de la matriz de extrusión) y poder extraer conclusiones sobre los fenómenos que ocurren en el proceso de llenado de la matriz de extrusión.

Abstract

In this project, the filling process of extrusion dies in direct extrusion operations has been studied. The main interest of the study lies in determining the point in the piston stroke at which the maximum force is exerted by the piston.

For this study, DEFORM 2D, a finite element program, was used oriented to the simulation of manufacturing processes. With it, simulations of cold direct extrusion operations has been carried out in order to be able to analyze the evolution of certain dependent variables of interest (force exerted by piston, strain rate, kinematic velocity, etc.) as a function of certain independent variables (extrusion ratio and angle of the extrusion die) and to be able to draw conclusions about the phenomena that occur in the extrusion die filling process.

Índice

<i>Resumen</i>	I
<i>Abstract</i>	III
1 Introducción	1
1.1 La extrusión: breve perspectiva histórica	1
1.2 DEFORM 2D	1
1.3 Objetivos del TFG	1
1.4 Estructura de la memoria	2
2 Marco teórico	3
2.1 Conformado por deformación plástica de metales	3
2.1.1 Perspectiva del conformado plástico de metales	4
2.1.2 Comportamiento del material en el conformado	5
2.1.3 Temperatura en el conformado plástico de metales	7
2.2 La extrusión	8
2.2.1 Tipos de extrusión	8
Según el flujo de material	8
Según la temperatura	9
2.2.2 Análisis de la extrusión	9
3 Problema bajo estudio	13
4 Obtención de resultados	15
4.1 Existencia de la zona muerta	17
4.2 Retraso del máximo de la fuerza	18
5 Análisis de los resultados	21
5.1 Retraso del máximo de la fuerza ejercida por el pistón	21
5.1.1 Teorema de Clapeyron	21
5.1.2 Explicación del retraso del máximo de la fuerza ejercida por el pistón	22
5.1.3 Influencia en el resultado de las variables en juego	24
5.2 Zona muerta durante el proceso de extrusión	26

6 Conclusiones y propuestas de mejora	29
7 Anexos	31
7.1 Gráficas referentes a la fuerza y el desplazamiento	32
7.2 Gráficas referentes a la zona muerta	38
7.3 Gráficas referentes a las velocidades de deformación	44
7.4 Recopilación del conjunto de resultados obtenidos	50
<i>Índice de Figuras</i>	51
<i>Índice de Tablas</i>	53
<i>Bibliografía</i>	55

1 Introducción

1.1 La extrusión: breve perspectiva histórica

La extrusión es un proceso utilizado para crear objetos con sección transversal definida y fija. El material se carga en un contenedor y es forzado por un pistón a salir a través de una matriz cuyo diámetro es menor que el diámetro de la sección transversal de material, obteniendo así la sección transversal deseada.

El origen de este método de fabricación data del año 1797, año en el que el inventor y cerrajero inglés Joseph Bramah patentó el primer proceso de extrusión. Este proceso se ha empleado y se continúa empleando para diversas aplicaciones tanto a nivel industrial como a nivel artesanal. Además, no se utiliza solo para metales como originariamente se hizo, sino que también se emplean termoplásticos, termoendurecibles y elastómeros. A pesar de esa primera patente, no fue hasta 1820, cuando Thomas Burr construyó la primera prensa hidráulica, y más adelante en 1894 Alexander Dick expandió el proceso de extrusión al cobre y aleaciones de bronce.

1.2 DEFORM 2D

En cuanto al software utilizado, se ha empleado una versión bidimensional del paquete DEFORM, software de elementos finitos orientado a procesos de fabricación, que permite simular de forma más sencilla operaciones con simetría de revolución, como la extrusión directa de productos de sección transversal circular. Concretamente se ha empleado la plantilla DEFORM-F2, orientada al análisis de procesos de extrusión, y con el cual se ha optimizado el tiempo de preparación de las simulaciones por el hecho de ser una plantilla [5].

1.3 Objetivos del TFG

En el siguiente documento se va a tratar de explicar y analizar los sucesos que tienen lugar en el proceso de llenado de las matrices correspondientes al proceso de fabricación de la extrusión. Para ello, se hará uso de la herramienta DEFORM 2D, un software basado en elementos finitos que permitirá analizar que le ocurren a las variables más relevantes

del problema en cuestión, para así sacar conclusiones acerca de lo que sucede durante el proceso, tanto al material, como a la fuerza que ejerce el pistón que somete al material a fluir a través de la matriz.

1.4 Estructura de la memoria

En lo que sigue de documento, se muestra en el Capítulo 2 un marco teórico en el que se realiza una breve introducción de los procesos de fabricación y se profundiza en la extrusión, ya que es el que resulta de interés para este proyecto. En el siguiente, el Capítulo 3 se explica cual es el problema que se va a estudiar, así como las condiciones bajo las cuales se van a realizar las diferentes simulaciones y los análisis pertinentes. Más adelante, en el Capítulo 4 se explica como se han obtenido los resultados, y se limita a explicar cuáles son los resultados y qué es aquello que se observa en ellos, sin entrar en ningún tipo de explicación técnica. A continuación, se ha incluido en el Capítulo 5 el análisis de los resultados obtenidos, así como la explicación teórica de lo obtenido de las simulaciones y la influencia que tienen las variables en juego en dichos resultados. Y, por último, en el Capítulo 6 se muestran las conclusiones y futuros trabajos a realizar respecto al estudio del llenado de matrices de extrusión.

2 Marco teórico

2.1 Conformado por deformación plástica de metales

[2] Para este apartado, se ha empleado la referencia de Groover, la cual va a permitir desarrollar casi en su totalidad el marco teórico de este trabajo. El conformado de metales se constituye por varios procesos de fabricación en los que se emplea la deformación plástica para así modificar la forma del tocho de material en cuestión.

Dicha deformación se realiza a través de herramientas como una matriz, el cual permite la aplicación de grandes esfuerzos en el material, para así exceder el límite de fluencia y llegar al comportamiento plástico deseado para que el material obtenga la forma de dicha matriz.

El conformado de metales es el tipo de operación que domina dentro de los procesos de conformado plástico. Para su encuadre y ponerlo en contexto se muestra a continuación un esquema que expone claramente los diferentes procesos de fabricación.

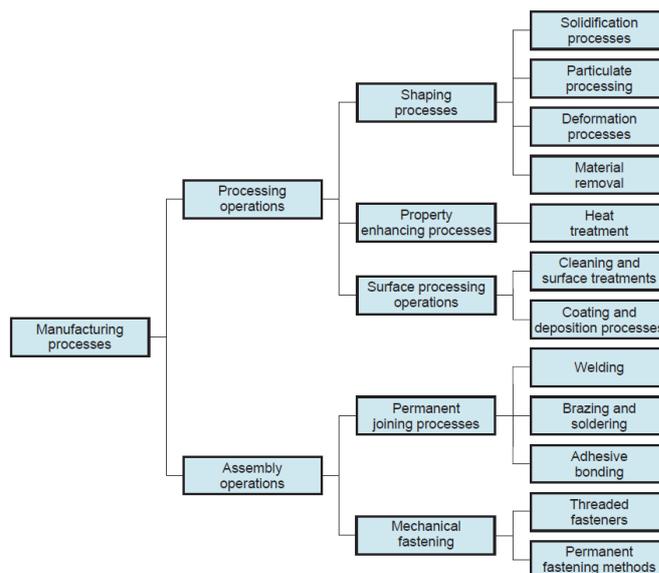


Figura 2.1 Clasificación de los procesos de fabricación.

En general, se aplica el esfuerzo de compresión para deformar plásticamente el metal. Sin embargo, algunos procesos de conformado estiran el metal, mientras que otros lo doblan y otros más lo cortan. Para formar exitosamente un metal, éste debe poseer propiedades como la baja resistencia a la fluencia y alta ductilidad, las cuales pueden verse afectadas por la temperatura. Por ejemplo, la ductilidad se incrementa y la resistencia a la fluencia se reduce cuando aumenta la temperatura de trabajo.

El efecto de la temperatura da lugar a la distinción entre trabajo en frío, trabajo en caliente por debajo de la temperatura de recristalización y trabajo en caliente. La velocidad de deformación y la fricción son factores adicionales que afectan el desempeño del conformado de metales. En este capítulo se examinarán dichos aspectos, pero primero se da una visión general de los procesos de conformado de metales.

2.1.1 Perspectiva del conformado plástico de metales

Para tener una perspectiva clara del mundo del conformado plástico de metales, es necesario mostrar la clasificación de los diferentes tipos de conformado que existen en la actualidad, los cuales se muestran en el siguiente esquema.

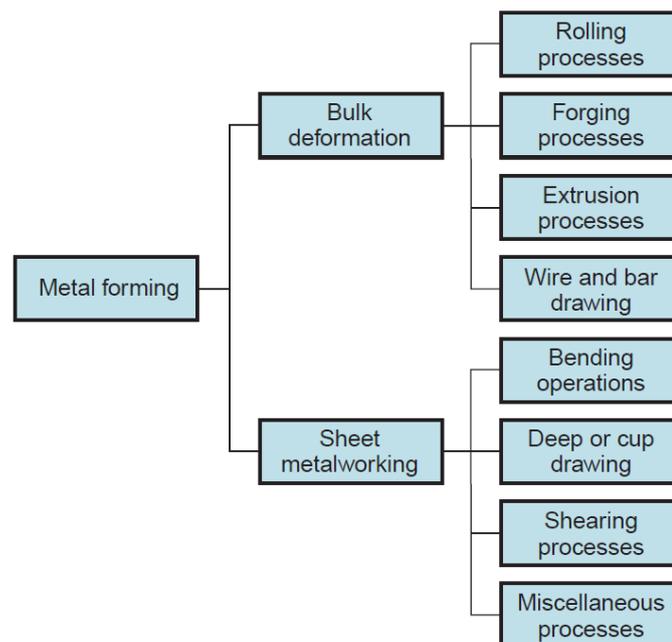


Figura 2.2 Clasificación de los procesos de conformado de metales.

Por un lado se encuentran los *procesos de deformación volumétrica*, los cuales se caracterizan por grandes deformaciones y cambios de forma, y además la relación del área superficial y del volumen de trabajo es relativamente pequeña. Estos a su vez se dividen en:

- Laminación.

Es un proceso de deformación por compresión, realizada por dos rodillos, la cual es utilizada para reducir el espesor de una plancha de un material determinado.

- Forjado.
Se realiza una compresión mediante dos matrices opuestas, de manera que la pieza final toma la forma de la matriz.
- Extrusión¹.
Es un proceso de compresión en el cual se fuerza el metal de trabajo a fluir a través de una matriz, la cual posee una forma específica, obteniendo así una forma de la sección transversal, determinada.
- Estirado.
Consiste en la reducción del diámetro de un alambre o barra de un material, haciendo pasar estos por la abertura de una matriz.

Por otro lado están los llamados *procesos de conformado plástico de chapa* los cuales se caracterizan por grandes relaciones área superficial y volumen, y se utilizan sobre todo para conformado de láminas, tiras y rollos de metal. Dichos procesos, al igual que los mencionados previamente, se clasifican en:

- Doblado.
Implica la deformación de una lámina metálica o placa para que adopte un ángulo determinado.
- Embutición.
Consiste en la transformación de una lámina plana de metal en una forma hueca o cóncava mediante el estirado del metal.
- Procesos misceláneos.
Incluye procesos de conformado que no utilizan herramientas de prensado y matrices. Como ejemplos de estos procesos se encuentran el conformado recto y doblado laminar entre otros.

2.1.2 Comportamiento del material en el conformado

En la actualidad existen muchos modelos que sirven para caracterizar el comportamiento de los materiales durante cualquier tipo de ensayo o proceso.

En el caso que compete, la curva esfuerzo-deformación es una buena muestra que permite comprender el comportamiento de los metales durante su proceso de conformado plástico. En la mayoría de los metales, esta curva tiene una región elástica y una región plástica, las cuales son fáciles de diferenciar como se observa en la figura 2.3.

¹ Sobre esta cuestión se profundizará en el siguiente apartado, pues es de especial interés de cara a la investigación que se va a llevar a cabo.

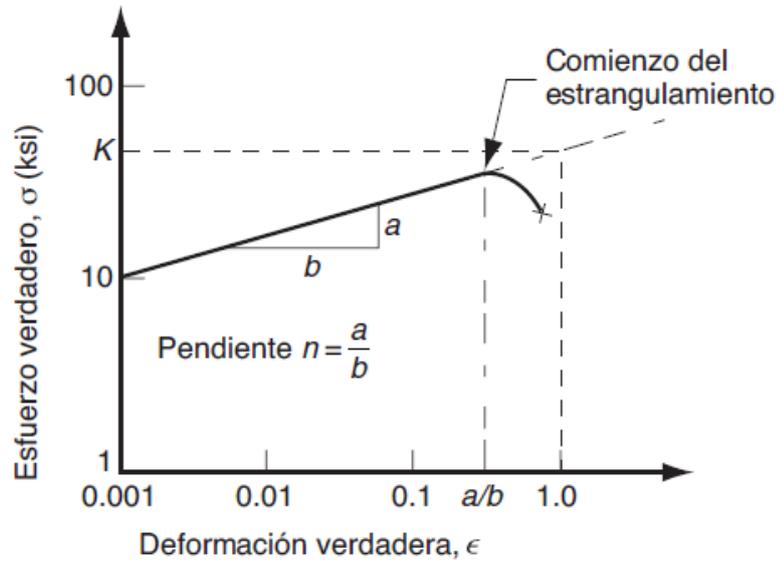


Figura 2.4 Curva esfuerzo vs deformación.

Para tener una idea del orden de magnitud tanto del coeficiente de resistencia como del exponente de endurecimiento por deformación, se muestran valores típicos de una serie de materiales en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Valores característicos del coeficiente de resistencia K y del exponente de endurecimiento por deformación, n, para metales seleccionados..

Material	K(MPa)	n
Aluminio puro cocido	175	0.20
Cobre,puro,templado	300	0.5
Acero, bajo C, templado	500	0.25
Acero, aleación, templado	700	0.15
Acero, inoxidable, austenítico, templado	1200	0.40

2.1.3 Temperatura en el conformado plástico de metales

La curva de fluencia representada en la figura 2.3 es una representación válida del comportamiento esfuerzo frente a deformación de un metal durante su deformación plástica, particularmente en operaciones de trabajo en frío. Además, el problema bajo estudio se realiza en frío por lo que no se ahondará en profundidad en este tema pues no es de interés.

A pesar de todo, la temperatura es un factor que hay que tener en cuenta a la hora de considerar un proceso de conformado, ya que valores como el coeficiente de resistencia del material o el exponente de endurecimiento por deformación dependen de la temperatura.

2.2 La extrusión

La extrusión es un proceso de conformado por compresión en el cual el metal de trabajo es forzado a fluir a través de una matriz que le proporciona una forma determinada a la sección transversal de la preforma de material. Las ventajas de los procesos modernos incluyen:

1. Permiten la obtención de una gran diversidad en las formas de las secciones transversales antes comentadas, especialmente con extrusión en caliente, aunque la forma elegida ha de mantenerse constante durante toda la pieza.
2. Mejora sustancial de la estructura de grano interna del material y de las propiedades de resistencia.
3. La extrusión en frío permite tolerancias pequeñas.
4. El desperdicio de material es mínimo.

2.2.1 Tipos de extrusión

Al pensar en la extrusión, puede que venga a la mente una manera concreta. La realidad es que existen diversas formas de extruir un material atendiendo a la configuración física, a la temperatura de trabajo o al flujo de material.

Según el flujo de material

- **Extrusión directa** La extrusión directa es aquella en la que un tocho de metal se carga en un recipiente o contenedor, y un pistón comprime el material forzándolo a fluir a través de una matriz que se encuentra en el lado opuesto del contenedor respecto al pistón, y en el mismo sentido de la marcha del pistón. En el caso de la Figura 2.5 obtenida de [3] se trata de una matriz que posee un ángulo de 90 grados respecto a la dirección en la que fluye el material.

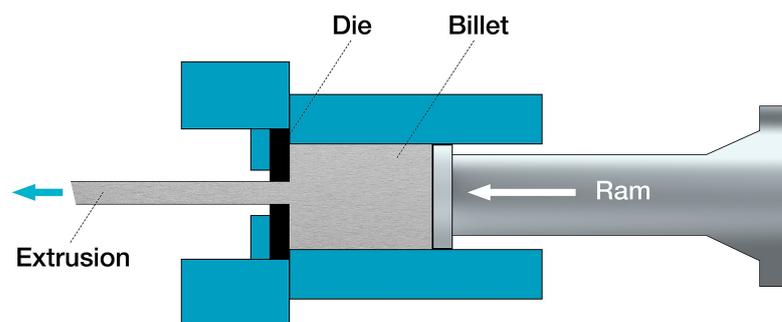


Figura 2.5 Esquema de la extrusión directa.

El gran problema que presenta, es la gran fricción existente entre la preforma y el contenedor en el que este se encuentra y, por ende, la necesidad de una mayor fuerza en el pistón para el proceso. En contraposición, este tipo de extrusión permite la fabricación de piezas huecas.

- **Extrusión indirecta** En este caso, la matriz está montada sobre el pistón, de manera que el sentido que este tiene es contrario al flujo de material, el cual no se mueve

respecto al contenedor, evitando así la fuerza de fricción y por consiguiente, la fuerza que debe ejercer el pistón es menor.

Según la temperatura

- **Extrusión en caliente**

Se da cuando se ha sometido la preforma a un aumento de su temperatura hasta alcanzar una superior a la temperatura de recristalización, ya que de esta manera se consigue reducir la resistencia del material y aumentar su ductilidad. Esta modificación de las propiedades del material gracias a la aportación de calor permitirá unas reducciones de tamaño mayores y la obtención de formas más complejas.

Este tipo de aplicación presenta una serie de ventajas como son la reducción de la fuerza del pistón y una mayor velocidad del mismo. En contraposición, el gradiente de temperaturas que existe en las zonas de contacto entre el tocho y la matriz, puede ser un problema, por lo que a veces se opta por una extrusión isotérmica o la aplicación de un lubricante que minimice los problemas que la extrusión en caliente puede acarrear.

- **Extrusión en frío**

En cuanto a la extrusión en frío o la extrusión a aquella temperatura que está por debajo de la de recristalización, se puede decir que es utilizada para producir piezas discretas casi terminadas, evitando así el procesamiento continuo.

Este tipo de aplicación posee ventajas primordiales como son: una mayor resistencia debido al endurecimiento por deformación, es plausible para la producción de piezas con tolerancias más estrechas y permite mejores acabados superficiales, pues al no haber altas temperaturas, no se generan esas capas de óxido; y, por último, favorecen altas velocidades de producción.

2.2.2 Análisis de la extrusión

Para el análisis, se tendrá en cuenta un tocho de material de sección transversal circular, que se hará pasar por una matriz que reducirá su diámetro y que permitirá un estudio de la evolución de las velocidades de deformación, tensiones y deformaciones que sufre el material en su paso por la matriz. Para dicho análisis se tendrán en cuenta una serie de parámetros que permitirán caracterizar todas y cada una de las simulaciones que se realizarán (ver Figura 2.6). Los parámetros que se tendrán en cuenta y que son en definitiva, las variables independientes serán: la relación de extrusión y el ángulo de la matriz.

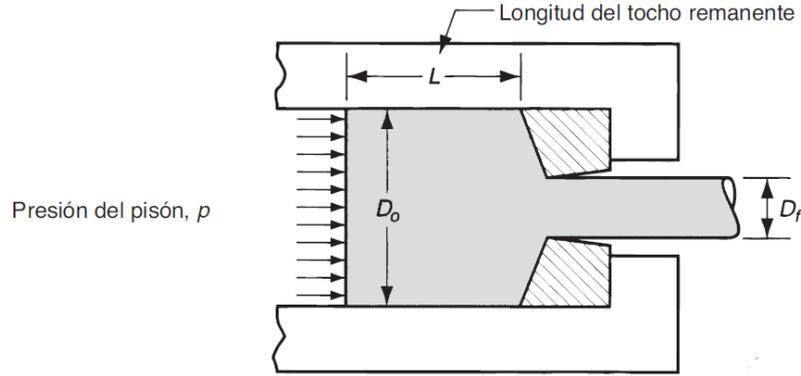


Figura 2.6 Parámetros característicos de la extrusión directa.

La relación de extrusión se define como:

$$r_x = \frac{A_0}{A_f} \quad (2.3)$$

Donde r_x es la relación de extrusión, A_0 es el área inicial del tocho de material y A_f el área transversal del material tras su paso por la matriz. El valor de r_x es importante, pues nos permite hallar el valor de la deformación que sufre el material para el caso ideal sin fricción y sin trabajo redundante, la cual viene definida como

$$\varepsilon = \ln r_x = \ln\left(\frac{A_0}{A_f}\right) \quad (2.4)$$

Por otro lado, la presión ejercida por el pistón en condiciones ideales se puede definir como sigue

$$P = \bar{Y}_f \ln r_x \quad (2.5)$$

donde \bar{Y}_f es el esfuerzo de fluencia promedio del material en cuestión durante la deformación. Si además incluimos la expresión 2.2 pero para la tensión de fluencia promedio en la fórmula, la presión resultaría:

$$P = \frac{K \varepsilon^n}{1+n} \ln r_x \quad (2.6)$$

Comentar que esta presión es menor que la real, pues no se está teniendo en cuenta la fricción que existe en la extrusión directa. En el estudio que se va a llevar a cabo las magnitudes de interés que son la deformación, la fuerza del pistón o las tensiones serán calculadas a través del programa DEFORM 2D.

En cuanto a la presión de más que se debe ejercer para superar esa fricción existente en la extrusión directa, podemos aislar dicha fuerza de fricción obteniendo la siguiente expresión:

$$\frac{p_f \pi D_0^2}{4} = \mu p_c \pi D_0 L \quad (2.7)$$

Donde p_f es la presión adicional requerida para superar la fricción, $\frac{\pi D_0^2}{4}$ es la sección transversal inicial del tocho de material, μ es el coeficiente de fricción en la pared del

contenedor, p_c es la presión del tocho contra la pared del contenedor, y $\pi D_0 L$ es el área de la interfaz entre el tocho y la pared del recipiente. Conociendo cada término, se puede entender fácilmente que el miembro derecho es la fuerza de fricción que se produce entre el tocho de material y el contenedor, y por tanto, el miembro izquierdo es la fuerza adicional que debe ejercer el pistón. El caso que se va a estudiar y se plasmará en este documento, es el caso más desfavorable, referente a la adherencia, donde el esfuerzo de fricción iguala la resistencia a la fluencia cortante del metal de trabajo,

$$\mu p_c \pi D_0 L = Y_s \pi D_0 L \tag{2.8}$$

donde Y_s es la resistencia a la fluencia cortante. Si además, asumimos que $Y_s = \frac{\bar{Y}_f}{2}$ y, por tanto, $P_f = \bar{Y}_f \frac{2L}{D_0}$, podemos reescribir lo siguiente:

$$p = \bar{Y}_f \left(\epsilon_x + \frac{2L}{D_0} \right) \tag{2.9}$$

donde el término $\frac{2L}{D_0}$ representa la presión adicional debida a la fricción en la interfaz contenedor-tocho, L es la longitud del tocho remanente para la extrusión (ver Figura 2.6) y D_0 el diámetro inicial del tocho. Observar que la presión disminuye con la longitud remanente, pues conforme ésta disminuye la fuerza de fricción también lo hace.

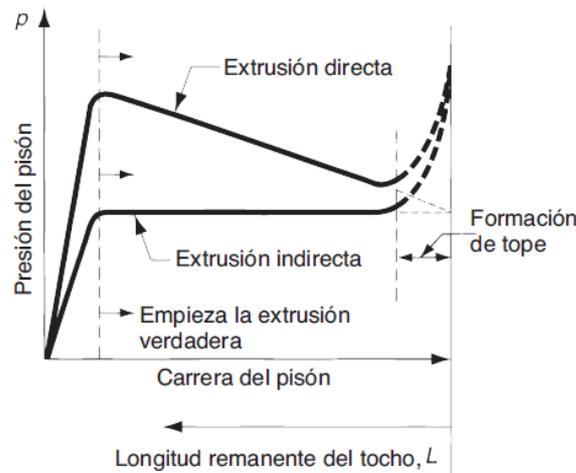


Figura 2.7 Curva presión vs desplazamiento.

En efecto, en la gráfica se observa esa disminución. No obstante en este documento se estudiará el proceso de llenado de la matriz para saber claramente cuando y donde se produce el máximo de esa presión, por lo que se estudiará hasta desplazamientos relativamente superiores al llenado de la matriz. Para terminar cabe indicar que la fuerza que ejerce el pistón y la potencia requerida por éste para la extrusión quedan definidas de la siguiente manera:

$$F = pA_0 \qquad P = Fv_{piston}$$

3 Problema bajo estudio

El problema que se va a analizar como ya se ha adelantado es el llenado de la matriz en el proceso de extrusión. Este proceso, constará de una preforma cilíndrica que será forzada a fluir a través de una matriz troncocónica, cuyo diámetro final es menor que el de la preforma, y lo hará gracias a un trabajo que realizará el pistón.

El caso que compete, se analizará a través del software DEFORM 2D, suponiendo simetría axial en torno al eje longitudinal del problema (ver línea discontinua de color naranja en la Figura 3.1), de manera que lo que ocurre en una sección es lo que sucede en todo el material siempre y cuando tomemos un punto que equidista al eje de simetría y se encuentra en el mismo plano horizontal (tomando la referencia de la Figura 3.1).

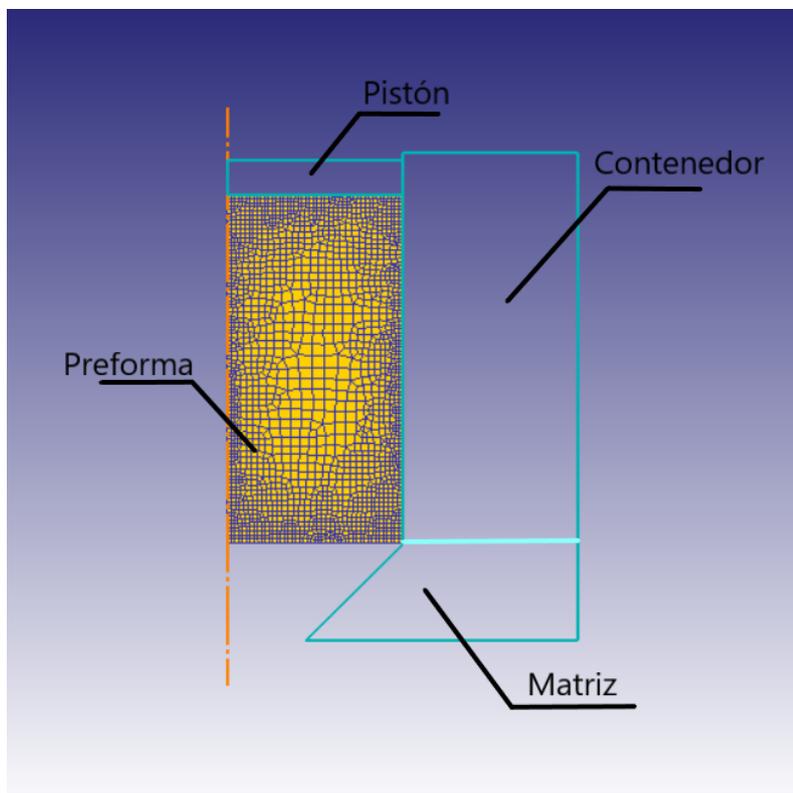


Figura 3.1 Esquema del problema en cuestión.

Podemos observar en el esquema (ver Figura 3.1) que se trata de una sola sección la cual refleja lo que ocurre en el espacio 3D sin más que haciendo una simetría de revolución en torno al eje naranja de líneas discontinuas que aparece en la imagen.

Como se ha comentado anteriormente, una de las mayores desventajas que presenta este proceso es la fricción que se produce entre el tocho de material cilíndrico y las paredes del contenedor. Es por ello, que hay que tenerla en cuenta, de manera que para simplificar el problema se ha considerado condición de adherencia (valor del factor de fricción igual a 1), es decir, el valor para el que el esfuerzo de fricción iguala a la resistencia a la fluencia cortante del metal de trabajo, y por tanto, la situación más desfavorable.

Fijado este parámetro, queda entonces ver la influencia que tienen tanto el ángulo de la matriz como la relación de extrusión en dos aspectos determinados: el retraso del máximo de la fuerza del pistón sobre la preforma y la zona muerta que se forma en la matriz.

- **Retraso del máximo de la fuerza**

En primer lugar, según la literatura, el máximo de la fuerza que debe ejercer el pistón durante todo el proceso coincide con el momento en el que se completa el llenado de la matriz (ver Figura 2.7). Para ello se realizarán una serie de simulaciones en el software DEFORM 2D, concretamente empleando la plantilla DEFORM-F2, para observar realmente cuando se produce dicho máximo y también que influencia tienen en este resultado, el ángulo de la matriz y la relación de extrusión seleccionada.

- **Zona muerta**

Debido a la fricción existente entre el material y la pared del contenedor, en las capas más externas del tocho, el material fluye mucho más lento que en la zona interna del mismo. Por lo tanto, se observa que la deformación es el resultado de desplazamientos relativos entre las diferentes capas de material que se suceden a lo largo de la dirección perpendicular del eje de simetría. De hecho, las capas del producto final que más deformaciones han sufrido son aquellas situadas entre las superficies más externas. La deformación existente en las capas centrales es unas dos veces menor que las capas localizadas cerca de la superficie externa de la pieza final. Todo esto genera un campo de tensiones que no es uniforme y con ello se deduce que la pieza final no posee propiedades isotrópicas [4].

En cuanto a las dimensiones de la zona muerta producida en la matriz, se puede decir «a priori» que cuanto mayor sea el ángulo de la matriz, más difícil es de extrusionar el material, pues se reduce la presión transversal que se ejerce sobre la preforma y por tanto ésta es mayor. No obstante, más adelante se estudiará su dimensión y la influencia que esta tiene en el flujo de material durante el proceso.

4 Obtención de resultados

El objetivo primordial de este apartado se basa en mostrar los resultados y comentar aquello que se observa de manera objetiva, de manera que para más adelante se mostrarán los porqués y motivos de dichos resultados, así como sus conclusiones. Como se ha comentado anteriormente, el objeto de este documento es la discrepancia teórica y real (simulada en lo que a este estudio se refiere) del momento en el que ocurre el máximo de fuerza que ejerce el pistón sobre el tocho de material. Lo que se sospecha en primera instancia es el retardo que este máximo va a tener y que influencia tienen tanto la relación de extrusión, como el ángulo de la matriz en su valor.

Para ello se han realizado un total de 36 simulaciones, referentes a todas las combinaciones posibles entre las dos variables influyentes. De esta manera hemos barrido el ángulo de la matriz para los valores 15, 30, 45, 60, 75 y 90 grados acotando así superior e inferiormente todas los valores posibles (excepto el 0, pues esto sería la situación de no extrusión) y con respecto a las relaciones de extrusión, para las aleaciones están limitadas superiormente a 35 y 100 según sean «hard alloys» o «soft alloys». En nuestro caso al emplear una ley de comportamiento asociado a un material con buen comportamiento plástico y viendo que las relaciones de extrusión están acotadas superiormente por el límite máximo de fuerza aplicable por el pistón, se ha decidido escoger un rango pragmático de valores de cara al análisis que vamos a realizar, así, los valores seleccionados han sido 2, 3, 4, 5, 6 y 7. Las condiciones bajo las cuales se han llevado a cabo dichas simulaciones y se han realizado los análisis de la extrusión son las siguientes:

- Proceso de conformado en frío.
- Para la definición del rozamiento la plantilla DEFORM-F2, sólo permite introducir un valor numérico, por ello se ha escogido el factor de fricción igual a uno (modelo de Tresca¹), correspondiéndose así a condiciones de adherencia [5].
- Velocidad de avance del pistón de $150 \frac{mm}{sec}$, valor por defecto pues no influye en los resultados que son importantes para el problema bajo estudio.

¹ Se basa en la suposición de que, en estado de flexibilidad, la tensión de cortadura máxima en todos los puntos de un medio es la misma y equivale a la mitad del límite elástico obtenido de una prueba de tensión uniaxial para el materials

- Material cuya ley de comportamiento es la siguiente:

$$\bar{\sigma} = c\bar{\epsilon}^n \epsilon^m + y \quad (4.1)$$

donde m e y toman el valor nulo, $c = 600$ y $n = 0.25$. Valores con los cuales se va a realizar el análisis del proceso de extrusión y han sido seleccionados tomando como referencia los valores típicos expuestos en la Tabla 2.1.

De todas y cada una de las simulaciones se han obtenido las gráficas de carga del pistón frente a desplazamiento del mismo, y se ha obtenido de dicha información el retraso absoluto del máximo de la fuerza. Además de ello, se han obtenido animaciones de todas las simulaciones donde se muestra la evolución de las velocidades de deformación que sufre el material a su paso por el contenedor y la matriz. Y por último, también para todos los ángulos se ha obtenido una animación de la evolución de las velocidades cinemáticas totales que sufren los diferentes elementos del mallado realizado en el material.

Se ilustra en la siguiente imagen, las dos variables determinantes en el problema en cuestión,

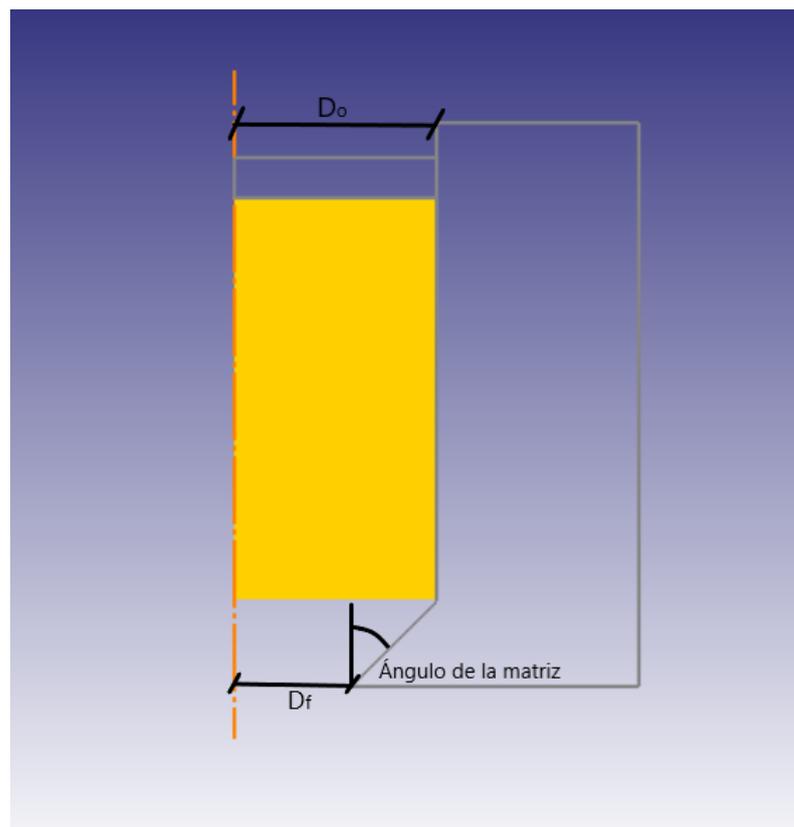


Figura 4.1 Parámetros determinantes del problema.

Como se observa el ángulo de la matriz se corresponde al semiángulo que posee la matriz en cuestión. Mientras que para la relación de extrusión en términos de la nomenclatura del

esquema tiene la siguiente expresión:

$$r_x = \frac{A_0}{A_f} = \frac{\frac{\pi D_0^2}{4}}{\frac{\pi D_f^2}{4}} = \frac{D_0^2}{D_f^2} \quad (4.2)$$

4.1 Existencia de la zona muerta

Se procede a mostrar las zonas muertas que se producen en las matrices debido a la fricción producida entre el material y la pared del contenedor y de la matriz en cuestión.

En primer lugar, para valores bajos del ángulo de la matriz, como podemos observar en las Figuras 4.2a y 4.2b la zona muerta es prácticamente inexistente, debido a que la componente transversal de la presión que ejerce la matriz sobre el material es mayor y favorece a la deformación casi en la totalidad del tocho de material.

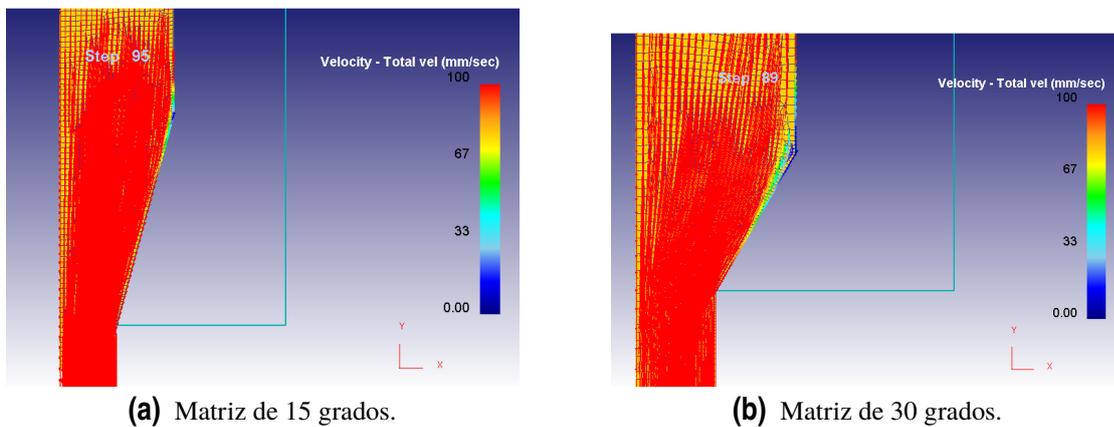


Figura 4.2 Velocidad cinemática durante el proceso de extrusión.

En ambas imágenes se observa que la zona en la que las velocidades cinemáticas relativas son cercanas al cero es muy pequeña, tan pequeña que se puede despreciar frente al volumen de control del problema bajo cuestión. Además, es preciso comentar que en ambos casos se tiene la misma relación de extrusión para poder realizar una comparativa del tamaño de esta zona que como se ha comentado, es despreciable.

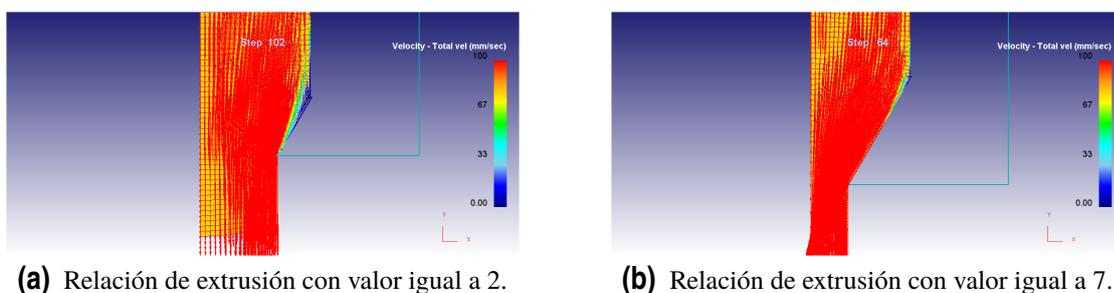


Figura 4.3 Velocidad cinemática durante el proceso de extrusión en matrices de 30 grados.

Si se observa ahora la influencia que tiene a estos bajos ángulos la relación de extrusión, se puede observar como a mayor relación de extrusión, la zona es menor aunque es poco significativo su tamaño en relación al tamaño del volumen de control del problema. Se han empleado las matrices de 30 grados en esta ocasión para que se vea más clara la diferenciación del tamaño de la zona, ya que para 15 grados ésta es ínfima.

Se procede ahora a mostrar los resultados para matrices de mayor ángulo, como son aquellas de 45, 60, 75 y 90 grados. Bien se puede intuir como ya vimos para ángulos en los que esta zona es despreciable, que a mayor ángulo, más acentuada será la zona en cuestión.

En este caso se compararán todas ellas para una relación de extrusión de valor igual a 3.

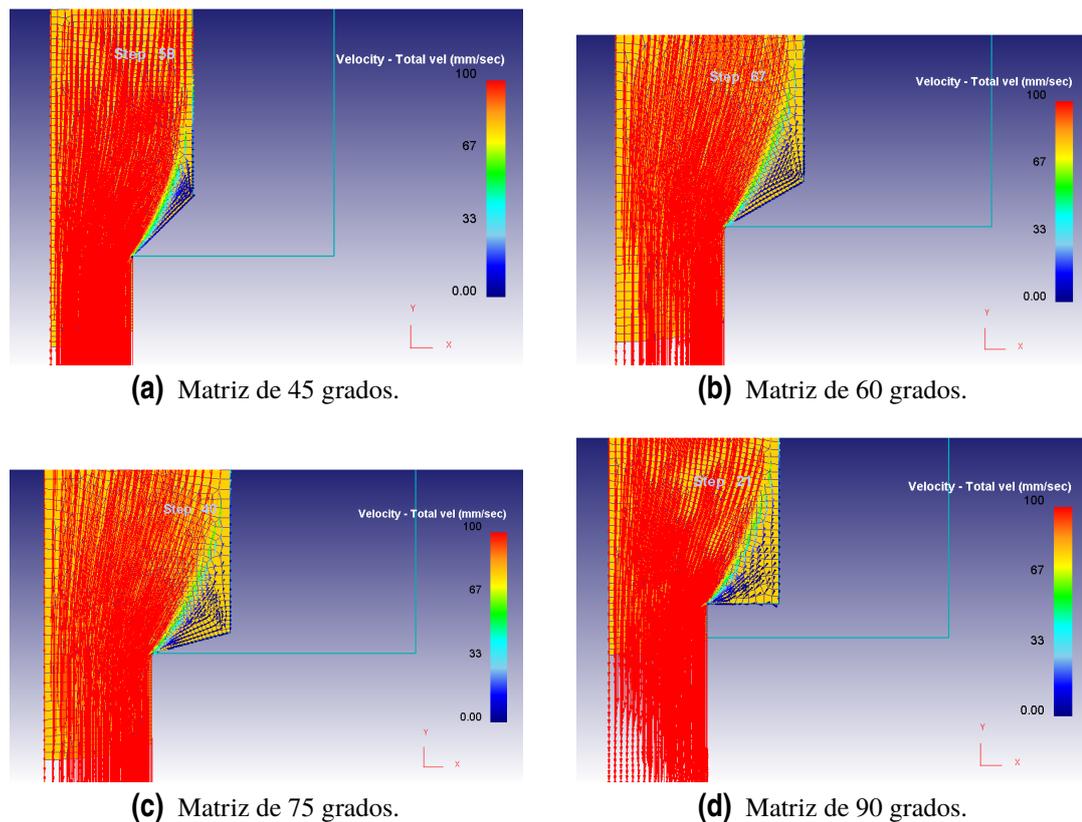


Figura 4.4 Velocidad cinemática durante el proceso de extrusión en matrices con ángulos mayores.

Como era de esperar el tamaño va creciendo con el ángulo de la matriz. Además, se podría decir que la matriz efectiva, entendiendo esto como la suma de la zona que es matriz y la zona donde las velocidades son nulas, se mantiene aproximadamente constante, generándose una pseudo-matriz que hace que los puntos del volumen de material que poseen velocidades distintas de cero sea aproximadamente el mismo.

4.2 Retraso del máximo de la fuerza

Para este apartado es importante tener en mente la Figura 2.7, pues se van a mostrar los resultados experimentales, bajo simulaciones del software DEFORM y más adelante se

discutirán dichos resultados. Por el momento el texto se ceñirá a exponer los datos obtenidos y mostrar las discrepancias que ocurren respecto a la curva teórica.

De esta manera, se procede a mostrar las gráficas de las simulaciones realizadas para alguna matriz con cierta relación de extrusión simplemente con el objetivo de ser pragmático, a efectos de corroborar si existe o no un retraso del máximo de la fuerza que el pistón tiene que aplicar sobre el tocho de material.

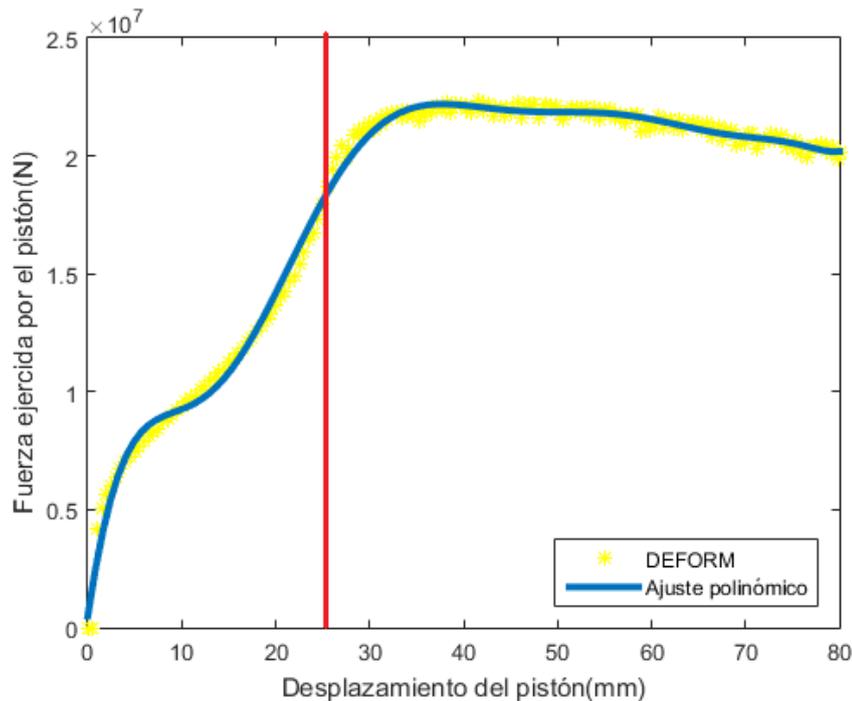
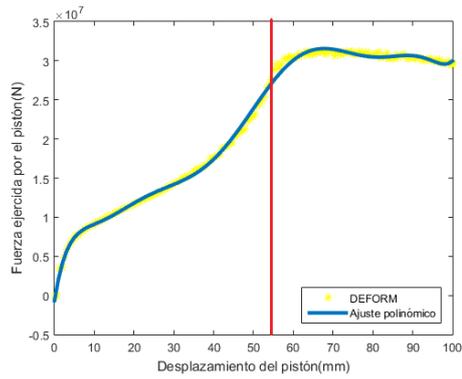


Figura 4.5 Curva Fuerza vs Desplazamiento para matriz de 30 grados con $r_x = 4$.

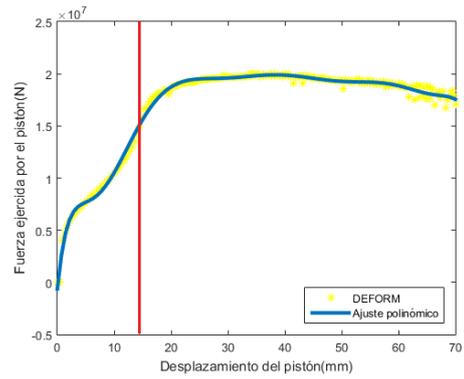
En la Figura 4.5 se muestra: en puntos de color amarillo, los valores que se han obtenido del software DEFORM 2D; la línea azul se refiere al ajuste polinómico de dicho puntos a través de un polinomio de grado 7 y la línea roja indica el momento en el que se produce el llenado de la matriz. Por tanto, se produce claramente un retraso de dicho máximo. Es importante recalcar que para el cálculo exacto de ese retraso se ha realizado el ajuste sin tener en cuenta la zona del llenado de la matriz, para que sea más exacto el punto en el que se produce dicho máximo.

Además del retraso observado, lo que si se adecua a la curva teórica es el descenso paulatino de la fuerza que ejerce el pistón a lo largo del proceso de extrusión. Sin embargo el interés que reside en este documento es relativo al retraso comentado, por ello la gráfica no muestra el proceso completo.

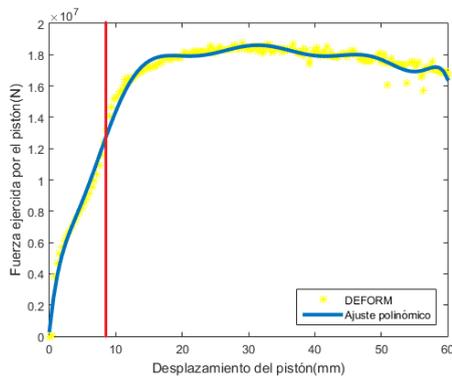
Para tener una idea general del retraso que se produce se procede a mostrar el resto de gráficas para la misma relación de extrusión, simplemente para tener constancia de que dicho retraso no es algo aislado, sino que se produce para cualquier ángulo que posea la matriz.



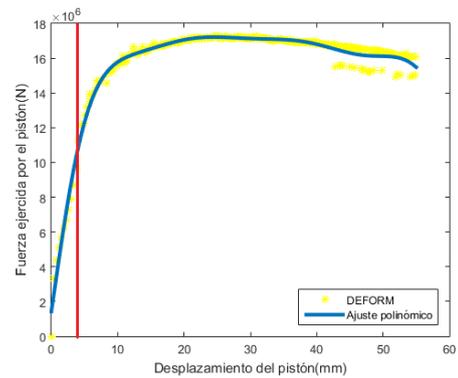
(a) Matriz de 15 grados.



(b) Matriz de 45 grados.



(c) Matriz de 60 grados.



(d) Matriz de 75 grados.

Figura 4.6 Curvas Fuerza vs Desplazamiento del pistón con referencia del llenado de la matriz.

Se puede decir de igual manera que para el resto de casos anteriores se produce un retaso del máximo, pues la línea de referencia roja se sitúa previa a dicho máximo de la fuerza ejercida por el pistón. Es lógico suponer que para el resto de simulaciones se ha producido el mismo efecto del retraso del máximo de la fuerza, el cual, se puede observar en el conjunto de gráficas de todas y cada una de las simulaciones que están incluidas en los Anexos.

5 Análisis de los resultados

Una vez se han expuesto los resultados más significativos en el apartado anterior, tanto para la existencia de una zona muerta, como para el retraso producido en el máximo de la fuerza, se procederá ahora a explicar por qué suceden estos fenómenos y qué fundamento teórico posee, más allá de aquel expuesto en apartados anteriores.

5.1 Retraso del máximo de la fuerza ejercida por el pistón

Para abordar esta cuestión, es necesario comenzar por exponer lo que se conoce como Teorema de Clapeyron en la Teoría de la Elasticidad, el cual nos dará una visión en la relación existente entre el trabajo que realiza un campo de fuerzas aplicado a un volumen de control y las deformaciones elásticas que este sufre.

5.1.1 Teorema de Clapeyron

En primer lugar, y con el fin de comprender este teorema, es fundamental definir la función denominada energía de deformación por unidad de volumen, U , cuya característica fundamental es que cumple lo siguiente:

$$\frac{\partial U}{\partial \varepsilon_{ij}} = \sigma_{ij} \quad (5.1)$$

Donde ε_{ij} es el tensor de deformaciones y σ_{ij} el tensor de tensiones del volumen de control de material en cuestión.

Si ahora representamos la relación tensión-deformación para cualquier material, se tiene la siguiente gráfica:

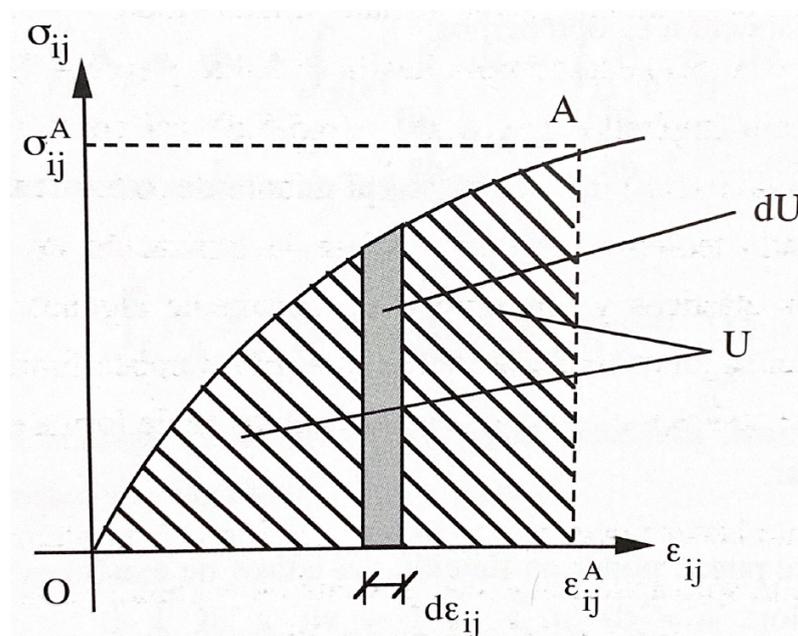


Figura 5.1 Relación tensión-deformación.

Observando la Figura 5.1, la densidad se puede definir como:

$$U = \int_0^A dU = \int_0^{\varepsilon_{ij}^A} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \quad (5.2)$$

Tras haber definido la energía de deformación, para concluir con el enunciado de este teorema, es primordial realizar una interpretación particular del Teorema de los Trabajos Virtuales. La clave está en que el campo de desplazamientos Ψ_i y sus correspondientes deformaciones compatibles $\varepsilon^{\Psi_{ij}}$, sean los provocados por las fuerzas exteriores, de manera que el Teorema de los Trabajos Virtuales se escribiría de la siguiente forma:

$$\int_D X_i u_i dv + \int_{\partial D} t_i^c u_i^c ds = \int_D \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dv \quad (5.3)$$

donde X_i son las fuerzas de volumen, u_i los desplazamientos, D es el dominio en cuestión del problema, t_i^c son las tensiones existentes en el contorno del dominio donde los desplazamientos son conocidos y las tensiones conocidas aplicadas en el contorno del dominio D ; y u_i^c son los desplazamientos conocidos en el contorno de D y los desplazamientos existentes en el contorno de D donde las tensiones son conocidas.

Si incluimos la definición de energía de deformación en 5.3 obtenemos:

$$\frac{1}{2} \int_D X_i u_i dv + \frac{1}{2} \int_{\partial D} t_i^c u_i^c ds = W \quad (5.4)$$

Por tanto, se puede concluir que la energía de deformación total acumulada en un sólido es igual al trabajo de las cargas exteriores que han originado el proceso de deformación [1].

5.1.2 Explicación del retraso del máximo de la fuerza ejercida por el pistón

En el Teorema de Clapeyron, se ha adelantado el concepto en Elasticidad en el que la energía de deformación total acumulada en un sólido es igual al trabajo de las cargas exteriores que

han originado el proceso de deformación. Dicho lo cual, se procede a exponer la explicación del atraso de dicho máximo. Para la explicación se tomará una de las simulaciones a modo de ejemplo explicativo para que resulte más fácil su comprensión.

Basándose en la simulación correspondiente a una matriz de 75 grados, con una relación de extrusión $r_x = 2$, se observa la siguiente relación entre la fuerza ejercida del pistón y el desplazamiento de éste (ver Figura 5.2).

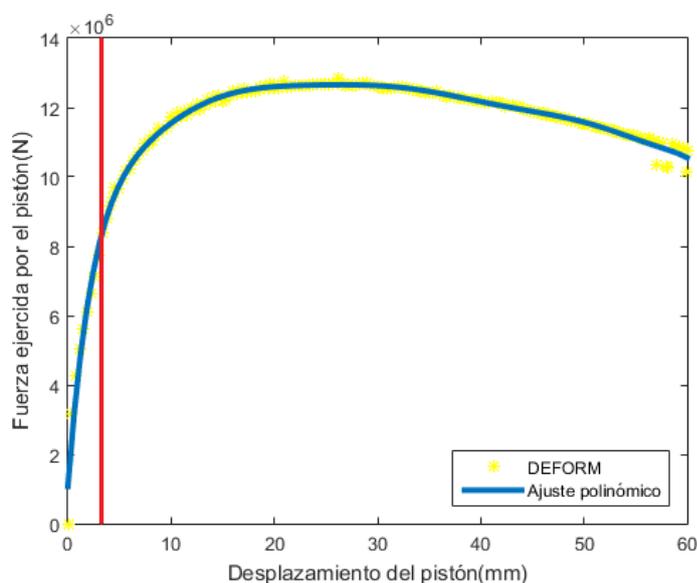


Figura 5.2 Fuerza pistón vs Desplazamiento del pistón.

Claramente, se observa en la Figura 5.2 que el máximo es posterior al llenado de la matriz. Esto tiene una explicación muy simple, la cual reside en pensar que si tenemos que aplicar más fuerza que el momento en el que se llena la matriz (momento en el que se supone que se produce la mayor deformación y la fuerza de fricción es máximo, pues a partir de este momento, ésta decae) es porque en el interior de la cámara se está deformando más material, lo cual es consecuencia directa de ese retraso del máximo.

Para verlo más claramente, se muestra a continuación la instantánea de la simulación correspondiente a la Figura 5.2 que muestra las zonas del material en las que se está produciendo deformaciones, o lo que es lo mismo, las zonas donde la velocidad de deformación es distinta de cero.

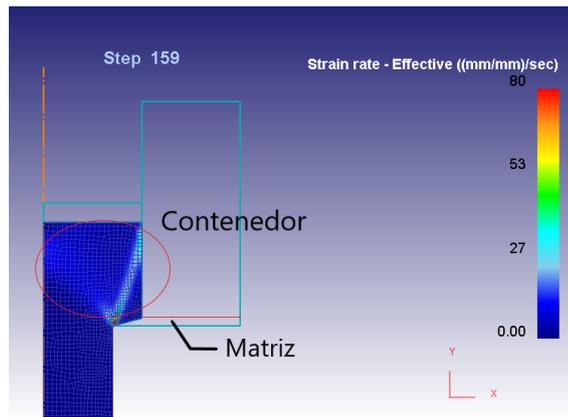


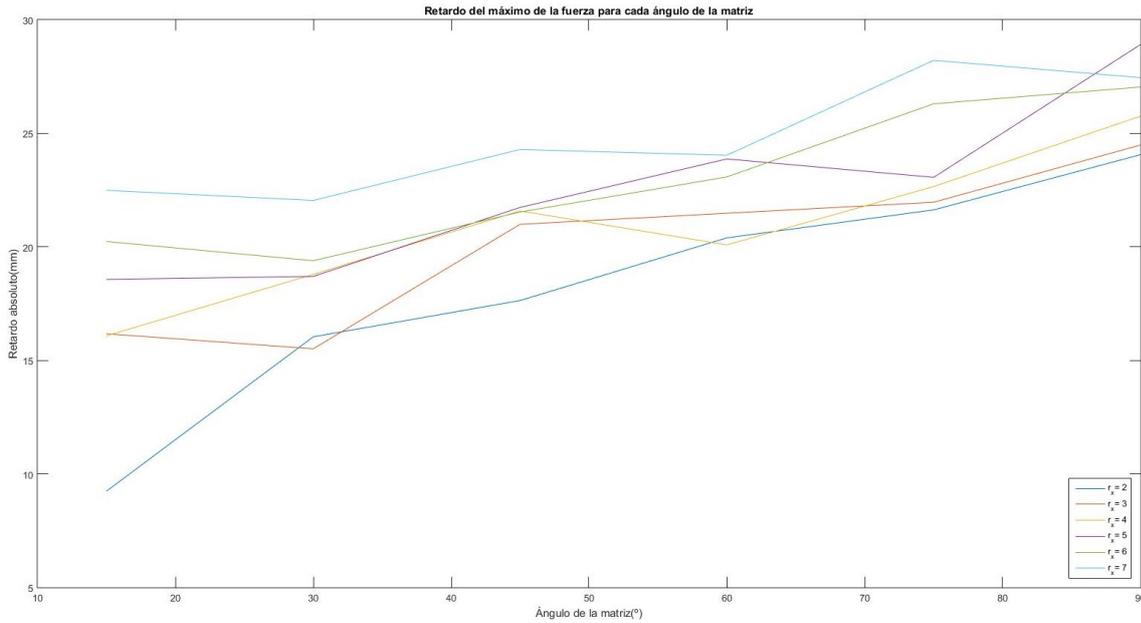
Figura 5.3 Esquema explicativo de las velocidades de deformación durante el proceso de extrusión..

Se observa en la Figura 5.3 como dentro del contenedor el material se está deformando, pues la velocidad de deformación en ciertos puntos es distinto de cero. Es por ello que no solo se deforma en el interior de la matriz, sino que esa deformación previa a la matriz es la que explica ese retraso del máximo de la fuerza, correspondiente al máximo de deformación del material en su conjunto.

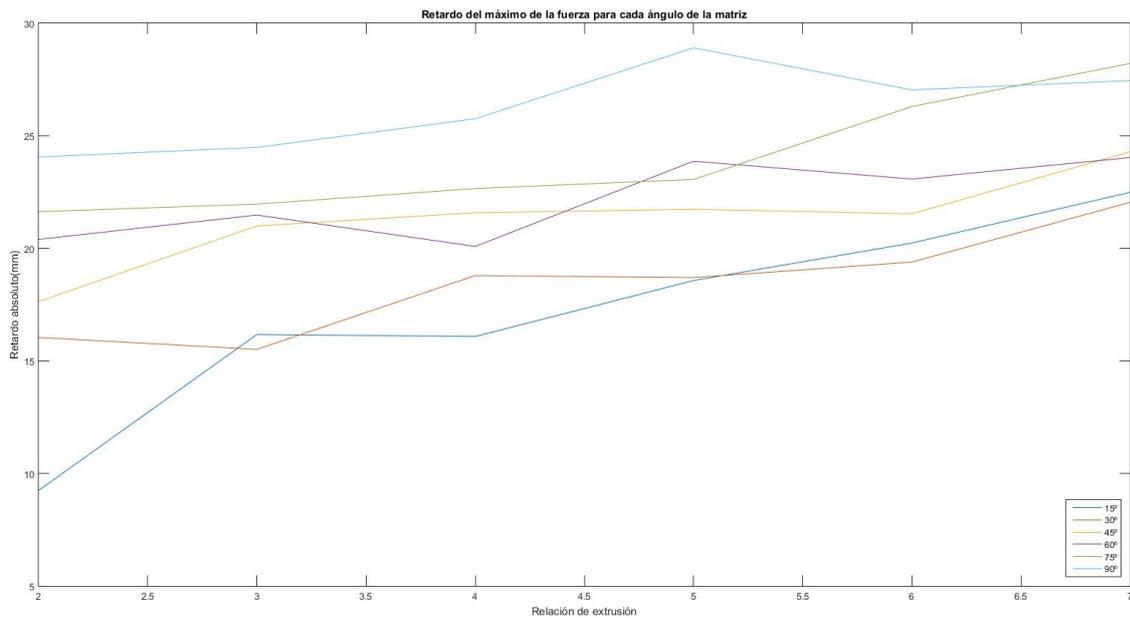
5.1.3 Influencia en el resultado de las variables en juego

Como ya se mencionó en el Apartado 3, las simulaciones se realizaron en base a la modificación de dos parámetros principales, como son: el ángulo que la matriz posea y la relación de extrusión, cuya definición quedó explicada en el Capítulo 2.

Por lo tanto, y con el objetivo de ver que influencia tienen dichas variables en el retraso del máximo de la fuerza se muestra a continuación un par de gráficas que esclarecen esta influencia.



(a) Retraso ángulo vs Ángulo matriz.



(b) Retraso ángulo vs Relación de extrusión r_x .

Figura 5.4 Influencia del ángulo de la matriz y la relación de extrusión r_x en el retraso de la fuerza.

En la primera, se observa por un lado, que para una relación de extrusión r_x , conforme aumenta el ángulo de la matriz, el retraso del máximo de la fuerza es mayor. Esto puede deberse, a que como el retraso se produce porque existen deformaciones y velocidades de deformación no nulas en el interior del contenedor durante el proceso, a mayor ángulo de la matriz, menor es el volumen que se encuentra dentro de la matriz y mayor es el máximo de volumen que tiene que llegar a deformarse en el interior del contenedor. Por tanto, el

tiempo (o desplazamiento del pistón en su defecto) que se tarda en alcanzar ese máximo de volumen deformado (el cual se corresponde con el máximo de la fuerza) es mayor cuanto mayor es el ángulo de la matriz.

Continuando con la segunda gráfica, también podemos ver un aumento aunque no tan pronunciado del retraso del máximo de la fuerza conforme el valor de la relación de extrusión aumenta, fijado el ángulo de la matriz. Al tener una mayor relación de extrusión, el material entra antes en la matriz y por tanto, comienza a deformarse antes. Al llegar al punto teórico donde se produce el máximo (llenado de la matriz), la deformación que ha sufrido el material es mayor, pues hay mayor volumen de material en el interior de la matriz. Una vez llenada, la fuerza continúa aumentando hasta su máximo debido a que en el interior del contenedor se está deformando material. El retraso de dicho máximo se observa que es mayor en relaciones de extrusión mayores, ya que dicho máximo sucede cuando la deformación total del material es máxima que ocurre una vez se alcanza el régimen estacionario del proceso, a partir del cual la fuerza va decayendo porque la cantidad de material a deformar es menor. Por otro lado, a pesar de que el volumen en el contenedor es menor, para mayores relaciones de extrusión, la deformación prematura del material al entrar en la matriz hace que aunque el volumen deformado en el interior de la matriz sea menor, los valores de deformación alcanzados son mayores, y dichos valores tardan más en alcanzarse, de ahí un mayor retraso del máximo.

5.2 Zona muerta durante el proceso de extrusión

En esta ocasión se procederá a mostrar la zona muerta que se forma durante el proceso, a la vez que se mostrarán diversos ejemplos de como fluye el material en las diferentes matrices¹.

En primer lugar, la influencia de la geometría de la matriz en el patrón que forma el flujo del material durante el proceso de extrusión, fue estudiado utilizando el método de viscoplasticidad² y un juego de matrices con diferentes formas[4]. No obstante, en el caso que toca, el DEFORM 2D nos permite simular dicho experimento y obtener el campo de velocidades en todo el volumen de control, como podemos ver en la Figura 5.5,

¹ Se recuerda, que al final del documento se encuentran los Anexos con las instantáneas correspondientes a todas y cada una de las simulaciones en las que se puede observar la existencia de la zona muerta.

² La viscoplasticidad es un método experimental para determinar el campo de velocidades de deformación en flujos de materiales en los que las tensiones pueden ser calculadas.

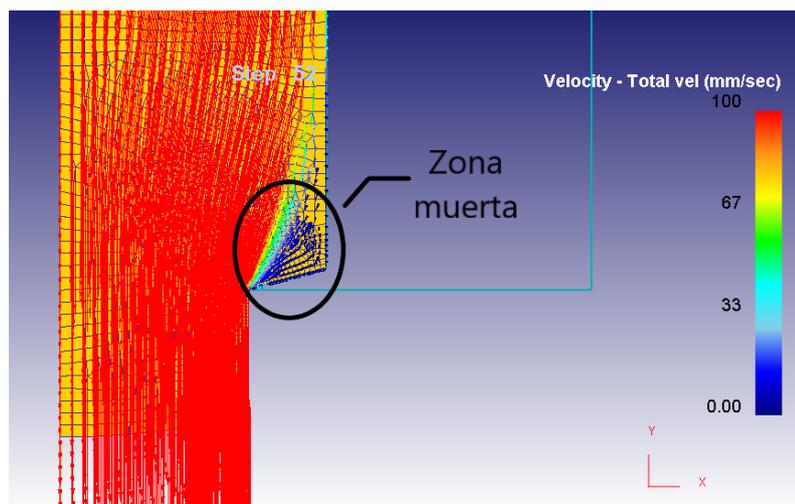


Figura 5.5 Existencia de la zona muerta en una matriz de 75 grados.

En esta imagen se observa en tonos azules oscuros, las zonas donde las velocidades son nulas, y por tanto, se corresponden con la zona muerta de la que se ha hablado. El patrón que sigue el flujo del material es el que determina el campo de deformaciones, la microestructura del material y las propiedades mecánicas, y además, puede ser influenciado por las condiciones de fricción localizadas y consecuentemente por el estado del material, el ángulo de la matriz y por el tamaño de dicha zona muerta[4].

La formación de la zona muerta se debe principalmente a la fricción de las paredes del contenedor, de manera que si observamos una sección transversal, los puntos más cercanos al eje de simetría axial fluyen a una velocidad mayor que los puntos más alejados de dicho eje. Así, los puntos más alejados, tendrán velocidades tan bajas debido a la fricción existente entre el material y el contenedor, que al llegar a la zona de la matriz se formará esa zona muerta donde las velocidades son nulas.

Por último, y en vistas a reducir los efectos de esta zona, se han realizado estudios [4] que afirman que una buena elección de la geometría de la matriz puede hacer que la zona muerta se reduzca, atendiendo al radio de los filos de la matriz y al ángulo de la misma, pero estos estudios se quedan fuera del alcance y objetivos de este trabajo.

6 Conclusiones y propuestas de mejora

Llegados a este punto del documento cabe mencionar una serie de conclusiones a las que se llega una vez realizado todo el análisis previo y expuesto en este trabajo.

Una de las conclusiones obtenidas es el retraso del máximo teórico de la fuerza del pistón respecto al momento en el que según las curvas teóricas se produce dicho máximo, momento que corresponde al instante en el cual se produce el completo llenado de la matriz. Además, dicho retraso viene condicionado porque las deformaciones que se producen no son solo en el interior de la matriz, sino que éstas también tienen lugar en el interior del contenedor, y dicha deformación en el interior del contenedor provoca que el máximo se retrase, pues no solo hay que deformar el interior de la matriz, sino también toda la parte del material que se encuentra en el interior del contenedor (ver Figuras del Anexo en el Apartado 7.3).

Por otro lado, la existencia de la zona muerta se genera por la fricción que hay entre el material y las paredes del contenedor y la matriz, provocando desplazamientos relativos que terminan por ser nulos, en aquellos puntos del material situados en la entrada de la matriz, cerca de la pared de la misma, y que provoca como se comentó anteriormente que exista una región que actúa como pseudo-matriz.

En cuanto a la influencia de las variables independientes del problema en cuestión (ángulo de la matriz y relación de extrusión) se puede afirmar que a mayor ángulo de la matriz, el retraso se hace mayor debido a que el volumen deformado que queda en el interior del contenedor es mayor cuanto mayor es el ángulo y esto hace que el máximo se alcance más tarde, pues hay más volumen que deformar. Si se observa ahora la influencia de la relación de extrusión, el retraso aumenta con ésta, debido a dos motivos fundamentales. En primer lugar, el momento en el que comienza el régimen estacionario del proceso a partir del cual la fuerza ejercida por el pistón decae se alcanza más tarde conforme aumenta la relación de extrusión, y en segundo lugar, a pesar de que el volumen del contenedor es mayor, la deformación máxima alcanzada es mayor en casos donde la relación de extrusión es mayor.

En trabajos futuros, se puede incluir la variable temperatura, para observar qué influencia tiene ésta. Se propone, entonces, abordar la extrusión en caliente y qué ocurre en el material

y en la fuerza del pistón en función del desplazamiento para dicha tesitura y qué relación se puede entablar entre las conclusiones obtenidas este trabajo y las conclusiones a las que se llega en la extrusión en caliente.

Por otro lado, en este trabajo se ha realizado el análisis suponiendo simetría axial tanto de las cargas ejercidas en el tocho de material, como en las propiedades del material y en las velocidades cinemáticas y de deformación. Se plantea, el estudio tridimensional del proceso en frío con las mismas variables en juego, para su posterior comparación con el caso estudiado en este documento.

Por último, se puede considerar el caso en el que se emplean diferentes tipos de materiales, para conocer su comportamiento en el proceso de la extrusión, clasificándolos en función de parámetros como el máximo de la fuerza que ejerce el pistón o el retraso de éste.

7 Anexos

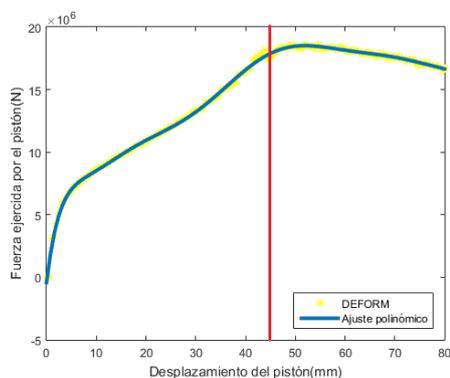
Se procederá ahora a mostrar en primer lugar todas las gráficas correspondientes a las 36 simulaciones en las que se apreciarán las relaciones de fuerza y desplazamiento de los pistones, tanto los puntos obtenidos con el software DEFORM 2D, como el ajuste polinómico de grado 7 realizado con Matlab. Se recuerda que la línea de referencia de color rojo se corresponde al instante en el cual se produce el llenado de la matriz de extrusión y por tanto, según la curva teórica, era el momento en el cual se debería de producir el máximo de la fuerza ejercida por el pistón.

Más adelante, se mostrarán las diversas zonas muertas que presentan todas y cada una de las simulaciones, a través de instantáneas durante la simulación, mostrando las velocidades cinemáticas de los diferentes puntos del material que fluye a través de la matriz.

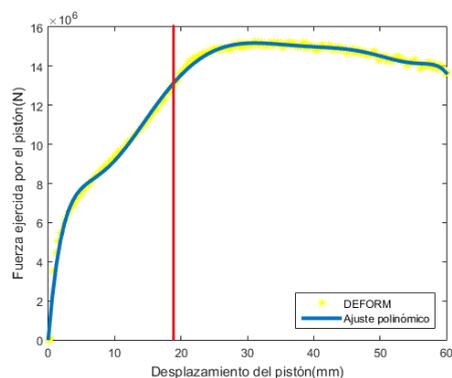
A continuación, se incluyen las instantáneas de las simulaciones en las que se muestran las velocidades de deformación que se producen en los puntos del material con el fin de aclarar que existe deformación en el interior del contenedor una vez llenada la matriz y que por ello se produce un retraso del máximo como se ha explicado antes.

Por último, se ha incluido una tabla de Excel con el conjunto de todos los resultados, así como el retraso relativo que se han obtenido en cada simulación, a pesar de que este dato no nos resulta de interés para este trabajo.

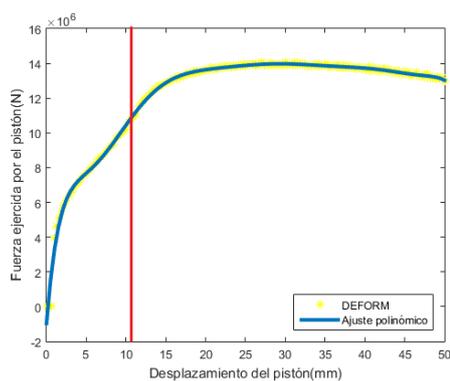
7.1 Gráficas referentes a la fuerza y el desplazamiento



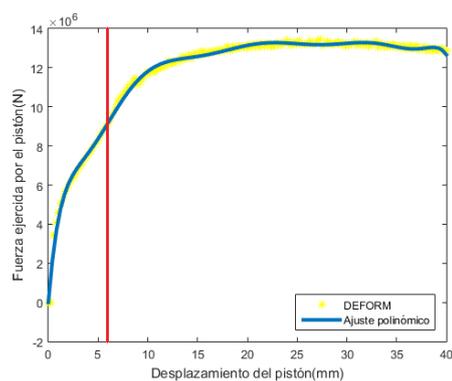
(a) Matriz 15°.



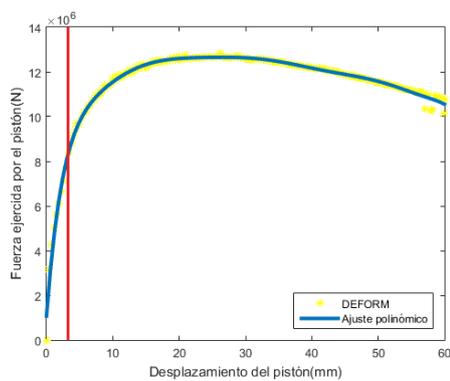
(b) Matriz 30°.



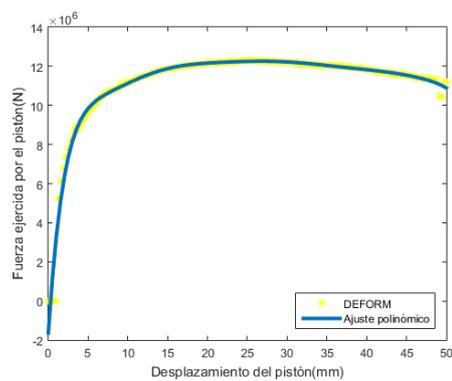
(c) Matriz 45°.



(d) Matriz 60°.

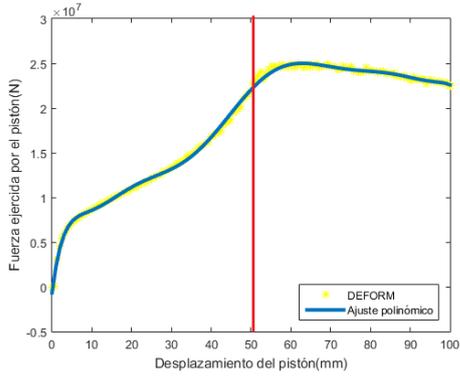


(e) Matriz 75°.

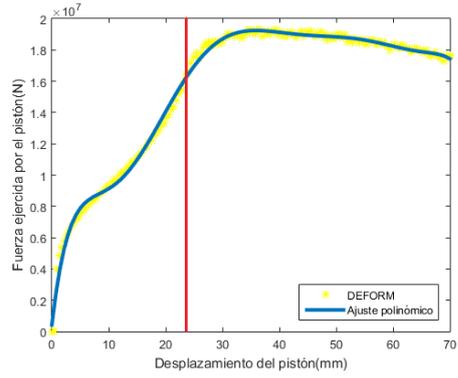


(f) Matriz 90°.

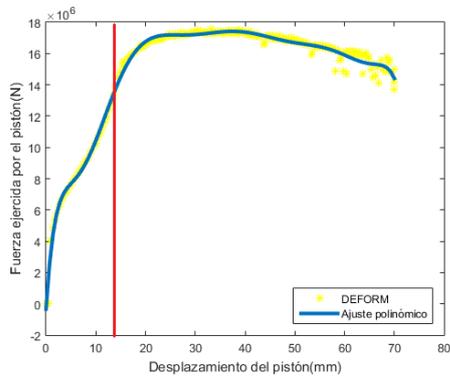
Figura 7.1 Relaciones fuerza-desplazamiento del pistón con relación de extrusión $r_x = 2$.



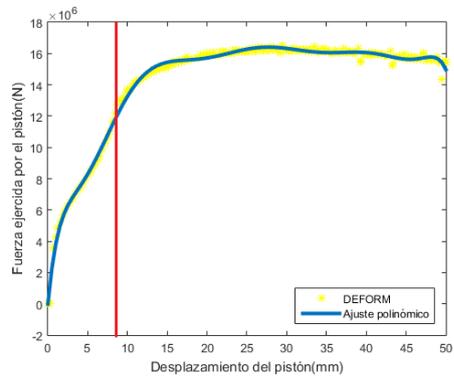
(a) Matriz 15°.



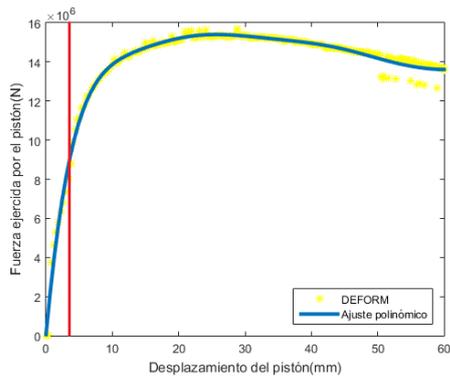
(b) Matriz 30°.



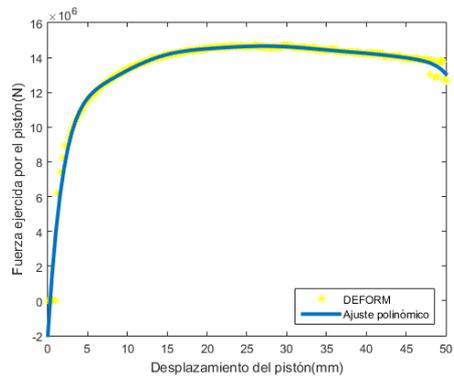
(c) Matriz 45°.



(d) Matriz 60°.

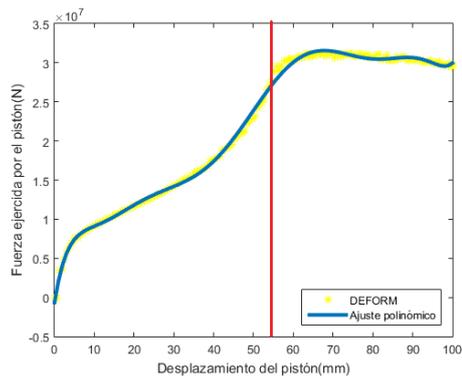


(e) Matriz 75°.

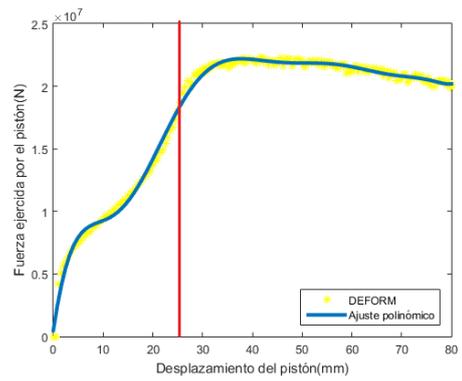


(f) Matriz 90°.

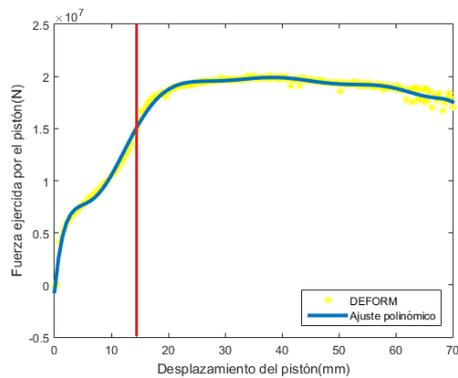
Figura 7.2 Relaciones fuerza-desplazamiento del pistón con relación de extrusión $r_x = 3$.



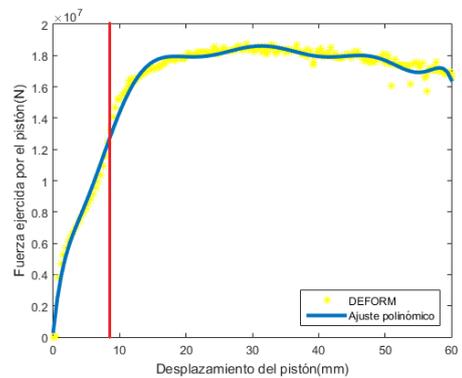
(a) Matriz 15°.



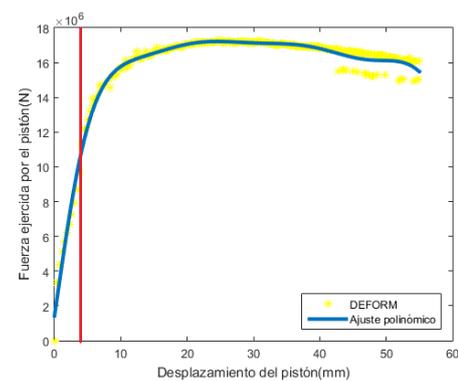
(b) Matriz 30°.



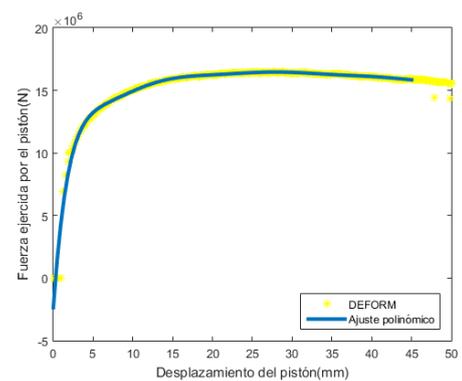
(c) Matriz 45°.



(d) Matriz 60°.

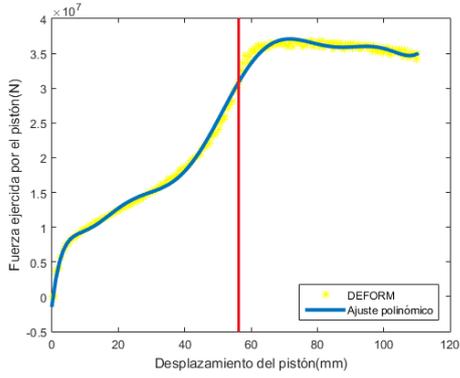


(e) Matriz 75°.

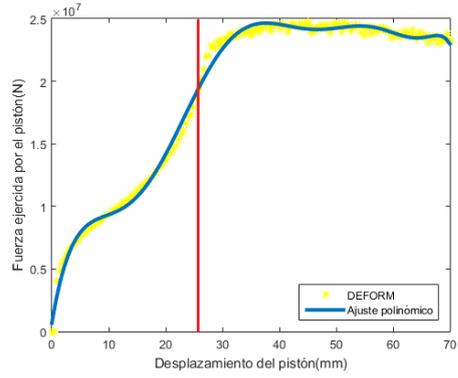


(f) Matriz 90°.

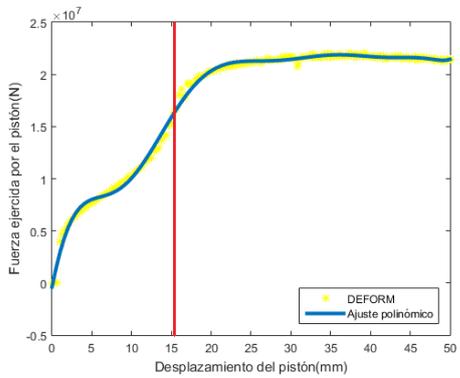
Figura 7.3 Relaciones fuerza-desplazamiento del pistón con relación de extrusión $r_x = 4$.



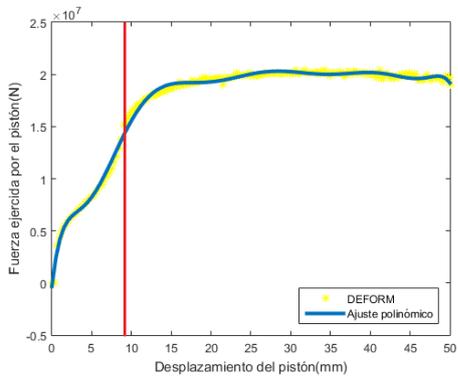
(a) Matriz 15°.



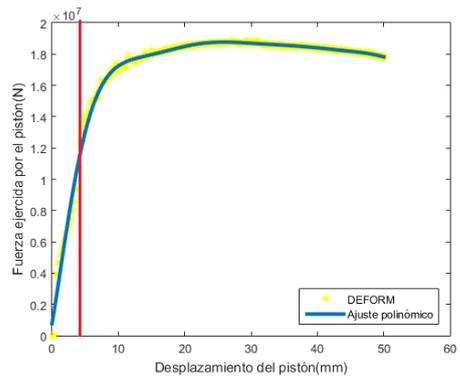
(b) Matriz 30°.



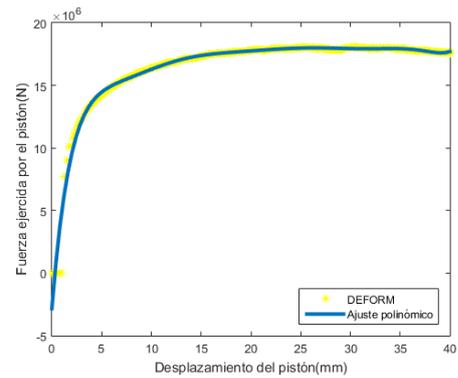
(c) Matriz 45°.



(d) Matriz 60°.

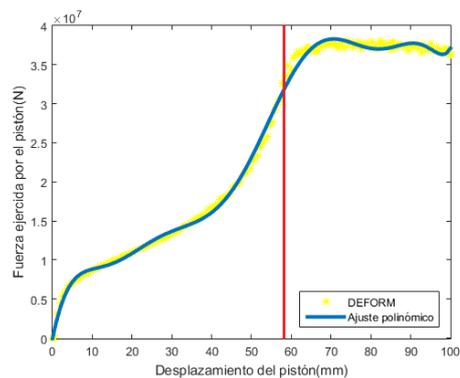


(e) Matriz 75°.

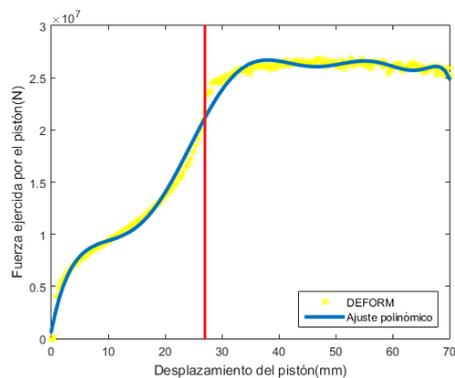


(f) Matriz 90°.

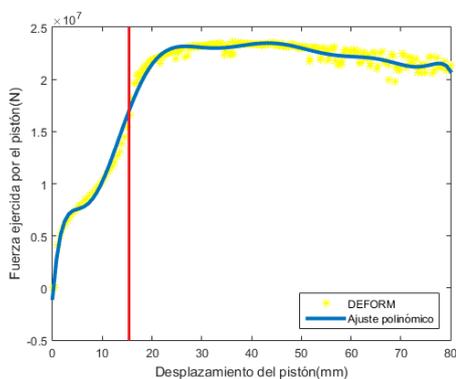
Figura 7.4 Relaciones fuerza-desplazamiento del pistón con relación de extrusión $r_x = 5$.



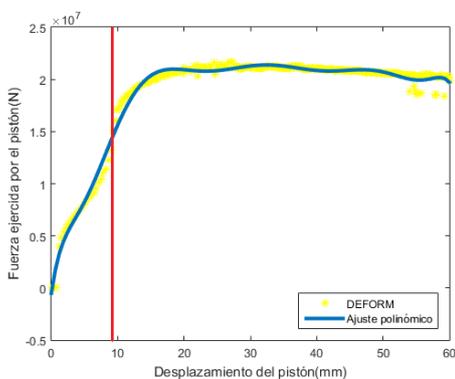
(a) Matriz 15°.



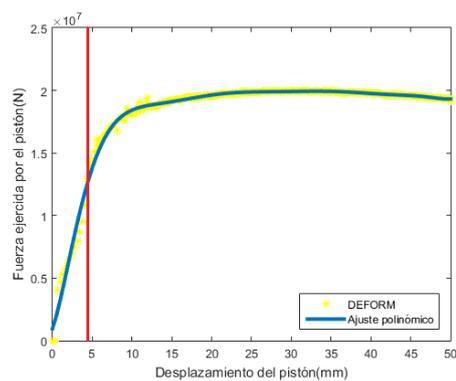
(b) Matriz 30°.



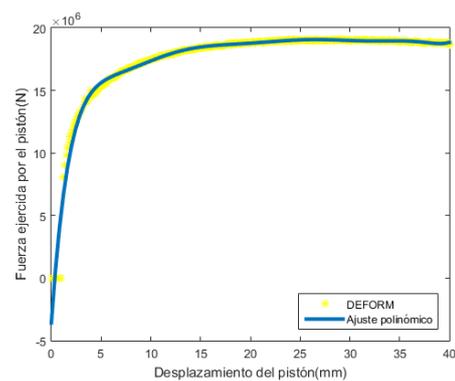
(c) Matriz 45°.



(d) Matriz 60°.

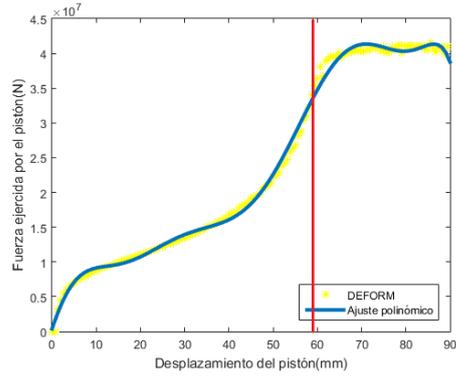


(e) Matriz 75°.

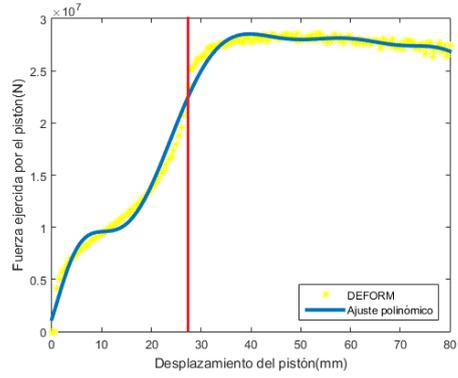


(f) Matriz 90°.

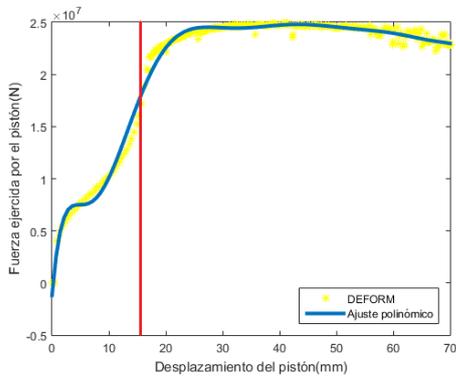
Figura 7.5 Relaciones fuerza-desplazamiento del pistón con relación de extrusión $r_x = 6$.



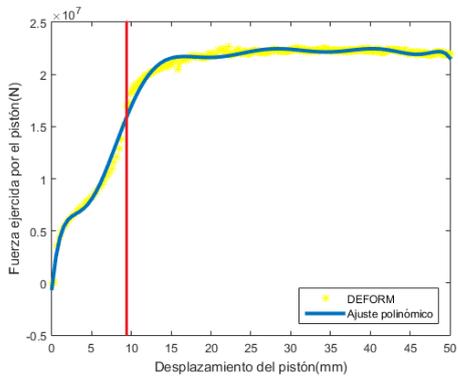
(a) Matriz 15°.



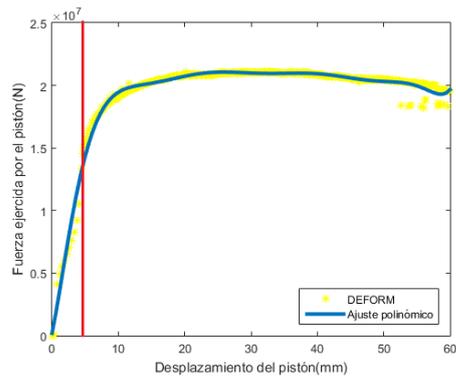
(b) Matriz 30°.



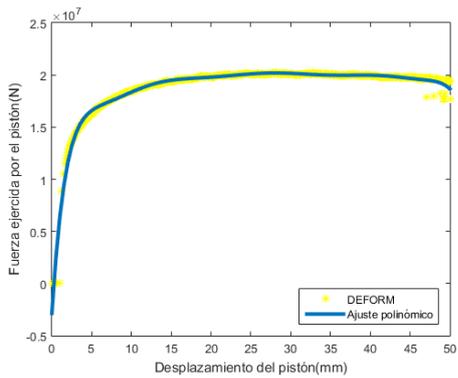
(c) Matriz 45°.



(d) Matriz 60°.



(e) Matriz 75°.



(f) Matriz 90°.

Figura 7.6 Relaciones fuerza-desplazamiento del pistón con relación de extrusión $r_x = 7$.

7.2 Gráficas referentes a la zona muerta

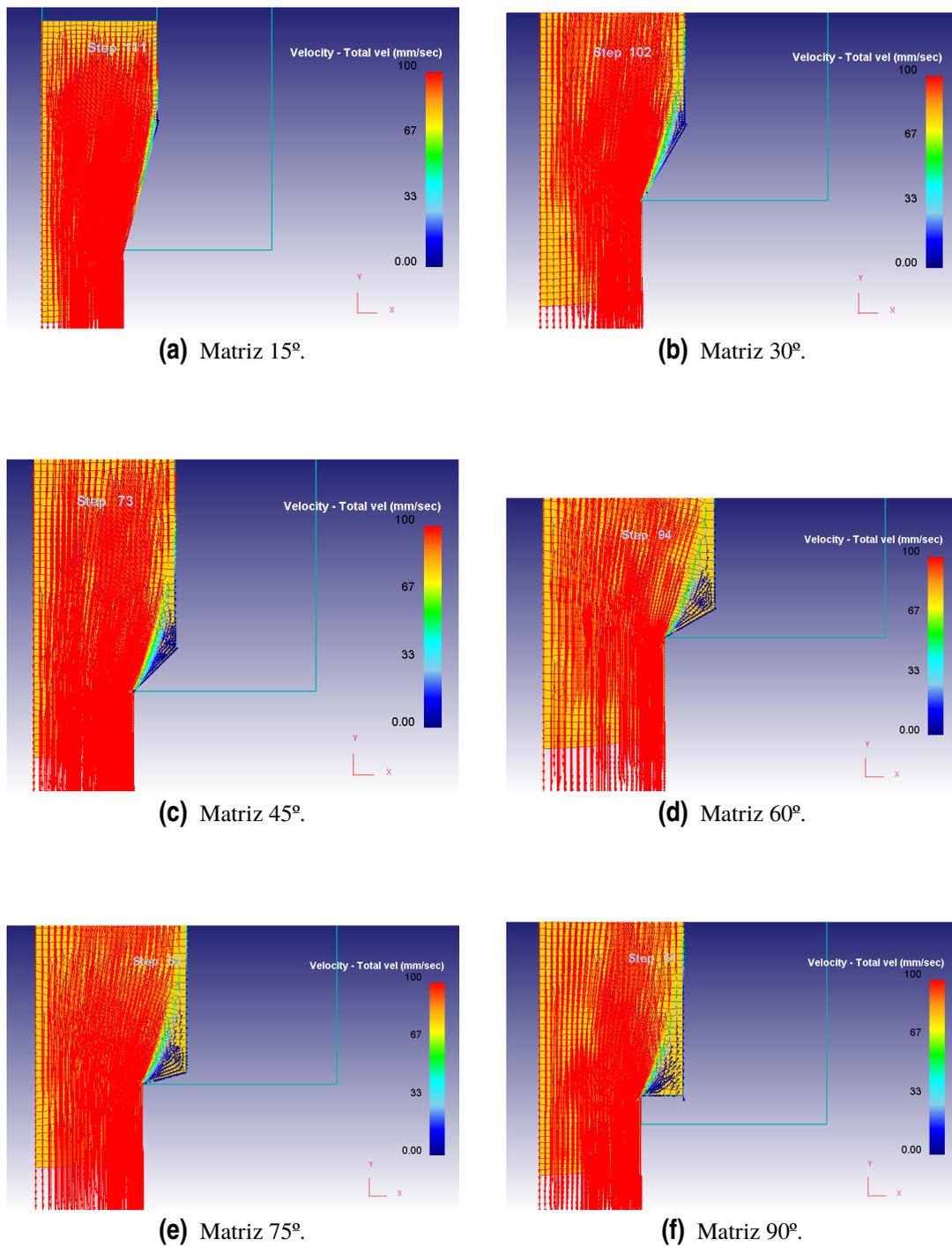
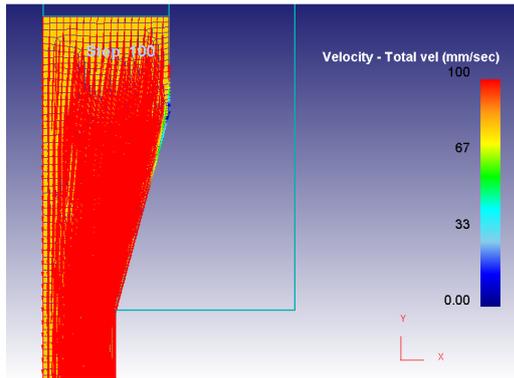
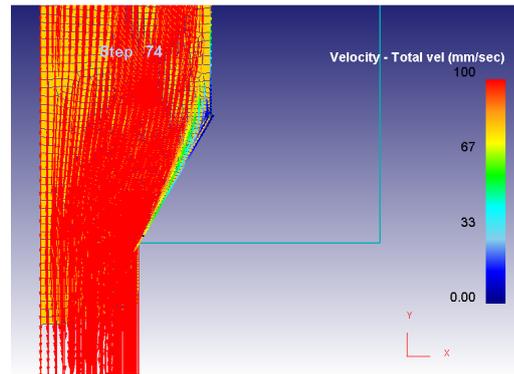


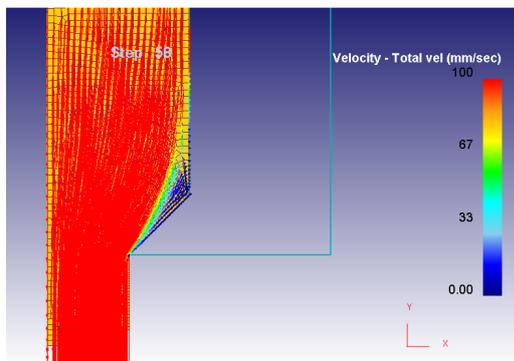
Figura 7.7 Zona muerta formada en las matrices con relación de extrusión $r_x = 2$.



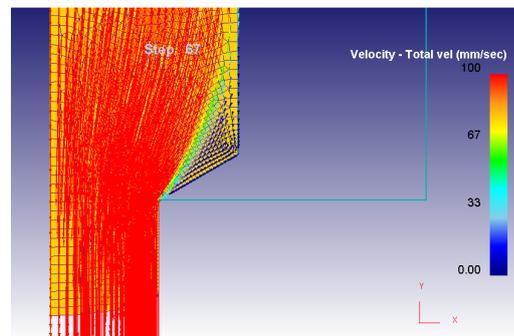
(a) Matriz 15°.



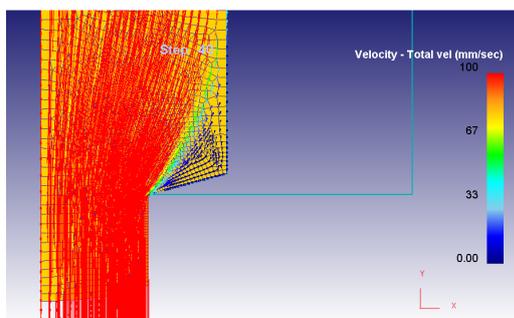
(b) Matriz 30°.



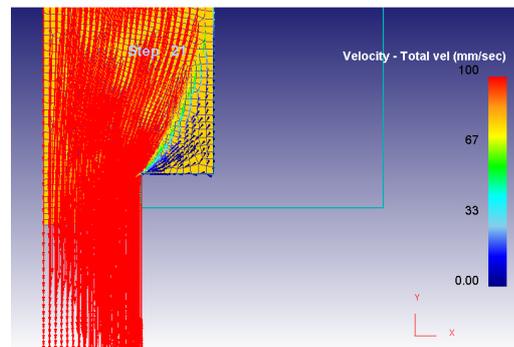
(c) Matriz 45°.



(d) Matriz 60°.

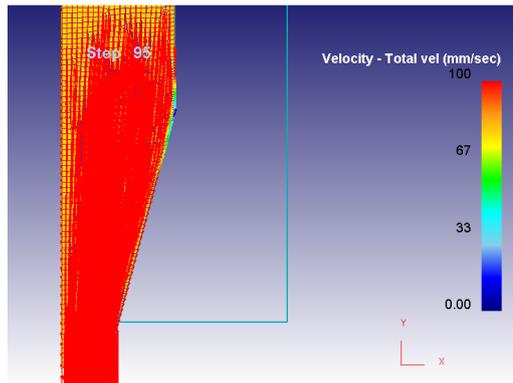


(e) Matriz 75°.

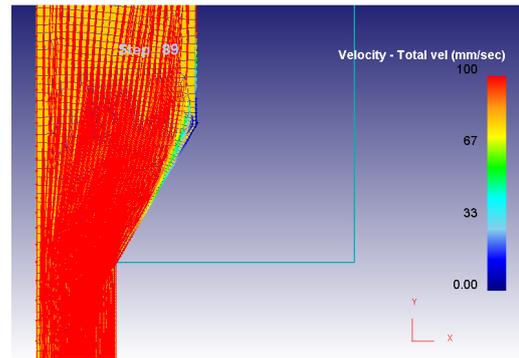


(f) Matriz 90°.

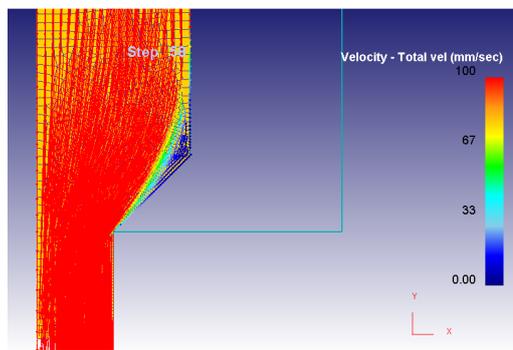
Figura 7.8 Zona muerta formada en las matrices con relación de extrusión $r_x = 3$.



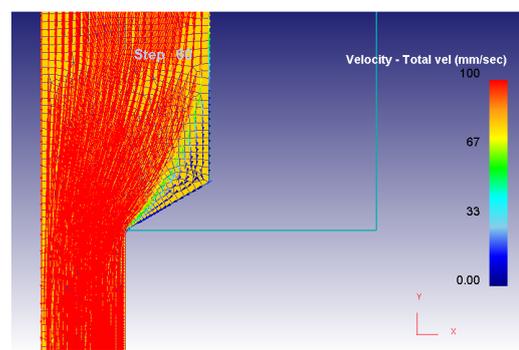
(a) Matriz 15°.



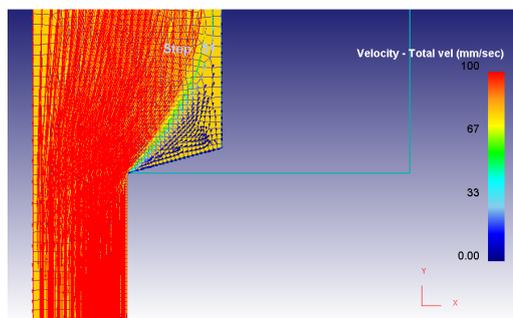
(b) Matriz 30°.



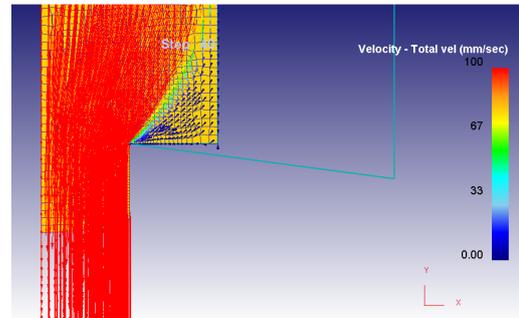
(c) Matriz 45°.



(d) Matriz 60°.

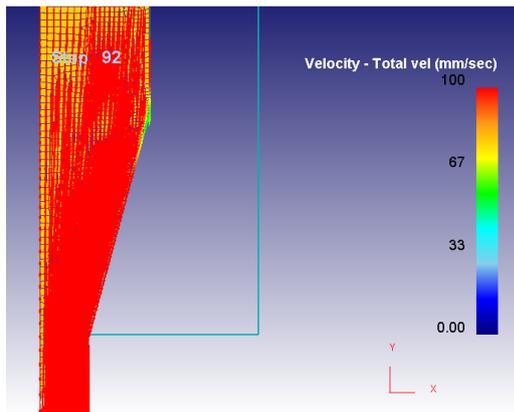


(e) Matriz 75°.

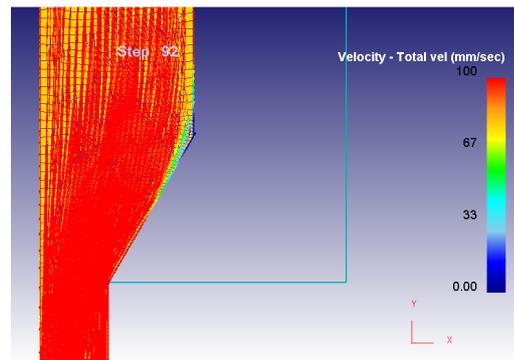


(f) Matriz 90°.

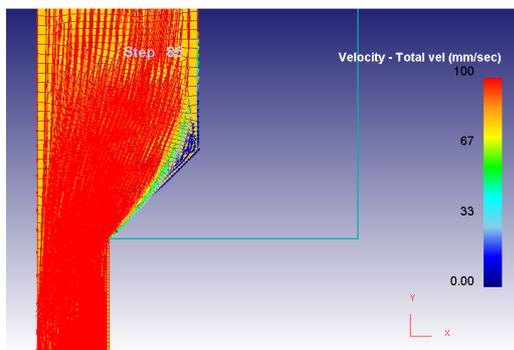
Figura 7.9 Zona muerta formada en las matrices con relación de extrusión $r_x = 4$.



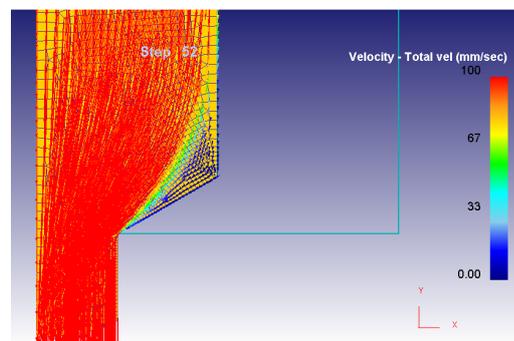
(a) Matriz 15°.



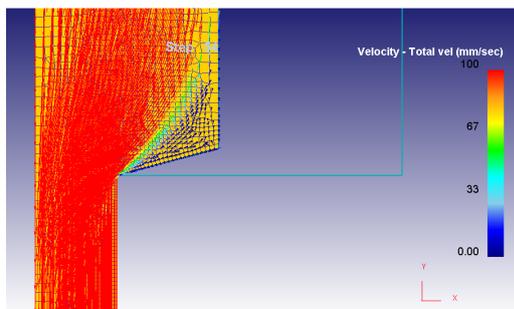
(b) Matriz 30°.



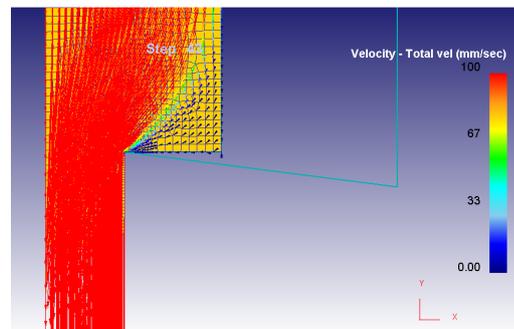
(c) Matriz 45°.



(d) Matriz 60°.

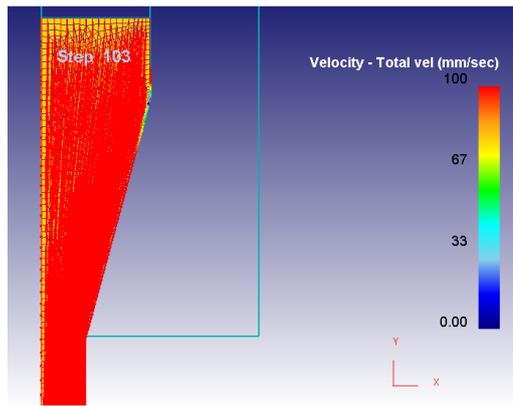


(e) Matriz 75°.

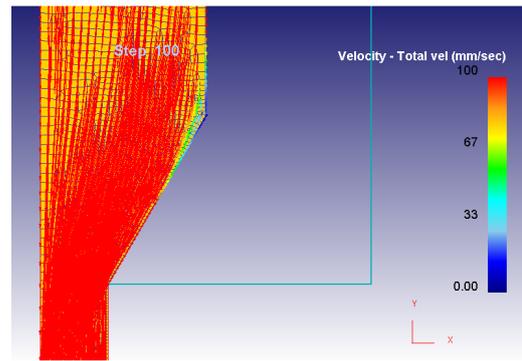


(f) Matriz 90°.

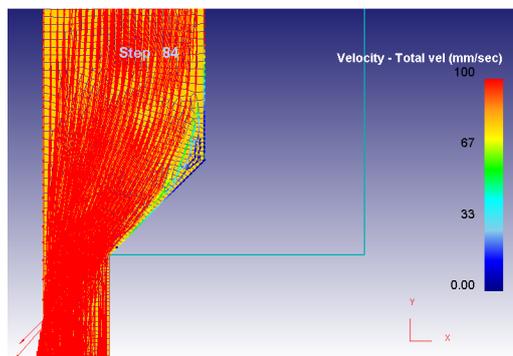
Figura 7.10 Zona muerta formada en las matrices con relación de extrusión $r_x = 5$.



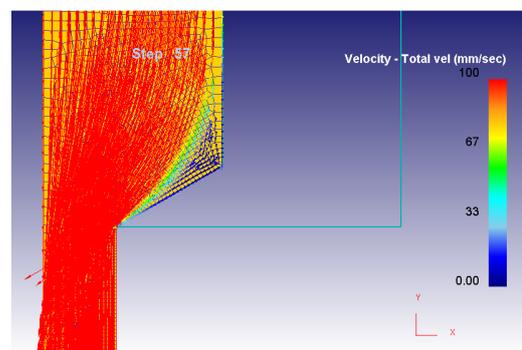
(a) Matriz 15°.



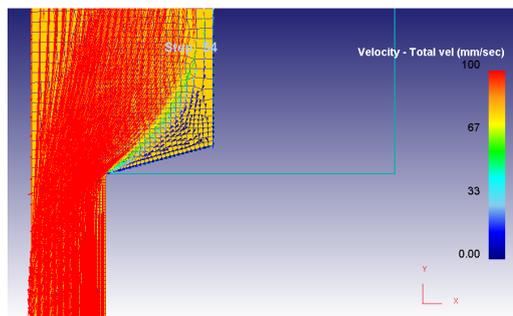
(b) Matriz 30°.



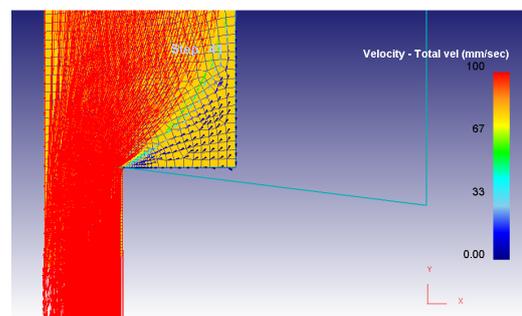
(c) Matriz 45°.



(d) Matriz 60°.

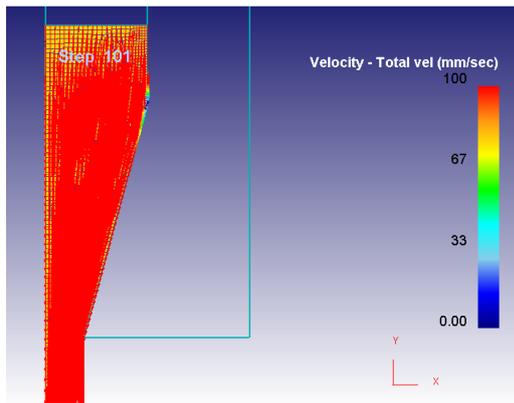


(e) Matriz 75°.

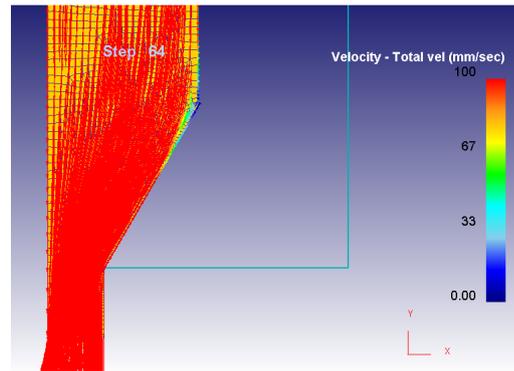


(f) Matriz 90°.

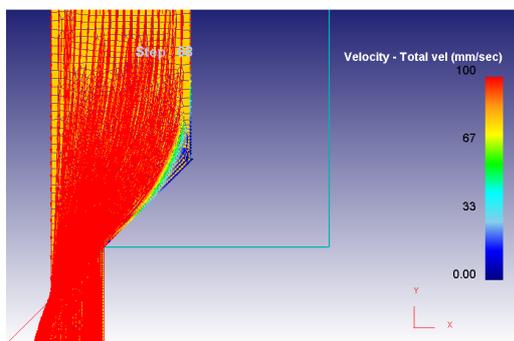
Figura 7.11 Zona muerta formada en las matrices con relación de extrusión $r_x = 6$.



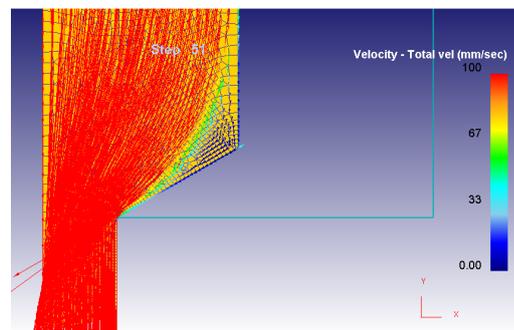
(a) Matriz 15°.



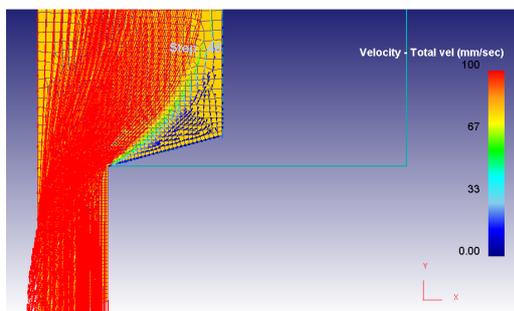
(b) Matriz 30°.



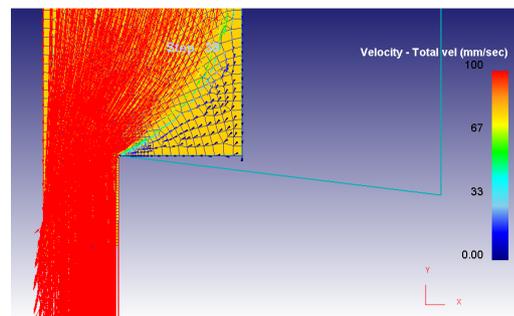
(c) Matriz 45°.



(d) Matriz 60°.



(e) Matriz 75°.



(f) Matriz 90°.

Figura 7.12 Zona muerta formada en las matrices con relación de extrusión $r_x = 7$.

7.3 Gráficas referentes a las velocidades de deformación

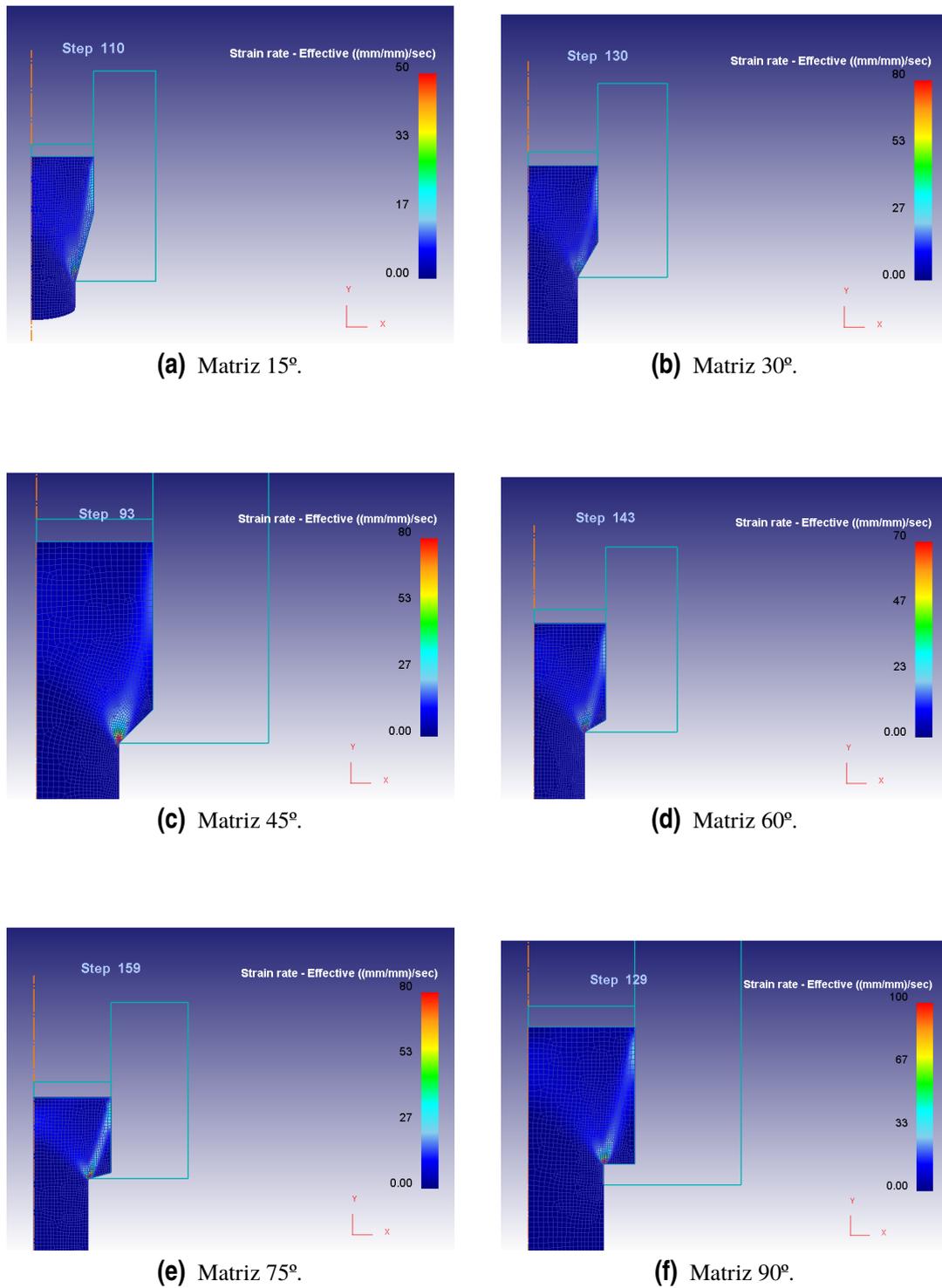
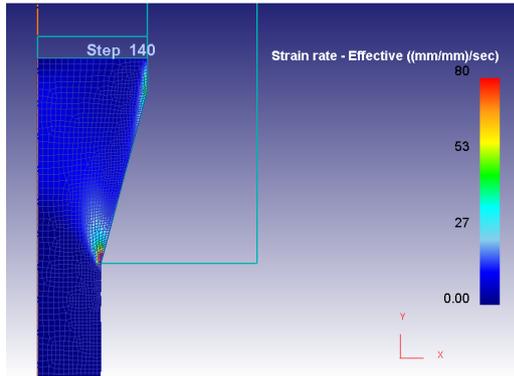
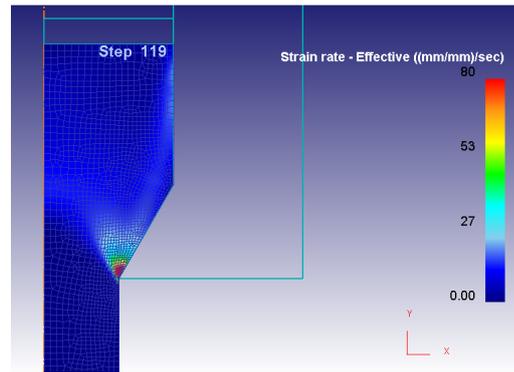


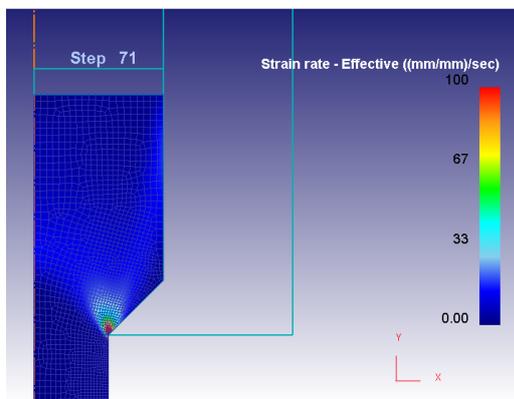
Figura 7.13 Velocidades de deformación del material a través de matrices con relación de extrusión $r_x = 2$.



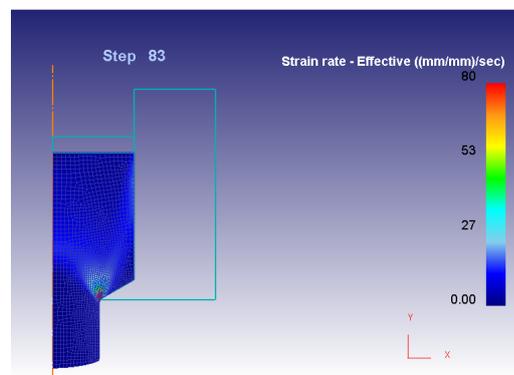
(a) Matriz 15°.



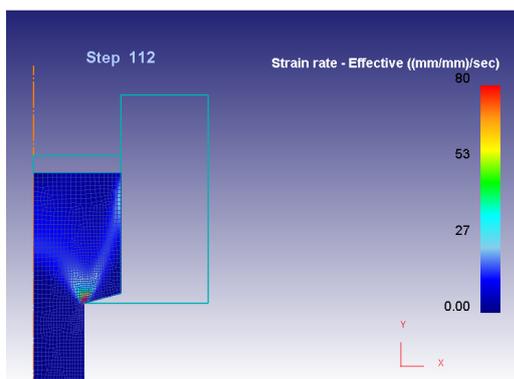
(b) Matriz 30°.



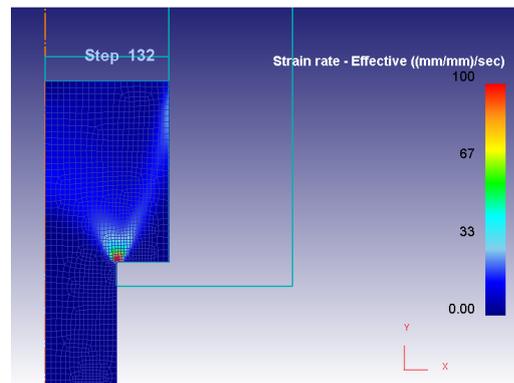
(c) Matriz 45°.



(d) Matriz 60°.

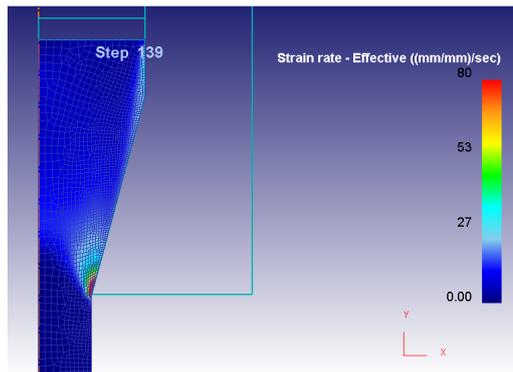


(e) Matriz 75°.

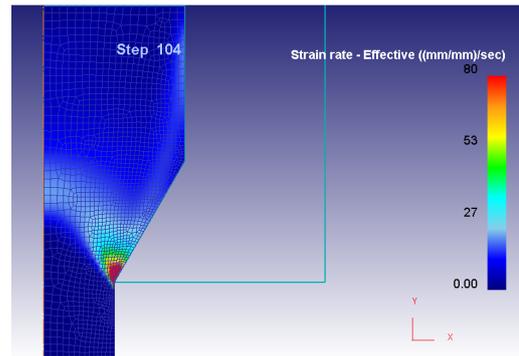


(f) Matriz 90°.

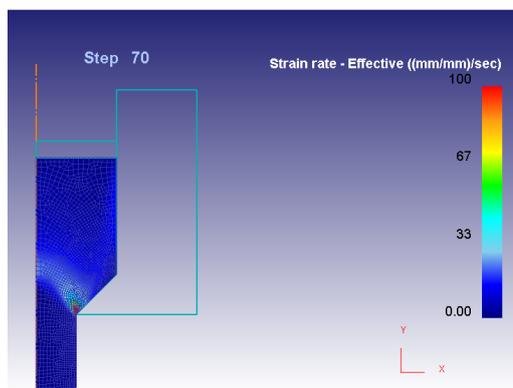
Figura 7.14 Velocidades de deformación del material a través de matrices con relación de extrusión $r_x = 3$.



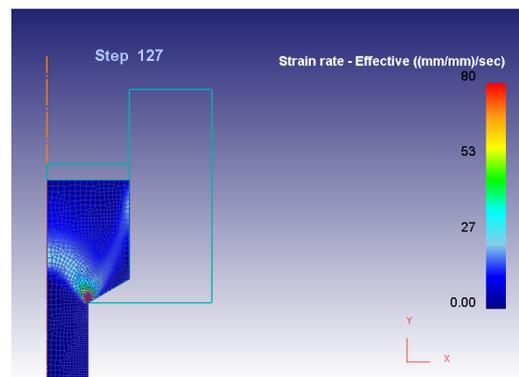
(a) Matriz 15°.



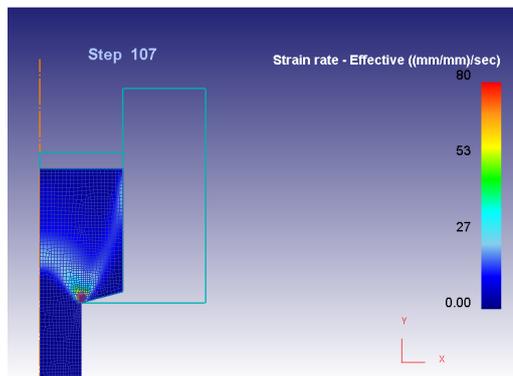
(b) Matriz 30°.



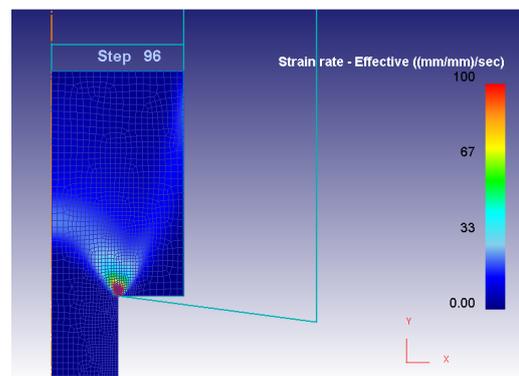
(c) Matriz 45°.



(d) Matriz 60°.



(e) Matriz 75°.



(f) Matriz 90°.

Figura 7.15 Velocidades de deformación del material a través de matrices con relación de extrusión $r_x = 4$.

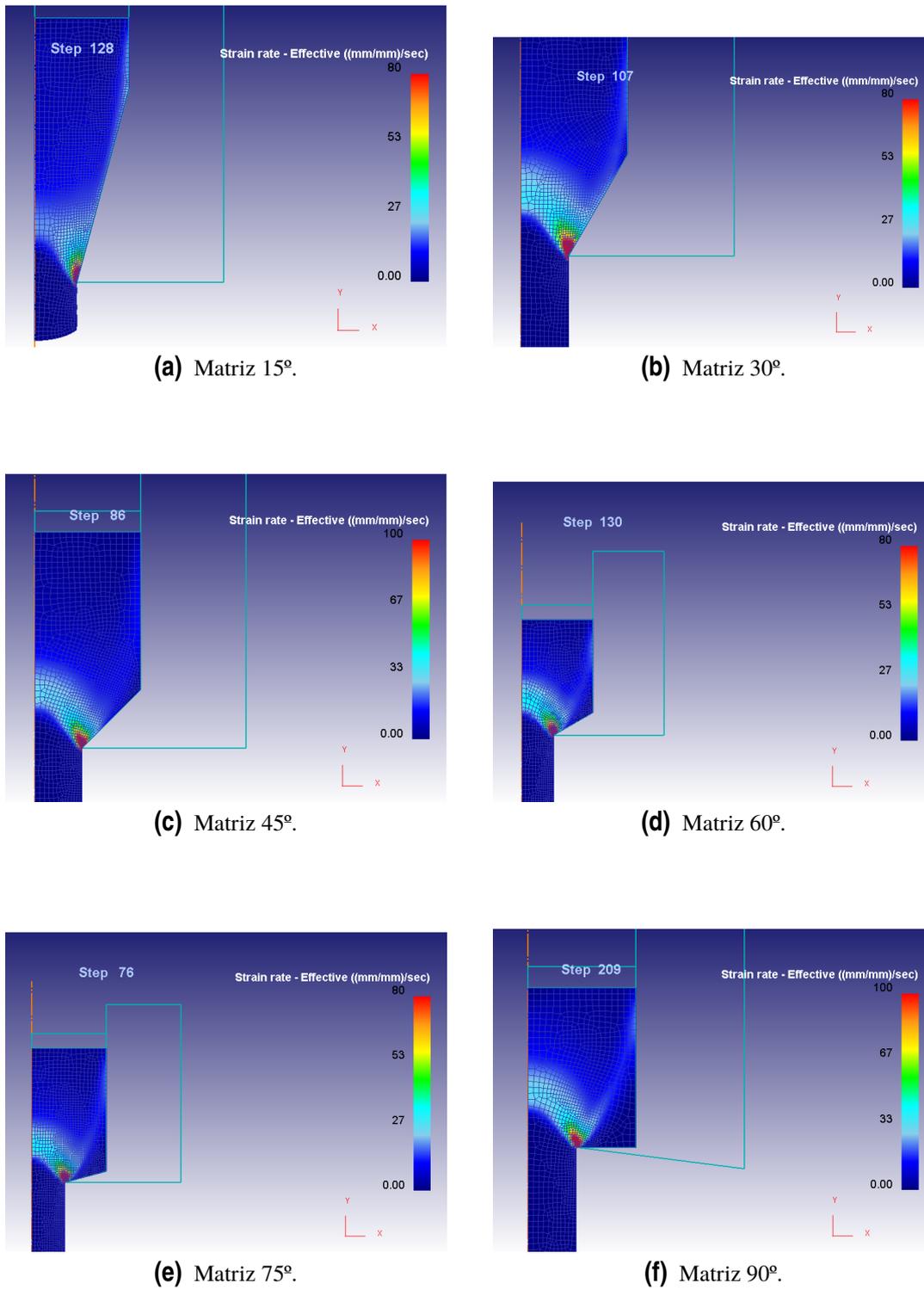
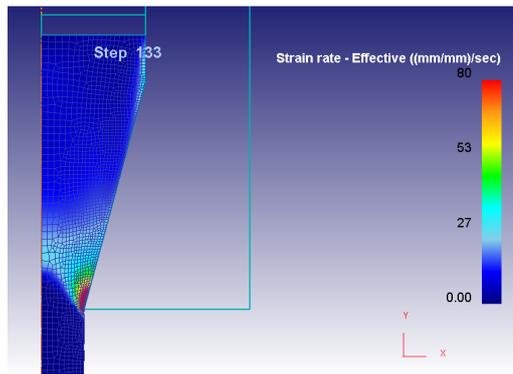
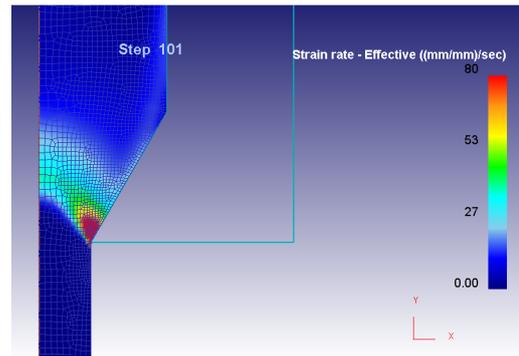


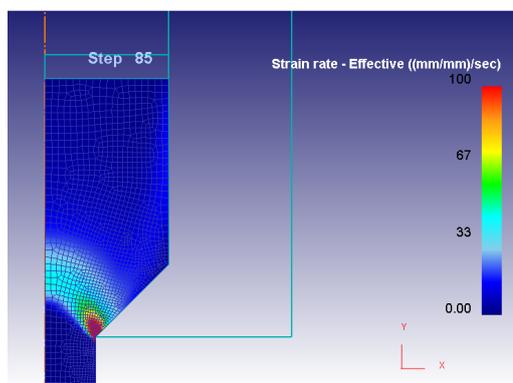
Figura 7.16 Velocidades de deformación del material a través de matrices con relación de extrusión $r_x = 5$.



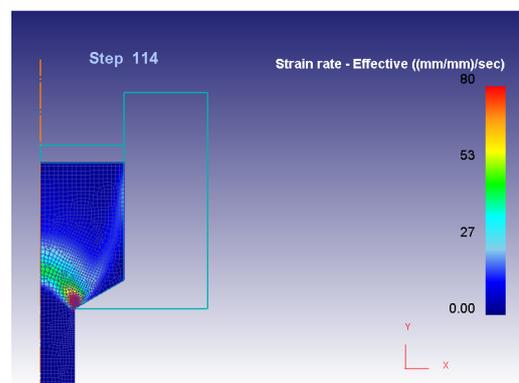
(a) Matriz 15°.



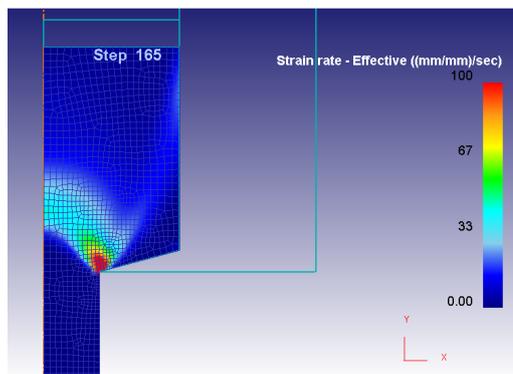
(b) Matriz 30°.



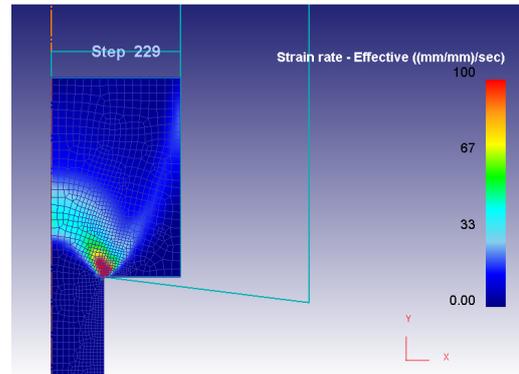
(c) Matriz 45°.



(d) Matriz 60°.

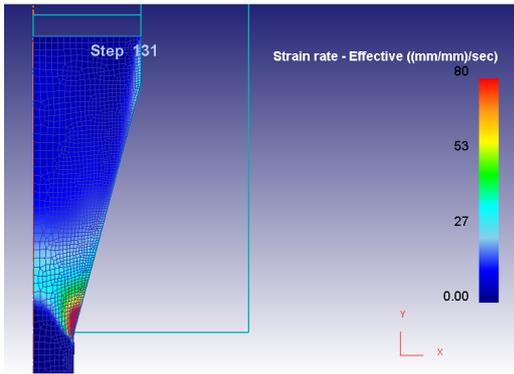


(e) Matriz 75°.

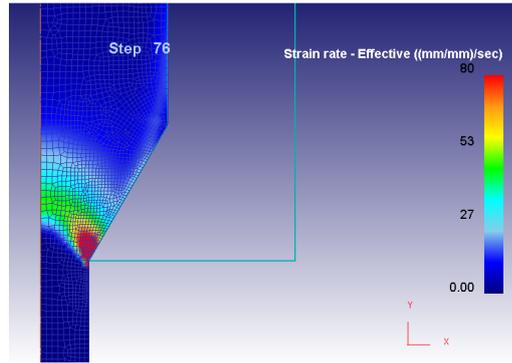


(f) Matriz 90°.

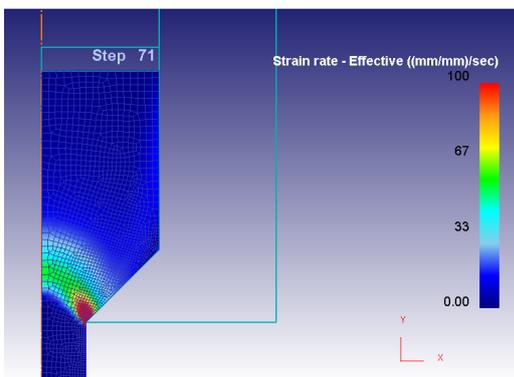
Figura 7.17 Velocidades de deformación del material a través de matrices con relación de extrusión $r_x = 6$.



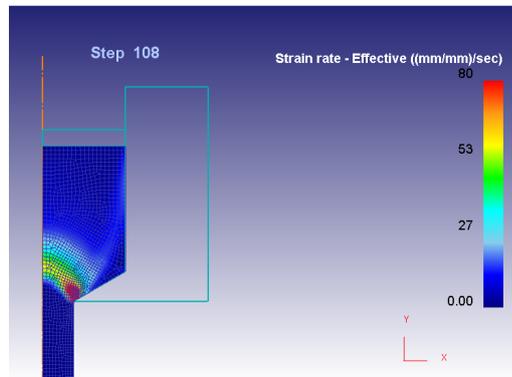
(a) Matriz 15°.



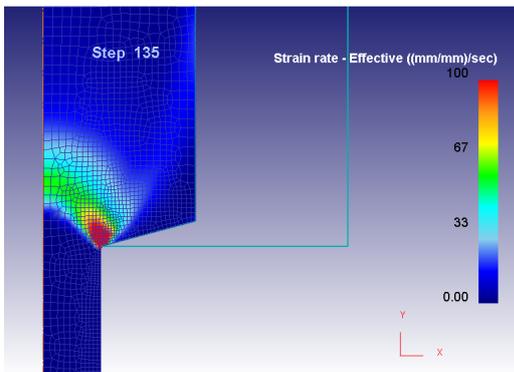
(b) Matriz 30°.



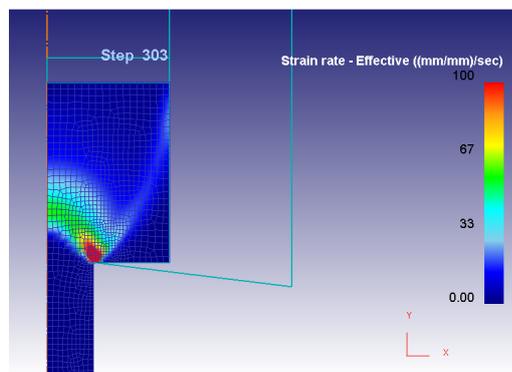
(c) Matriz 45°.



(d) Matriz 60°.



(e) Matriz 75°.



(f) Matriz 90°.

Figura 7.18 Velocidades de deformación del material a través de matrices con relación de extrusión $r_x = 7$.

7.4 Recopilación del conjunto de resultados obtenidos

Ángulo	Relación extrusión	Llenado de matriz(mm)	Máximo de la fuerza(mm)	Retardo absoluto del máximo(mm)
15	2	44,5554	53,79770	9,2423
30	2	18,79623	34,8359	16,0397
45	2	11,12953	28,7665	17,6370
60	2	6,265329	26,6624	20,3971
75	2	3,29628	24,9246	21,6283
90	2	0	24,0606	24,0606
15	3	50,3631	66,5367	16,1736
30	3	23,7095	39,2205	15,5110
45	3	13,82665	34,8204	20,9938
60	3	8,06968	29,5502	21,4805
75	3	3,60702	25,5724	21,9654
90	3	0	24,4848	24,4848
15	4	54,42876	70,5113	16,0825
30	4	25,4578	44,2472	18,7894
45	4	14,6832	36,2648	21,5816
60	4	8,4857	28,5712	20,0855
75	4	3,9082	26,5655	22,6573
90	4	0	25,7576	25,7576
15	5	56,64057	75,2101	18,5695
30	5	26,2871063	44,9855	18,6984
45	5	15,17703	36,9133	21,7363
60	5	8,76268	32,6355	23,8728
75	5	4,06711	27,1293	23,0622
90	5	0	28,9091	28,9091
15	6	57,97183	78,2086	20,2368
30	6	26,90495	46,2945	19,3896
45	6	15,5337	37,0688	21,5351
60	6	8,9686354	32,0482	23,0796
75	6	4,1627	30,4646	26,3019
90	6	0	27,0404	27,0404
15	7	58,845576	81,3346	22,4890
30	7	27,31046	49,3566	22,0461
45	7	15,76787	40,0577	24,2898
60	7	9,1038	33,1397	24,0359
75	7	4,225444	32,44110	28,2157
90	7	0	27,4545	27,4545

Figura 7.19 Conjunto de resultados de las simulaciones.

Índice de Figuras

2.1	Clasificación de los procesos de fabricación	3
2.2	Clasificación de los procesos de conformado de metales	4
2.3	Resultados teóricos del ensayo de tracción	6
2.4	Curva esfuerzo vs deformación	7
2.5	Esquema de la extrusión directa	8
2.6	Parámetros característicos de la extrusión directa	10
2.7	Curva presión vs desplazamiento	11
3.1	Esquema del problema en cuestión	13
4.1	Parámetros determinantes del problema	16
4.2	Velocidad cinemática durante el proceso de extrusión	17
4.3	Velocidad cinemática durante el proceso de extrusión en matrices de 30 grados	17
4.4	Velocidad cinemática durante el proceso de extrusión en matrices con ángulos mayores	18
4.5	Curva Fuerza vs Desplazamiento para matriz de 30 grados con $r_x = 4$	19
4.6	Curvas Fuerza vs Desplazamiento del pistón con referencia del llenado de la matriz	20
5.1	Relación tensión-deformación	22
5.2	Fuerza pistón vs Desplazamiento del pistón	23
5.3	Esquema explicativo de las velocidades de deformación durante el proceso de extrusión.	24
5.4	Influencia del ángulo de la matriz y la relación de extrusión r_x en el retraso de la fuerza	25
5.5	Existencia de la zona muerta en una matriz de 75 grados	27
7.1	Relaciones fuerza-desplazamiento del pistón con relación de extrusión $r_x = 2$	32
7.2	Relaciones fuerza-desplazamiento del pistón con relación de extrusión $r_x = 3$	33

7.3	Relaciones fuerza-desplazamiento del pistón con relación de extrusión $r_x = 4$	34
7.4	Relaciones fuerza-desplazamiento del pistón con relación de extrusión $r_x = 5$	35
7.5	Relaciones fuerza-desplazamiento del pistón con relación de extrusión $r_x = 6$	36
7.6	Relaciones fuerza-desplazamiento del pistón con relación de extrusión $r_x = 7$	37
7.7	Zona muerta formada en las matrices con relación de extrusión $r_x = 2$	38
7.8	Zona muerta formada en las matrices con relación de extrusión $r_x = 3$	39
7.9	Zona muerta formada en las matrices con relación de extrusión $r_x = 4$	40
7.10	Zona muerta formada en las matrices con relación de extrusión $r_x = 5$	41
7.11	Zona muerta formada en las matrices con relación de extrusión $r_x = 6$	42
7.12	Zona muerta formada en las matrices con relación de extrusión $r_x = 7$	43
7.13	Velocidades de deformación del material a través de matrices con relación de extrusión $r_x = 2$	44
7.14	Velocidades de deformación del material a través de matrices con relación de extrusión $r_x = 3$	45
7.15	Velocidades de deformación del material a través de matrices con relación de extrusión $r_x = 4$	46
7.16	Velocidades de deformación del material a través de matrices con relación de extrusión $r_x = 5$	47
7.17	Velocidades de deformación del material a través de matrices con relación de extrusión $r_x = 6$	48
7.18	Velocidades de deformación del material a través de matrices con relación de extrusión $r_x = 7$	49
7.19	Conjunto de resultados de las simulaciones	50

Índice de Tablas

2.1	Valores característicos del coeficiente de resistencia K y del exponente de endurecimiento por deformación, n , para metales seleccionados.	7
-----	---	---

Bibliografía

- [1] F.P. Carballo, F. París, Escuela Superior de Ingenieros Industriales de Sevilla. Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales, and Universidad de Sevilla. Escuela Superior de Ingenieros Industriales. Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales, *Teoría de la elasticidad*, Universidad de Sevilla, Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales, 1998.
- [2] Mikell P Grover, *Fundamentals of modern manufacturing*, 1996.
- [3] David Lukasak, *Do you know when to use the indirect extrusion process?*, 2018.
- [4] N Solomon and I Solomon, *Effect of die shape on the metal flow pattern during direct extrusion process*, *Revista de metalurgia* **46** (2010), no. 5, 396–404.
- [5] JP Tang and WT Wu, *'deform 2d user manual ver4. 0*, SFTC, USA (1994).