

Trabajo de Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

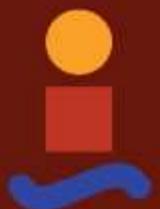
Diseño y construcción de una extrusora lateral y
obtención de fuerzas

Autor: Guillermo Pacheco Rufián

Tutor: Luis Valentín Bohórquez Jiménez

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

Sevilla, 2017



Trabajo de Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Diseño y construcción de una extrusora lateral y obtención de fuerzas

Autor:

Guillermo Pacheco Rufián

Tutor:

Luis Valentín Bohórquez Jiménez

Profesor Contratado Doctor

Dep. de Ingeniería Mecánica y Fabricación

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017

Trabajo de Fin de Grado: Diseño y construcción de una extrusora lateral y obtención de fuerzas

Autor: Guillermo Pacheco Rufián

Tutor: Luis Valentín Bohórquez Jiménez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

A mis compañeros

Agradecimientos

A mi tutor, D. Luis Valentín Bohórquez Jiménez, que fue quien concibió este proyecto de diseñar, construir y ensayar una máquina de extrusión lateral y me lo propuso.

A D. Manuel Sánchez Quiles, maestro de taller de esta escuela, porque sin su inestimable ayuda en forma de consejos y sin su trabajo en el taller este proyecto jamás podría haberse realizado.

Al profesor D. Andrés Jesús Martínez Donaire, porque igualmente sin su ayuda jamás podría haberse llevado a cabo los experimentos que dan validez a nuestro diseño.

A mi compañero Ramón Rico Descalzo, porque su proyecto, paralelo al mío pero con el uso de un programa de simulación, me ha sido de gran ayuda y me ha servido para orientar mis pasos a lo largo de este proyecto.

A mi padre, D. Antonio Pacheco Falcón, porque además de incentivar me a estudiar esta carrera, nos ha proporcionado parte del material necesario para realizar este proyecto y ha mostrado una gran predisposición para ayudarnos a buscar todo aquello que necesitáramos para el mismo.

Finalmente quisiera agradecer a todas y cada una de las personas que de un modo u otro han colaborado en la realización de este Trabajo de Fin de Grado. En particular al profesor D. Gabriel Centeno Báez, que fue la persona que me introdujo los procesos de extrusión en clases de Tecnología de Fabricación, aunque por entonces no imaginara que acabaría siendo el tema de mi Trabajo de Fin de Grado.

Guillermo Pacheco Rufián

Sevilla, 2017

Resumen

El objetivo de este proyecto ha sido el de investigar sobre los procesos de extrusión lateral, un tipo de extrusión poco tratado en los libros y artículos específicos, con el objetivo de diseñar nosotros mismos una sencilla extrusora lateral y luego ensayarla. En la mayoría de las fuentes en las que se hablan sobre procesos de extrusión la extrusión lateral es un proceso el cual se pasa un poco por encima, hasta el punto de que no se ha encontrado una fórmula, ni estimaciones ni cálculos referentes a la presión de extrusión necesaria para llevar a cabo un proceso de extrusión lateral.

Lo más parecido a estimar un proceso de extrusión lateral que se puede encontrar en la literatura específica son los denominados “Experimentos de Johnson”, en los cuáles su autor, W. Johnson, analiza la influencia de la geometría de la matrices y el flujo del material en la presión de extrusión. Aunque no utilizó una extrusora lateral propiamente dicha, algunas de las geometrías que ensayó Johnson y algunos de sus experimentos con flujos asimétricos aportan datos importantes acerca de cómo afectan el flujo del material y la geometría de la máquina a la presión de extrusión requerida, lo que no ha servido de guía para nuestro diseño.

Otro caso particular de gran interés es el llamado proceso de extrusión en canal angular constante (ECAE), un proceso único de conformado en frío que permite deformar intensamente un material sin variar las dimensiones iniciales del mismo. Este proceso consiste en extrudir en frío una barra de material a través de un canal con un ángulo a 90 grados y con idénticas dimensiones de entrada y salida. Por desgracia, a pesar de la similitud geométrica que existe entre la extrusión ECAE y la extrusión lateral, no son procesos similares. No obstante, al igual que con los experimentos de Johnson, los fundamentos analíticos de la extrusión ECAE nos han sido de mucha ayuda a la hora de afrontar nuestro diseño.

Tras una intensa búsqueda de información para tratar de comprender los procesos que rigen un ensayo de extrusión lateral, afrontamos el diseño de una máquina extrusora sencilla para extrudir probetas de metales blandos como plomo o estaño. Nuestro diseño consiste básicamente en un contenedor de acero que se tapa en el extremo inferior mediante un macho con una pequeña inclinación para dirigir el flujo de material hacia la matriz. Para las matrices decidimos utilizar tornillos taladrados en el centro con el diámetro elegido y como elemento portamatriz se utilizó una tuerca soldada al contenedor.

En cuanto a la fabricación de la extrusora, decidimos valernos en la medida de lo posible de todo el material que pudiéramos encontrar en el taller de fabricación, en particular de tubos y barras de acero con el consiguiente ahorro de tiempo y dinero. Los tornillos y la tuerca se tuvieron que buscar fuera. Todos los elementos han sido mecanizados en los talleres de la escuela.

Todos los cálculos y el diseño de nuestra extrusora lateral se hicieron pensando en utilizar como prensa una máquina universal con 250 kN de capacidad, pero finalmente dicha máquina tenía instalada una célula de carga de 50 kN, lo que limitó el alcance de nuestros experimentos. Estaba pensado realizarse varios ensayos con estaño y plomo y finalmente tuvimos que ensayar con probetas de plomo y plastilina. También por cuestiones de tiempo los experimentos se redujeron a un ensayo con plomo y otro con plastilina.

Los resultados de nuestros experimentos y las conclusiones que hemos sacado de estos son poco esclarecedoras ya que consideramos que para realizar un buen análisis del proceso de extrusión lateral habrían sido necesarios muchos más ensayos. Una buena metodología habría implicado controlar exhaustivamente todas las variables del proceso, como por ejemplo la temperatura, o caracterizar adecuadamente los materiales a extrudir mediante ensayos de aplastamiento, todo esto se tuvo que obviar por cuestiones de tiempo. De igual modo la simulación mediante el software DEFORM 3D se supone que debía haber sido un proceso paralelo al diseño analítico de la extrusora, pero nuevamente no pudimos coordinar nuestros esfuerzos.

Por último, no quisieramos acabar con el desánimo de la falta de tiempo, problemas de coordinación, etc. Obviamente los problemas a los que nos enfrentamos fueron muchos y el tiempo es un factor esencial, pero hemos profundizado en el conocimiento del flujo de material y de la geometría a la hora de calcular un proceso de extrusión, se ha diseñado una extrusora sencilla y barata que cumple bien con su cometido y hemos comprobado que los procesos de extrusión son fáciles de implementar con el equipo adecuado. A falta de que la simulación con software arroje más luz sobre nuestros experimentos, estamos seguro de que alguien con la misma dedicación y más tiempo podrá valerse del trabajo aquí iniciado para seguir profundizando en el estudio de la extrusión lateral.

Abstract

The purpose of this project has been the investigation of the lateral extrusion processes, a type of extrusion that has not been dealt with in the specific books and articles, with the aim of designing ourselves a simple lateral extruder and then testing it. In most of the sources in which extrusion processes are discussed, lateral extrusion is a process that is passed a little above, to the point that no formula has been found, neither any estimations or calculations regarding the necessary pressure of extrusion to carry out a lateral extrusion process.

The nearest point to estimating a lateral extrusion process that can be found in the specific literature are the so-called "Johnson Experiments", in which its author, W. Johnson, analyzes the influence of the geometry of the dies and the flow of the materials in the extrusion pressure. Although not using a side extruder proper, some of the geometries tested by Johnson and some of his experiments with asymmetric flows provide important information about how they affect the flow of material and the geometry of the machine at the required extrusion pressure. His works have served us as a guide for our design.

Another particular case of great interest is the so-called Equal Channel Angular Extrusion process (ECAE), a unique cold forming process that allows the deformation of a material without changing its initial dimensions. This process consists of cold extruding a bar of material through a channel with an angle of 90 degrees and with identical dimensions of input and output. Unfortunately, despite the similarity of gauge between ECAE extrusion and lateral extrusion, they are not similar processes. However, as with Johnson's experiments, the analytical fundamentals of ECAE extrusion have been very helpful in our design.

After an intense research for information to try to understand the processes that govern a lateral extrusion test, we faced the design of a simple extruder to extrude samples of soft metals such as lead or tin. Our design basically consists of a steel container that is capped at the lower end by an in-male with a small inclination to direct the flow of material towards the die. For the dies we decided to use screws drilled in the center with the chosen diameter and as a matrix element, a nut welded to the container was used.

As far as the manufacture of the extruder is concerned, we decided to use as much material as possible in the manufacturing shop, in particular steel tubes and bars, saving time and money. The screws and the nut had to be searched out. All elements have been machined in our school workshops.

All calculations and the design of our side extruder were made with the intention of using a universal machine with 250 kN capacity as a press, but finally the machine had a 50 kN load cell installed, which limited the scope of our experiments. It was planned to carry out several tests with tin and lead and finally we had to try with lead and plasticine test pieces. Also for reasons of time the experiments were reduced to one test with lead and one with plasticine.

The results of our experiments and the conclusions we have drawn from them are not very enlightening since we consider that to carry out a good analysis of the lateral extrusion process many more tests would have been necessary. A good methodology would have involved exhaustively controlling all process variables, such as temperature, or properly characterizing the materials to be extruded by crushing tests, all of which had to be obviated over time. Likewise, the simulation using DEFORM 3D software was supposed to have been a parallel process to the extruder's design, but again we could not coordinate our efforts.

Finally, we do not want to end the discouragement of lack of time, problems of coordination, etc. Obviously the problems we faced were many and time is an essential factor, but we have deepened our knowledge of the flow of material and geometry when calculating an extrusion process, a simple and inexpensive extruder has been designed Which performs well with its mission and we have verified that the extrusion processes are easy to implement with the right equipment. In the absence of software simulation throwing more light on our experiments, we are sure that someone with the same dedication and more time will be able to use the work started here to further deepen the study of lateral extrusion.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Tablas	xix
Índice de Figuras	xxi
Notación	xxv
1 Fundamentos teóricos de la extrusión	1
<i>1.1 Introducción</i>	<i>1</i>
<i>1.2 Tipos de extrusión</i>	<i>2</i>
1.2.1 Extrusión directa	2
1.2.2 Extrusión indirecta	2
1.2.3 Extrusión lateral	3
1.2.4 Extrusión hidrostática	3
1.2.5 Extrusión en frío	4
1.2.6 Extrusión por impacto	4
<i>1.3. Variables de un proceso de extrusión</i>	<i>5</i>
1.3.1 Lubricación	5
1.3.2 Temperatura	6
1.3.3 Velocidad de extrusión	8
1.3.4 Geometría de la matriz	11
1.3.5 Relación de extrusión	11
<i>1.4. Materiales de extrusión</i>	<i>13</i>
<i>1.5. Defectos de extrusión</i>	<i>13</i>
1.5.1 Agrietamiento interno o en V	13
1.5.2 Defecto tubo o cola de pescado	13
1.5.3 Agrietamiento de la superficie	14

2 Cálculo y diseño de una extrusora lateral	15
2.1. <i>Fundamentos de la extrusión lateral</i>	15
2.2. <i>Experimentos de Johndon para localizaciones inusuales del orificio de la matriz</i>	18
2.3. <i>Caso particular: Extrusión en canal angular constante (ECAE)</i>	23
2.4. <i>Consideraciones de diseño</i>	25
2.5. <i>Material de extrusión</i>	26
2.6. <i>Preformas</i>	27
2.7. <i>Cálculo de la fuerza de extrusión necesaria</i>	27
2.7.1 Tipo de extrusión	28
2.7.2 Lubricación	29
2.7.3 Incremento de deformación del proceso	29
2.7.4 Coeficientes experimentales de Johnson	30
2.7.5 Extrusión en caliente	30
2.7.6 Factor de forma	31
2.7.7 Presión de extrusión	32
2.7.8 Fuerza de extrusión	32
2.8. <i>Cálculo del contenedor</i>	33
2.9. <i>Diseño de la matriz de extrusión</i>	36
2.10. <i>Consideraciones del diseño</i>	37
3 Construcción de una extrusora lateral	45
3.1. <i>Construcción del contenedor</i>	45
3.2. <i>Construcción de la matriz</i>	48
3.3. <i>Construcción del pistón</i>	49
3.4. <i>Consideraciones finales del apartado de construcción</i>	51
4 Trabajo experimental	53
4.1. <i>Máquina universal</i>	53
4.2. <i>Preparación de las probetas de plomo</i>	53
4.3. <i>Cálculo del enfriamiento de una probeta de plomo</i>	55
4.4. <i>Lubricación para la extrusión de una probeta de plomo</i>	58
4.5. <i>Proceso de extrusión de la probeta de plomo</i>	59
4.6. <i>Ensayo de extrusión de una probeta de plastilina</i>	62
4.6.1. Motivación del uso de la plastilina	62
4.6.2. Propiedades del material	63
4.6.3. Cálculo de la fuerza de extrusión necesaria	63
4.6.4. Preparación de las probetas	64
4.6.5. Lubricación para la extrusión de una probeta de plastilina	65
4.6.6. Proceso de extrusión	66

5 Análisis de resultados	73
<i>5.1. Ensayo de extrusión del plomo</i>	73
<i>5.2. Ensayo de extrusión de la plastilina</i>	76
6 Conclusión	79
Anexo I: Plano de la extrusora lateral	81
Bibliografía	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1–1. Materiales y temperaturas normales de extrusión	6
Tabla 1–2. Materiales y velocidades típicas de extrusión	8
Tabla 1–3. Relación de extrusión y presión necesaria para extrudir plomo a 15°C	12
Tabla 2–1. Parámetros de proceso ECAE en múltiples extrusiones para $2\phi=90^\circ$	25
Tabla 2–2. Propiedades de los materiales de extrusión que se van a utilizar	27
Tabla 2–3. Esfuerzo normal permisible para elementos de acero	35
Tabla 4–1. Parámetros de proceso ECAE en múltiples extrusiones para $2\phi=90^\circ$	56
Tabla 4–2. Propiedades de los materiales de extrusión que se van a utilizar	56
Tabla 4–3. Valores de K, m y n para las distintas plastilinas comerciales	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Extrusión directa	2
Figura 1-2. Extrusión indirecta	2
Figura 1-3. Extrusión lateral	3
Figura 1-4. Extrusión hidrostática	3
Figura 1-5. Extrusión en frío	4
Figura 1-6. Extrusión por impacto	4
Figura 1-7. Efectos de la lubricación en los procesos de extrusión	5
Figura 1-8. Efectos de la temperatura en los procesos de extrusión	8
Figura 1-9. Relación entre velocidad, presión y temperatura para extrudir cadmio y plomo	9
Figura 1-10. Efecto de la velocidad en el incremento de temperatura en la extrusión de plomo	10
Figura 1-11. Efecto de la velocidad en el incremento de temperatura en la extrusión de aluminio	10
Figura 1-12. Diferentes geometrías que se pueden lograr mediante la extrusión	11
Figura 1-13. Defectos típicos de los procesos de extrusión	14
Figura 2-1. Extrusión lateral. Conformado de discos	15
Figura 2-2. Extrusión lateral	16
Figura 2-3. Extrusión de una preforma con lubricación	16
Figura 2-4. Extrusión de una preforma sin lubricación	17
Figura 2-5. Extrusión con flujo asimétrico	17
Figura 2-6. Extrusión con flujo asimétrico	18
Figura 2-7. Extrusión lateral parcial	18
Figura 2-8. Extrusión a través de una matriz escalonada	18
Figura 2-9. Diagrama de los parámetros que influyen en el cálculo de la presión de extrusión	19
Figura 2-10. Variación de $p/2k$ con respecto a r y e	20

Figura 2-11. Extrusión con el orificio de salida en uno de los extremos de la matriz	21
Figura 2-12. Matriz para extrusión directa con igual ángulo ϕ que la matriz de la figura 2-11	21
Figura 2-13. Gráfica $p/2k - r'$	22
Figura 2-14. Extrusión ECAE	24
Figura 2-15. Máquina universal para someter materiales tanto a tracción como a compresión	26
Figura 2-16. Variación de la presión para extrusión en función del recorrido del vástago	28
Figura 2-17. Esfuerzos radiales y tangenciales en la sección de un cilindro	33
Figura 2-18. Distribución de esfuerzos radiales y tangenciales en la sección de un cilindro	34
Figura 2-19. Gráfica fuerza de extrusión y ángulo de la matriz	36
Figura 2-20. Diseño de matrices para materiales férricos y no férricos	37
Figura 2-21. Diseño gráfico del contenedor	38
Figura 2-22. Diseño gráfico del casquillo de la matriz	38
Figura 2-23. Diseño gráfico de la matriz	39
Figura 2-24. Diseño gráfico del macho inferior	39
Figura 2-25. Diseño gráfico de la tuerca de apriete	40
Figura 2-26. Diseño gráfico del émbolo o pistón	40
Figura 2-27. Diseño gráfico del conjunto de la extrusora lateral	41
Figura 2-28. Vista del encaje del macho inferior con el contenedor	41
Figura 3-1. Tubo con respecto a la cogida superior de la máquina universal	45
Figura 3-2. Tubo con respecto a la cogida inferior de la máquina universal	45
Figura 3-3. Tuerca de métrica 20	46
Figura 3-4. Tuerca soldada al tubo	46
Figura 3-5. Barra de acero de 50 mm de diámetro	47
Figura 3-6. Macho inferior terminado y con su tuerca de apriete	47
Figura 3-7. Macho interior terminado y con la tuerca de apriete	48
Figura 3-8. Tornillo para fabricar matrices	48
Figura 3-9. Matriz de 12 mm fabricada a partir del tornillo	48
Figura 3-10. Barra de acero de 50 mm de diámetro y segueta	49
Figura 3-11. Pistón con su tuerca de apriete	49

Figura 3-12. Pistón colocado en la cogida superior de la máquina	50
Figura 3-13. Fabricación de las tuercas de apriete	51
Figura 4-1. Célula de carga de 50 kN de la máquina universal	53
Figura 4-2. Barras de plomo fabricadas mediante fundición en un molde metálico	54
Figura 4-3. Probetas de plomo de 50 mm	54
Figura 4-4. Horno del taller	58
Figura 4-5. Grafito en polvo	59
Figura 4-6. Pistón bajado hasta el tope inferior de la extrusora	60
Figura 4-7. Inicio del experimento de extrusión de la probeta de plomo	61
Figura 4-8. Gráfica fuerza-desplazamiento de la extrusión de la probeta de plomo	62
Figura 4-9. Plastilina	65
Figura 4-10. Rulo de plastilina	65
Figura 4-11. Probetas de plastilina	65
Figura 4-12. Aceite de parafina utilizado como lubricante para la plastilina	66
Figura 4-13. Producto extruido al principio del ensayo	67
Figura 4-14. Producto extruido a mitad del ensayo	67
Figura 4-15. Producto extruido al final del ensayo	67
Figura 4-16. Producto extruido final	68
Figura 4-17. Parámetros del ensayo final con plastilina	68
Figura 4-18. Salida del producto extruido a través de la matriz	69
Figura 4-19. Recogida del producto extruido con la matriz	69
Figura 4-20. Vista del perfil del resto de la extrusión	70
Figura 4-21. Vista de frente del resto de la extrusión	70
Figura 4-22. Gráfica fuerza-desplazamiento de la extrusión de la probeta de plastilina	71

Notación

A^*	Conjugado
c.t.p.	En casi todos los puntos
c.q.d.	Como queríamos demostrar
■	Como queríamos demostrar
e.o.c.	En cualquier otro caso
e	número e
Re	Parte real
Im	Parte imaginaria
sen	Función seno
tg	Función tangente
arctg	Función arco tangente
sen	Función seno
$\sin^x y$	Función seno de x elevado a y
$\cos^x y$	Función coseno de x elevado a y
Sa	Función sampling
sgn	Función signo
rect	Función rectángulo
Sinc	Función sinc
$\partial y \partial x$	Derivada parcial de y respecto
x°	Notación de grado, x grados.
$\Pr(A)$	Probabilidad del suceso A
SNR	Signal-to-noise ratio
MSE	Minimum square error
:	Tal que
<	Menor o igual
>	Mayor o igual
\	Backslash
\Leftrightarrow	Si y sólo si

1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA EXTRUSIÓN

Introducción

La extrusión es un proceso de conformado que se utiliza para fabricar objetos con una sección transversal definida y fija. Al material de partida, generalmente una preforma cilíndrica, se le fuerza, aplicando una compresión sobre la preforma, a salir a través de un orificio con la forma de la sección transversal deseada. Así la geometría del orificio de salida queda grabada en toda la longitud del producto extruido.

El primer proceso de extrusión fue patentado por un herrero e inventor inglés, Joseph Bramah, en el año 1797. Bramah diseñó un proceso para extrudir tuberías de plomo que involucraba precalentar el material para luego forzarlo a través de una matriz valiéndose de un pistón de empuje accionado de forma manual. En el año 1820 Thomas Burr implementó un sistema similar para producir tuberías de plomo pero en esta ocasión usando una prensa hidráulica de mayor fuerza. Poco después, en el 1894, Alexander Dick expandió el proceso de extrusión a otros metales como el cobre y el latón. Posteriormente, en la década de 1950 el proceso de extrusión se generalizó para los aluminios y los aceros.

Hoy día el proceso de extrusión es muy utilizado para obtener piezas de gran longitud con una sección constante como pueden ser barras, perfiles y tubos. Las principales ventajas del proceso de extrusión son:

- Capacidad para crear secciones transversales bastante complejas.
- Se reducen los riesgos de fractura, ya que el material solamente va a estar sometido a esfuerzos de compresión.
- No se derrocha material.
- El producto extruido adquiere generalmente una muy buena terminación superficial.

Los materiales extruidos comúnmente incluyen metales, polímeros, cerámicas, el hormigón y productos alimenticios. No obstante nosotros nos centraremos en el proceso de extrusión para los metales únicamente.

Atendiendo a la temperatura del proceso la extrusión puede ser en frío o en caliente.

El equipo para la extrusión consiste básicamente en 3 elementos:

1. Una prensa que es la que aplica la fuerza.
2. Un contenedor en el cual se deposita el material a extrudir
3. Una matriz a través de la cual se fuerza al material a pasar para que adquiera la forma.

Tipos de extrusión

Extrusión directa

La preforma es presionada por un pistón que la fuerza a deformarse para salir a través de la matriz de extrusión. En la extrusión directa la salida del material y el movimiento del pistón van en la misma dirección.

Es el tipo de extrusión más fácil de implementar pero por otro lado requiere grandes presiones dado el rozamiento entre la preforma y la cámara. Dicho rozamiento va disminuyendo a medida que va saliendo el material ya que es menor la superficie de contacto entre la preforma y el contenedor. Lo más simple para disminuir las presiones requeridas es lubricar la cámara.

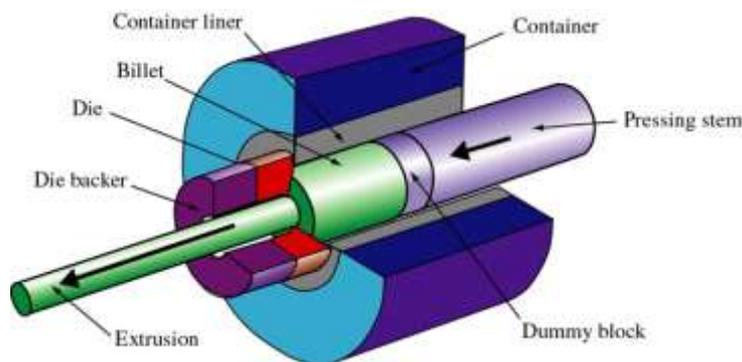


Figura 1-1. Extrusión directa

Extrusión indirecta

En este caso el pistón es la propia matriz de extrusión. Cuando se extruden piezas de sección llena, el vástago que empuja a la matriz contra la preforma es hueco para que la pieza salga por dentro del mismo. Si las piezas son huecas el vástago queda por dentro de la pieza.

No hay movimiento relativo entre el material y el contenedor, por lo que no existe fricción entre ambos. Sin embargo, aunque las presiones para extrudir inversamente no son tan grandes, el pistón no puede ser tampoco tan robusto como en la extrusión directa, lo que hace que no se puedan desarrollar fuerzas tan grandes como en la extrusión directa.

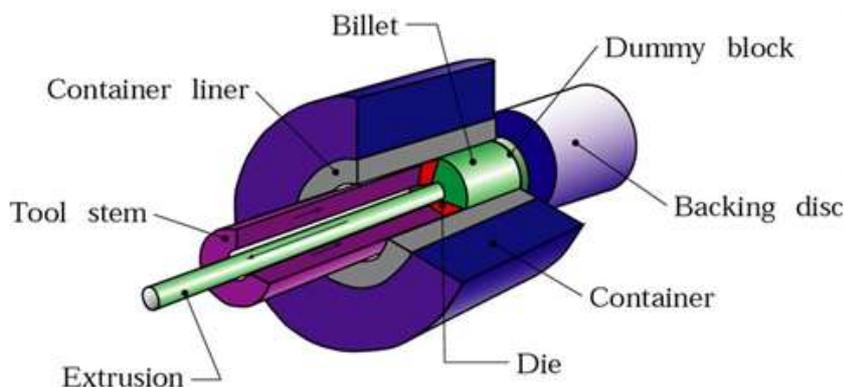


Figura 1-2. Extrusión indirecta

Extrusión lateral

Se trata de una variante de la extrusión directa. La preforma se aloja en un contenedor y un pistón la empuja para forzarla a salir a través de la matriz, la diferencia radica en que la dirección de salida del producto extruido y la del movimiento del pistón van a ser perpendiculares.

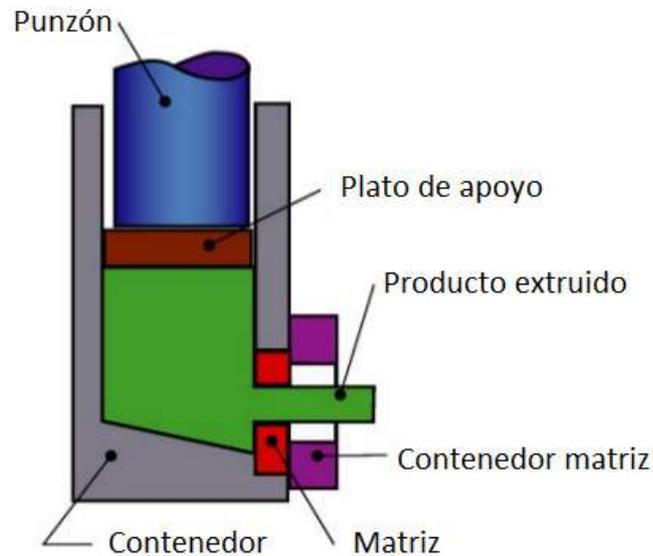


Figura 1-3. Extrusión lateral

Extrusión hidrostática

Es una modificación de la extrusión directa para eliminar la fricción en la cámara y a la vez generar un estado tensional en la preforma que facilite su entrada a la matriz. Este método consiste en interponer entre la preforma y las paredes del contenedor y el pistón un fluido. Cuando el pistón empuja al líquido, éste transmite una presión hidrostática a todos los puntos de la preforma.

El principal inconveniente radica en garantizar la estanqueidad de la cámara y en que es necesario mecanizar la preforma previamente para que ajuste con la matriz desde el comienzo.

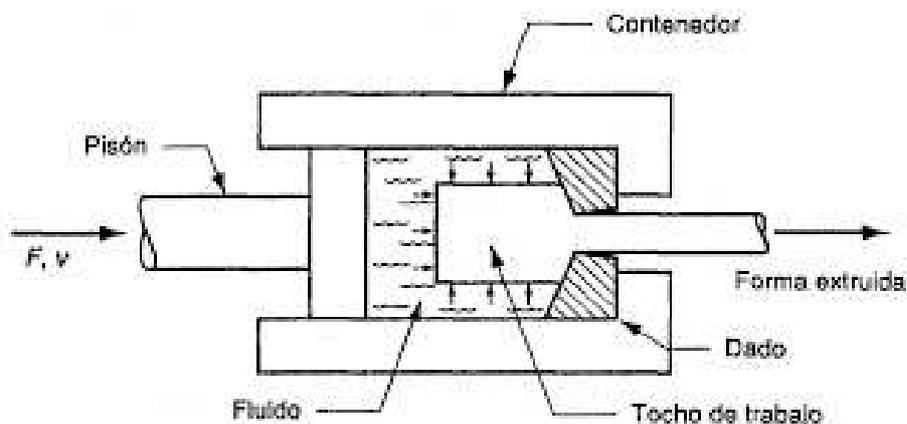


Figura 1-4. Extrusión hidrostática

Extrusión en frío

La extrusión en frío es un proceso concreto independientemente de que todos los procesos de extrusión puedan realizarse en frío o en caliente.

Se trata de un proceso que combina la extrusión directa, extrusión indirecta y forja.

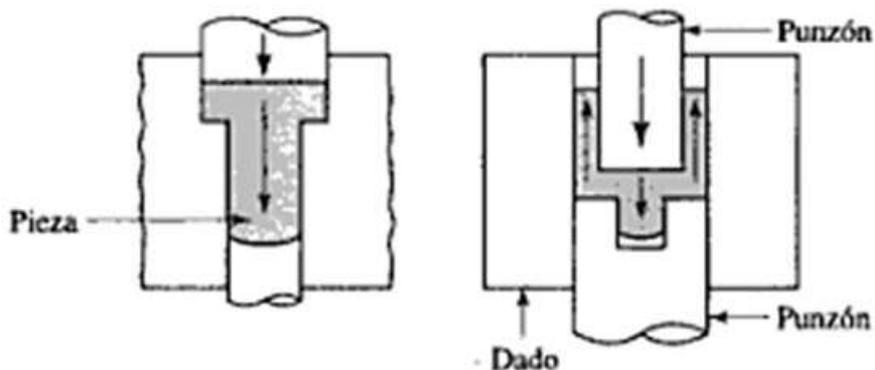


Figura 1-5. Extrusión en frío

Extrusión por impacto

La característica principal de la extrusión por impacto, como su propio nombre sugiere, es la violenta aplicación de la fuerza de extrusión. El pistón en vez de empujar la preforma la golpea con mucha fuerza. Normalmente se realiza en frío o con materiales que posean una buena ductilidad, ya que su aplicación principal es la fabricación de elementos de paredes muy delgadas.

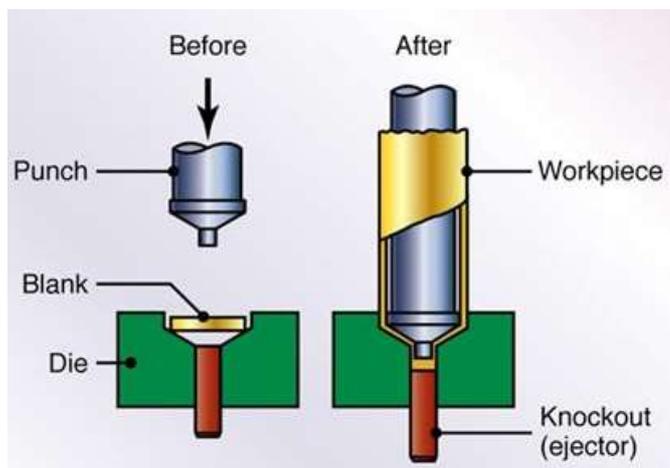


Figura 1-6. Extrusión por impacto

Variables de un proceso de extrusión

Las variables más importantes de un proceso de extrusión son:

Lubricación

La presión y la fuerza de extrusión disminuyen considerablemente con el uso de un lubricante apropiado. Los lubricantes disminuyen la fricción entre la preforma, matriz y el contenedor y protegen las herramientas del desgaste y calentamiento excesivo.

La fricción tiene una gran influencia en la forma en la que el material fluye durante la extrusión, lo cual influye directamente en la presión de extrusión necesaria para llevar a cabo el proceso. Además los defectos que se pueden dar en el proceso de extrusión tienen mucho que ver con la manera en que el metal se va deformando.

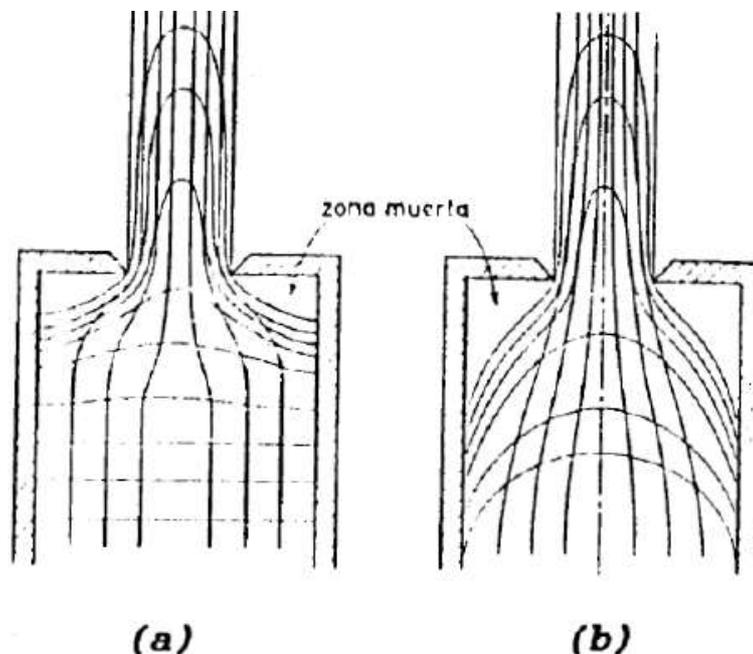


Figura 1-7. Efectos de la lubricación en los procesos de extrusión

La figura (a) corresponde a una preforma bien lubricada, que se desliza por las paredes del contenedor. La deformación es relativamente uniforme hasta las inmediaciones de la entrada a la matriz, ahí el metal crea una zona muerta para favorecer el flujo hacia la matriz. Esta zona muerta de metal estancado sufre poca deformación. Como podemos observar el centro la preforma sufre un alargamiento casi perfecto mientras que los elementos próximos a la superficie sufren un intenso cizallamiento al atravesar la matriz.

La figura (b) representa una preforma sin lubricación, que se adhiere a las paredes del contenedor. La deformación no es uniforme y la zona muerta es mucho mayor que para el caso (a). Como la velocidad del metal es mayor en el centro que en la superficie los esfuerzos de cizallamiento ocurren en la entrada de la matriz y en el contenedor.

Algunas aleaciones de aluminio son posibles de extrudir sin utilizar lubricación, incluso para producir secciones complejas, sin embargo la mayoría de las aleaciones del resto de metales se extruden utilizando algún tipo de lubricante. Entre los lubricantes más destacados en el proceso de extrusión están el grafito y una variedad de lubricantes de base de vidrio.

Entre los lubricantes podemos encontrar mezclas comerciales de grasa que contienen películas lubricantes de grafito, grafito en polvo o el vidrio en polvo. También se usan algunos polímeros para procesos a elevadas temperaturas. La selección de uno u otro lubricante se basa principalmente en la temperatura de extrusión. Para temperaturas bajas el uso de un lubricante tiene un único objetivo, reducir la fricción, mientras que a temperaturas medias o altas se busca además evitar el sobrecalentamiento del equipo e impedir la oxidación.

Atendiendo a la temperatura de extrusión los lubricantes utilizados son:

- **< 1000°C:** Grasas lubricantes, grafito, mica, bentonita, bisulfato de molibdeno y plásticos.
- **>1000°C:** Vidrio, basalto y polvos cristalinos.

Temperatura

Es bien sabido que al aumentar la temperatura de una pieza de trabajo las propiedades mecánicas del material cambian: disminuye su resistencia y aumentan la ductilidad y la tenacidad del mismo. Desde tiempos inmemoriales el hombre ha sabido aprovechar el efecto de la temperatura y ha calentado los metales para poder trabajarlos con más facilidad.

Dado que en la mayoría de los procesos de extrusión implican grandes deformaciones la mayoría de los metales se extruden en caliente, aunque hay algunas aleaciones de aluminio que se pueden extrudir en frío.

En la extrusión en frío se logran una mayor resistencia debida al endurecimiento por deformación, tolerancias estrechas, acabados superficiales mejores, ausencia de capas de óxido y altas velocidades de producción. Sin embargo la disminución de la presión y la fuerza necesarias para extrudir debido al calentamiento lleva a que la mayoría de las aleaciones metálicas se extrudan en caliente.

Tabla 1–1 Materiales y temperaturas normales de extrusión

Material	Temperatura (°C)
Plomo	200-250
Aluminio y sus aleaciones	375-475
Cobre y sus aleaciones	650-975
Aceros	875-1300
Aleaciones refractarias	975-2200

No obstante aunque las presiones y fuerzas necesarias para la extrusión disminuyen mucho al aumentar la temperatura, también tiene sus inconvenientes:

- Mayor desgaste de las matrices.
- Deformación no uniforme debido al enfriamiento en la cámara.
- Peor acabado superficial debido a la aparición de una capa de óxido.

Por ello lo más conveniente es intentar trabajar a la temperatura más baja posible que proporcione al material una ductilidad suficiente. La temperatura de trabajo más alta es aquella en que aparece la fragilidad en caliente o, en los metales puros el punto de fusión. También es necesario tener en cuenta que las deformaciones producidas por la extrusión son muy intensas por lo que el calentamiento interno va a ser considerable. Es por ello que a la hora de calentar una preforma hay que dejar siempre un margen para que no se alcance nunca la fragilidad en caliente o el punto de fusión.

La temperatura de un proceso de extrusión está influenciada por múltiples factores, entre los que se destacan:

- Generación de calor debido a la severa deformación plástica de la preforma.
- Generación de calor debido a la fricción entre la preforma, el contenedor y la matriz de extrusión.
- Transferencia de calor a través de la preforma y entre la preforma y la matriz y el contenedor.

Todos estos fenómenos ocurren de manera simultánea lo que nos lleva a una compleja relación entre el material y el resto de variables del proceso: lubricación, velocidad de extrusión, geometría de la matriz y relación de extrusión.

En la siguiente figura podemos observar cómo varía la presión de extrusión necesaria con la temperatura. La gráfica es resultado de numerosas pruebas para varios metales utilizando para todos ellos la misma reducción porcentual (96%) excepto el aluminio, que al ser un metal más duro no pueden conseguirse reducciones de área tan grandes. Una tonelada partida de pulgada al cuadrado equivale aproximadamente a unos 13,79 MPa.

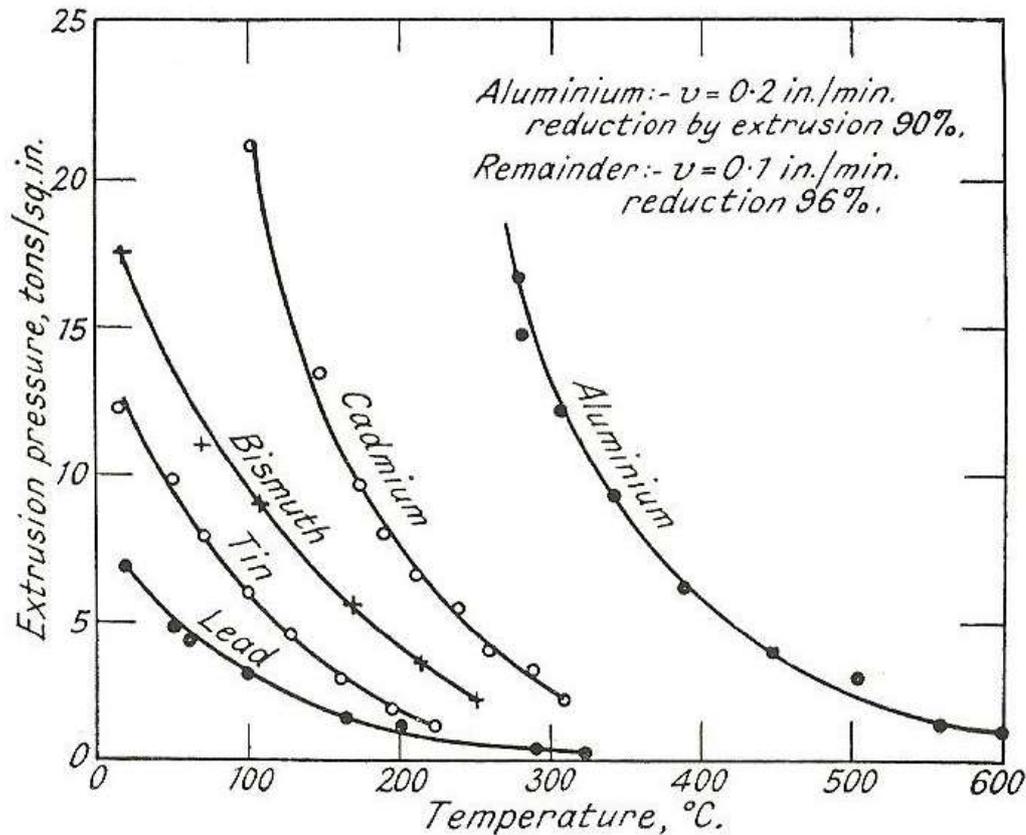


Figura 1-8. Efectos de la temperatura en los procesos de extrusión

Velocidad de extrusión

La velocidad de extrusión es un parámetro esencial para los procesos de extrusión en caliente. Una velocidad muy alta puede causar un sobrecalentamiento de la palanquilla y roturas y otros defectos superficiales. Una velocidad baja reduce la productividad e incrementa la presión de extrusión requerida debido al enfriamiento de la preforma.

Las velocidades de extrusión típicas para algunos metales son las siguientes:

Tabla 1-2 Materiales y velocidades típicas de extrusión

Material	Velocidad (mm/s)
Aluminio	12,7-25,4
Cobre	50,8-76,2
Latón	25,4-50,8
Acero	152,4-203,2

Un factor importante a tener en cuenta es que la velocidad de extrusión se relaciona directamente con las temperaturas que se van a desarrollar durante el proceso. Para cualquier proceso de extrusión que llevemos a cabo el incremento y la distribución de las temperaturas han de ser objeto de estudio. Hay un amplio registro de datos para la extrusión de metales blandos como son el plomo o el cadmio y en la siguiente figura se representan de forma logarítmica la relación entre velocidad, presión y temperatura:

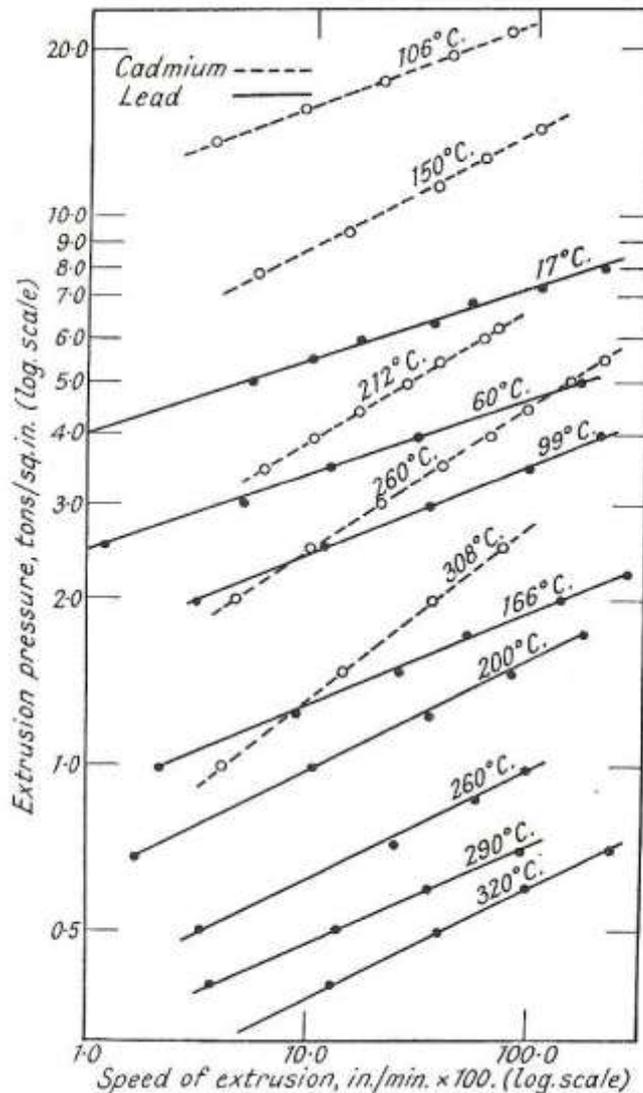


Figura 1-9. Relación entre velocidad, presión y temperatura para extrudir cadmio y plomo

La expresión que rige estas rectas se ha aproximado como:

$$v = b \cdot p^a$$

Donde v y p son la velocidad y la presión de extrusión y a y b son constantes que van a depender de la temperatura.

Otro análisis teórico simple que se ha hecho para investigar el efecto de la velocidad en el incremento de temperatura se representa en la siguiente figura. Se han utilizado preformas cilíndricas de 50 mm de diámetro y 70 mm de largo de plomo y la velocidad de extrusión es de 76 mm/min. Las relaciones de extrusión utilizadas han sido de 61:1, 29,5:1 y 16:1:

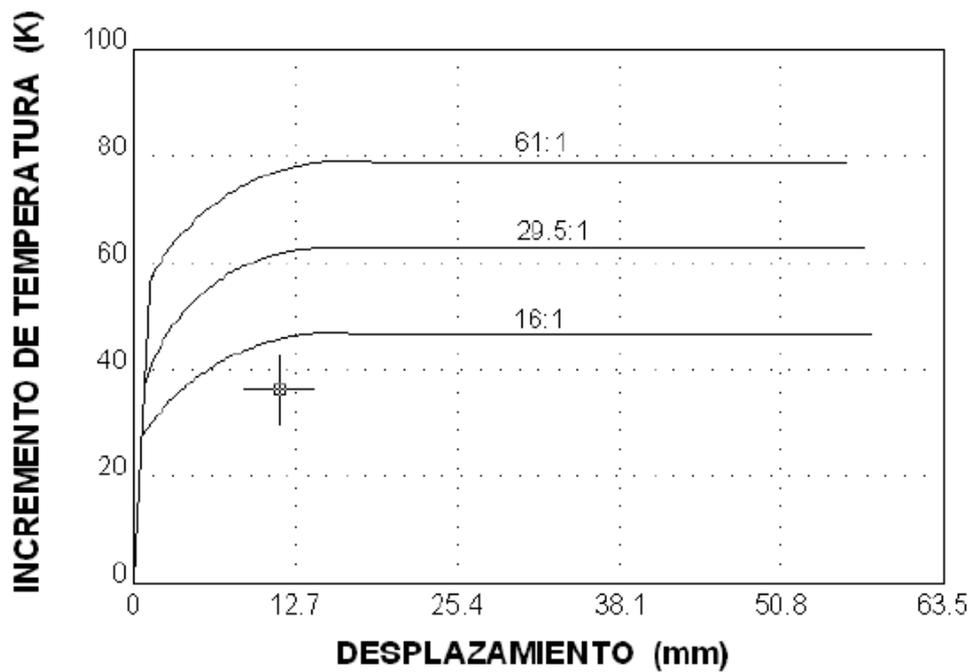


Figura 1-10. Efecto de la velocidad en el incremento de temperatura en la extrusión de plomo

Otro experimento similar, esta vez para dos aleaciones de aluminio distintas arrojó los siguientes datos:

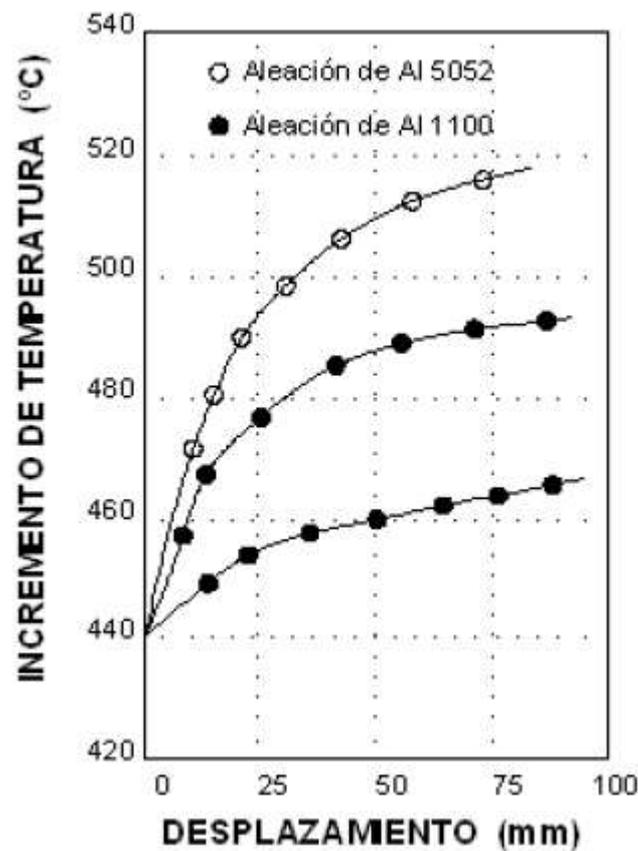


Figura 1-11. Efecto de la velocidad en el incremento de temperatura en la extrusión de aluminio

En ambos casos la temperatura medida ha sido la superficial, que es más alta que en el centro del producto debido a la generación de calor por fricción. Estos ensayos se han realizado bajo condiciones en las cuáles el contenedor, la matriz y la preforma estaban inicialmente a igual temperatura.

Para propósitos prácticos se ha llegado a la conclusión de que para aleaciones duras el incremento de temperatura máximo no va a exceder nunca los 100°C. Para aleaciones blandas, que requieren menos presión, se ha estimado que el incremento máximo de temperatura no va a exceder de los 50°C.

Como la temperatura del producto extruido es uno de los factores más influyentes en la calidad de éste, el procedimiento más idóneo para establecer la máxima velocidad de extrusión es hacer un ensayo y medir la temperatura superficial del producto, para ir ajustando así la velocidad idónea.

Geometría de la matriz

El cálculo de la presión de extrusión para geometrías complejas es bastante difícil, especialmente para aquellos perfiles que tienen secciones delgadas.



Figura 1-12. Diferentes geometrías que se pueden lograr mediante la extrusión

Existen algunas modificaciones que proponen utilizar coeficientes para el cambio de forma de la sección de salida y que se basan en el hecho de que, a igualdad de áreas, la sección más sencilla es el círculo. Es la sección de menor perímetro que contiene un área dada. A partir de ahí se estima un coeficiente de corrección. Existen numerosas correcciones según distintos autores, explicaremos más adelante la corrección que vamos a utilizar nosotros.

Relación de extrusión

La relación de extrusión es la relación existente entre las secciones transversales de la preforma y el producto final extruido:

$$R = \left(\frac{A_0}{A_f} \right)$$

Obviamente la relación de extrusión es uno de los parámetros fundamentales a la hora de diseñar un proceso de extrusión. En base a esta se calculan la presión y la fuerza de extrusión necesarias. No obstante, a la hora de hablar de un proceso de extrusión se usa más el término de grado de deformación en términos de reducción porcentual del área.

$$\left(\frac{A_f - A_0}{A_f} \cdot 100 \right)$$

A la hora de hacer estimaciones entre la relación de extrusión y la presión de extrusión necesaria se han tomado criterios basados en la experiencia. A partir de ahí se han ido desarrollando fórmulas para estimar la presión de extrusión necesaria contando con la fricción, la forma, la temperatura, la velocidad, ... y se ha llegado a la conclusión de que para formas sencillas la presión de extrusión es una función aproximadamente lineal del logaritmo neperiano de la relación de extrusión.

Para las aleaciones blandas como son el estaño, el plomo, el latón o el cinc se pueden conseguir unas reducciones de en torno al 99%, por otro lado para las aleaciones más duras, como pueden ser las de titanio, las relaciones de extrusión son mucho menores.

Tabla 1-3. Relación de extrusión y presión necesaria para extrudir plomo a 15°C
Inverted Method. $v = 0.1$ in. per minute. Flat-faced die

Reduction by Extrusion per cent $\left(\frac{A-a}{A} \cdot 100 \right)$	Extrusion Ratio $\left(\frac{A}{a} \right)$	Extrusion Pressure tons/sq. in.	$\log_e \frac{A}{a}$	βY tons/sq. in. (vide p. 202)
99.1	112	13.0	4.71	2.53
98.2	55.6	10.25	4.02	2.34
95.0	20.0	7.25	2.99	2.22
88.2	8.5	5.25	2.13	2.30
81.0	5.3	4.2	1.67	2.31
52.4	2.1	1.9	0.73	2.42

La anterior tabla refleja las presiones de extrusión obtenidas al extrudir plomo a 15°C según vamos variando la relación de extrusión.

Como se puede observar para grados de deformación en la región del 90%, pequeños aumentos del grado de deformación conllevan grandes incrementos en la presión de extrusión, así por ejemplo la presión de extrusión casi se duplica cuando el porcentaje de reducción paso del 95 al 99%.

Finalmente, al igual que con la velocidad, la combinación de altas temperaturas y una gran relación de extrusión conllevan un gran aumento de la temperatura del material extruido, sobre todo en la superficie debido a la fricción, lo que puede causar defectos superficiales.

Materiales de extrusión

Dentro de los materiales metálicos los más usados para los procesos de extrusión son:

- Aluminio (Al): Es el material más utilizado con diferencia. Se extrude tanto en frío como en caliente (300-600°C) y los productos obtenidos suelen ser barras, tubos, perfiles, piezas para la industria aeronáutica y automotriz, ...
- Cobre (Cu): Se suele extrudir en caliente (600-1100°C) para obtener cañerías, alambres, barras, tubos y electrodos de soldadura.
- Plomo (Pb) y estaño (Sn): Se extruden generalmente en caliente (200-300°C) y se fabrican cañerías, alambres, tubos y forros exteriores de cables.
- Magnesio (Mg): Se extrude en caliente (300-600°C) y con él se fabrican componentes para la industria aeronáutica.
- Cinc (Zn): Se extrude en caliente (200-350°C) para obtener barras, tubos, componentes electrónicos, ...
- Aceros: Se extruden en caliente (1000-1300°C) para obtener barras y perfiles. Hacen falta prensas de una gran capacidad para extrudir acero.
- Titanio (Ti): Es difícil de extrudir dada su alta resistencia, aunque se extrude en caliente (600-1000°C) para fabricar ciertos componentes de aviones.

Defectos de la extrusión

Agrietamiento interno o en V

Se produce cuando el centro del producto extruido desarrolla grietas o vacíos. Si el material del centro se deforma mucho menos que el de la periferia se produce un estado tensional de tracción cuasi-hidrostática en la línea central y que puede dar lugar a la rotura del material. Las grietas aumentan al aumentar el ángulo de la matriz y la concentración de impurezas, y disminuye al aumentar la relación de extrusión y la fricción. A no ser que se inspeccione, estos defectos pueden pasar inadvertidos y se podría dar el caso de que la pieza rompiera en servicio.

Defecto tubo o de cola de pescado

Una fuerte fricción puede provocar que el flujo de metal lleve los óxidos e impurezas superficiales de la preforma al centro de la pieza extrudida. Se puede evitar lubricando bien la preforma ante del proceso de extrusión para asegurar que no hay adherencia entre la preforma, el contenedor y la matriz.

Agrietamiento de la superficie

Esto es la aparición de grietas en la superficie del producto extruido. Se debe generalmente a unas temperaturas de extrusión muy elevadas, a la fricción o a una velocidad de extrusión muy alta. También puede darse a bajas temperaturas, si la pieza extruido se pega temporalmente a la matriz durante el proceso.

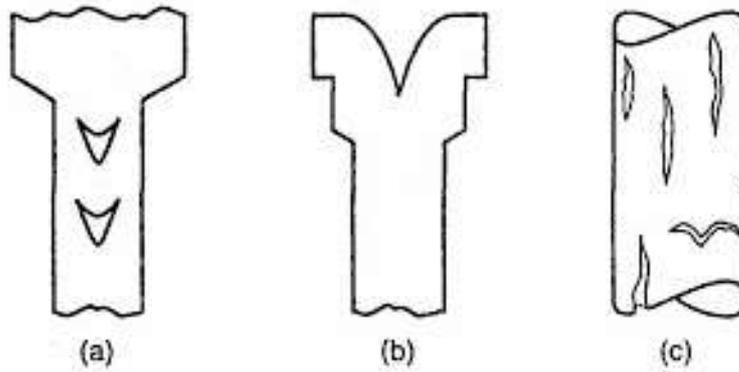


Figura 1-13. Defectos típicos de los procesos de extrusión

2 CÁLCULO Y DISEÑO DE UNA EXTRUSORA LATERAL

Fundamentos de la extrusión lateral

Casi toda la información disponible concerniente a un proceso de extrusión lateral está referida al proceso de conformado de tubos o discos. Pero este no es exactamente el objetivo de nuestro estudio. El conformado de tubos o discos es un proceso muy bien diferenciado, se utilizan matrices cerradas o abiertas a lo largo de toda la sección y no una abertura en un extremo. Lo que nosotros buscamos estimar son los parámetros de una extrusora lateral en la que se obtienen productos largos, como barras o varas, que sabemos que típicamente se producen en extrusoras horizontales.

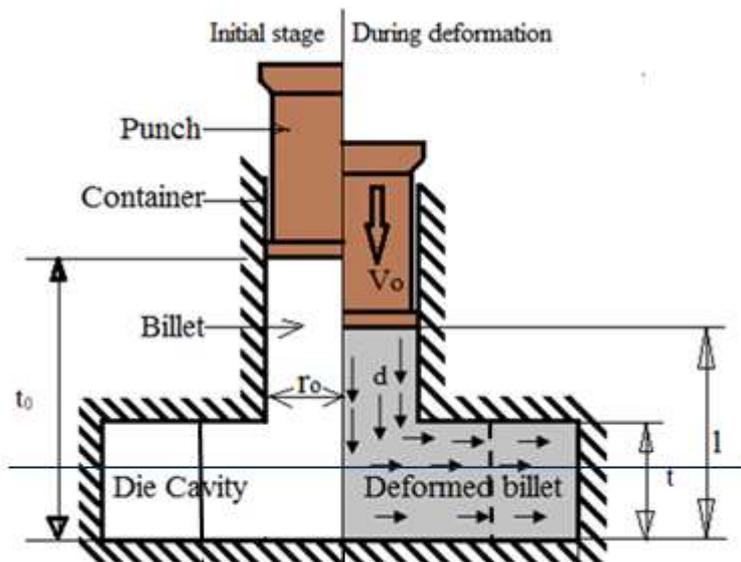


Figura 2-1. Extrusión lateral. Conformado de discos

Partiendo de la base de que sabemos que el tipo de productos que queremos obtener se hacen en la realidad mediante unas largas extrusoras horizontales, nuestro objetivo radica en comprobar los valores típicos de presión y fuerza necesarios para fabricar los mismos productos mediante la extrusión lateral. Podremos así comparar resultados y observar la viabilidad de nuestra idea.

Es por ello que nuestro primer objetivo va a tratar de entender cómo podría modelarse un proceso de extrusión lateral.

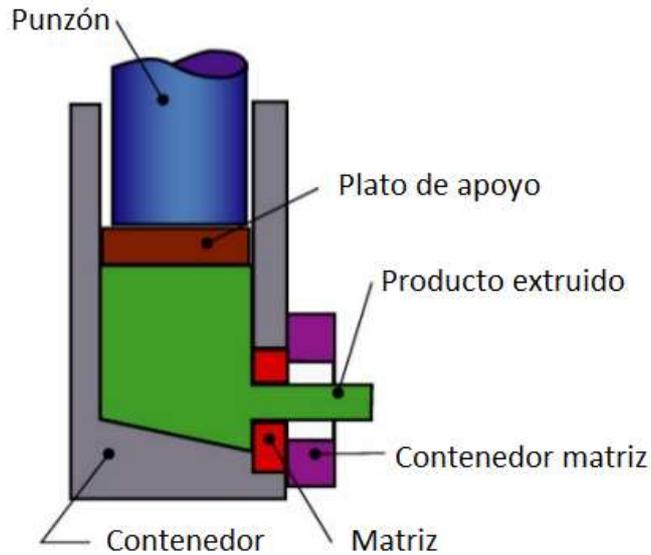


Figura 2-2. Extrusión lateral

La principal característica de un proceso de extrusión lateral es el flujo asimétrico en la transición entre el contenedor y la matriz. De un proceso de extrusión sabemos que la calidad del producto extruido va a depender principalmente de la manera en que fluye el metal durante el proceso. A través de los estudios del flujo, y observando cómo va variando según se modifiquen parámetros como la velocidad o la lubricación, se ha ido obteniendo a lo largo de la historia una gran cantidad de datos relativos a la extrusión.

En lo relativo al estudio de los flujos durante la extrusión, no fue hasta la década de los años 20 cuando una serie de técnicos como Schweisguth, Unckel y Schmidt prepararon preformas cilíndricas compuestas por materiales de distinto color como latón y cinc a fin de estudiar el flujo de metal. Posteriormente se pasaron a modelos más sencillos de cera o plastilina de colores con idéntico fin. Aunque pueda parecer una osadía, se ha demostrado que hay una gran relación entre la deformación sufrida por estas probetas de cera o plastilina y las probetas de metal.

Los datos revelaron que los metales que sufren una transformación plástica se adaptan a su nueva forma de la misma manera que lo hacen los flujos líquidos, siguiendo el flujo un curso determinado en concordancia con las condiciones geométricas. Aunque los flujos metálicos muestran ciertas divergencias con respecto a los líquidos debido principalmente a los efectos de la fricción. Precisamente es ese factor, el de fricción, el que va a determinar la forma en que fluye el metal durante el proceso.

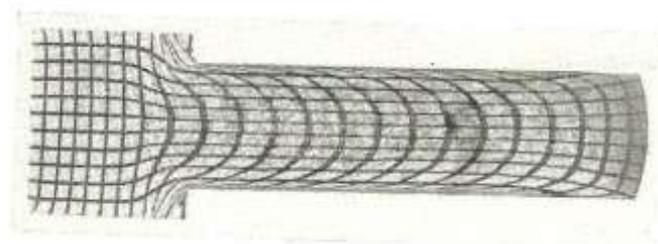


Figura 2-3. Extrusión de una preforma con lubricación

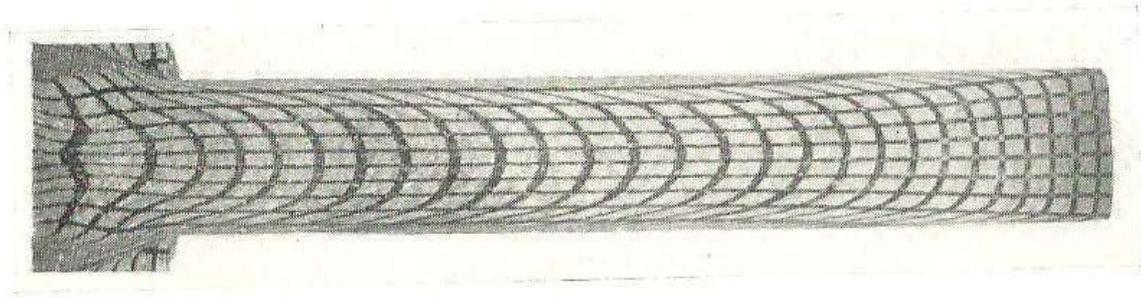


Figura 2-4. Extrusión de una preforma sin lubricación

La figura de arriba corresponde a una preforma bien lubricada, mientras que la figura de abajo es de un proceso sin lubricación. La deformación de las líneas transversales se puede observar que son mayores en el caso sin lubricación al igual que la zona muerta.

Sin embargo, el flujo de metal en la extrusión de secciones complicadas o la extrusión lateral ha recibido poca atención. Green estudió en los años 50 el flujo de plastilina a través de un proceso de extrusión directa en el que la matriz no estaba centrada con respecto al contenedor. Esto resultó en un gran incremento de la zona muerta y que el flujo estaba más restringido en esa zona, por lo que las líneas transversales de la malla ya no eran simétricas alrededor del centro del producto extruido.

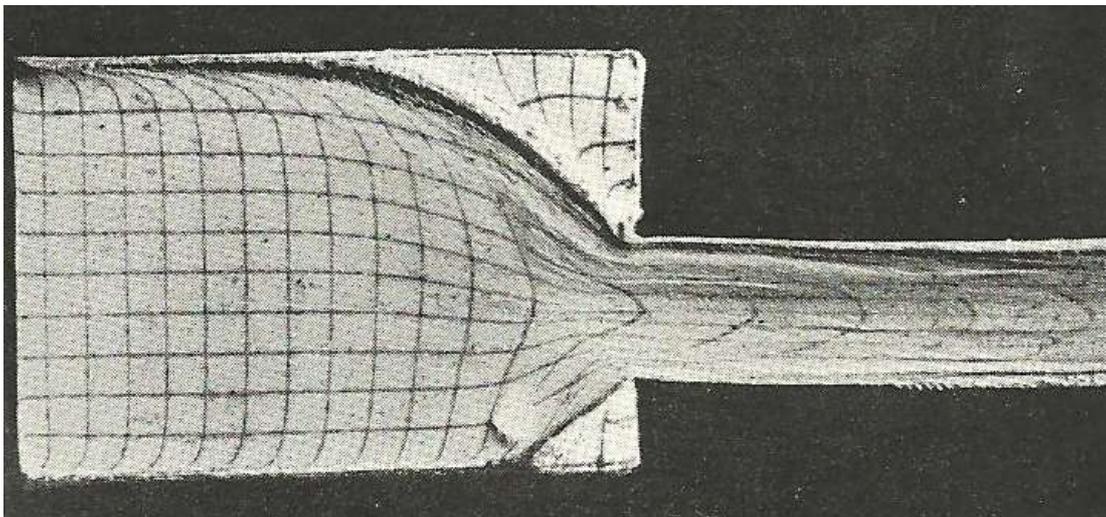


Figura 2-5. Extrusión con flujo asimétrico

Otros como Northcott, McLean y Lee realizaron experimentos para flujos asimétricos para la extrusión con matrices con múltiples agujeros, en los que se hallaron grietas superficiales en el producto extruido. Sin embargo, ellos utilizaron probetas de plomo y bismuto así como varias de plastilina coloreada, cuando un experimento similar fue realizado con probetas de aluminio se observó que la calidad del producto mejoraba notablemente.

Finalmente Jonhson estudió las características de los flujos metálicos para la extrusión de un perfil en I a partir de probetas cilíndricas, y observó que para secciones delgadas y formas complejas los planos transversales de flujo quedaban tan deformados que los puntos alrededor del centro del perfil emergían bastante antes que los puntos de los extremos.

Sin embargo, lo más notable de todos estos experimentos fue que para todos estos casos, excepto para el perfil en I de Johnson, la fuerza de extrusión era independiente de la forma final del producto o del flujo del material a lo largo del proceso. La fuerza dependía casi totalmente de la reducción de área que se había querido conseguir y tan sólo para el perfil en I de Johnson se requirió un 10% más de fuerza que en el resto de secciones para una misma reducción de área.

Más allá de esto, Dodeja y Jonhson realizaron numerosos experimentos tanto en frío como en caliente, para numerosas preformas y también para matrices con múltiples agujeros, y llegaron a la conclusión que lo que más variaba en relación al flujo de metal era la calidad del producto extruido, observando varios grados de heterogeneidad y deformación.

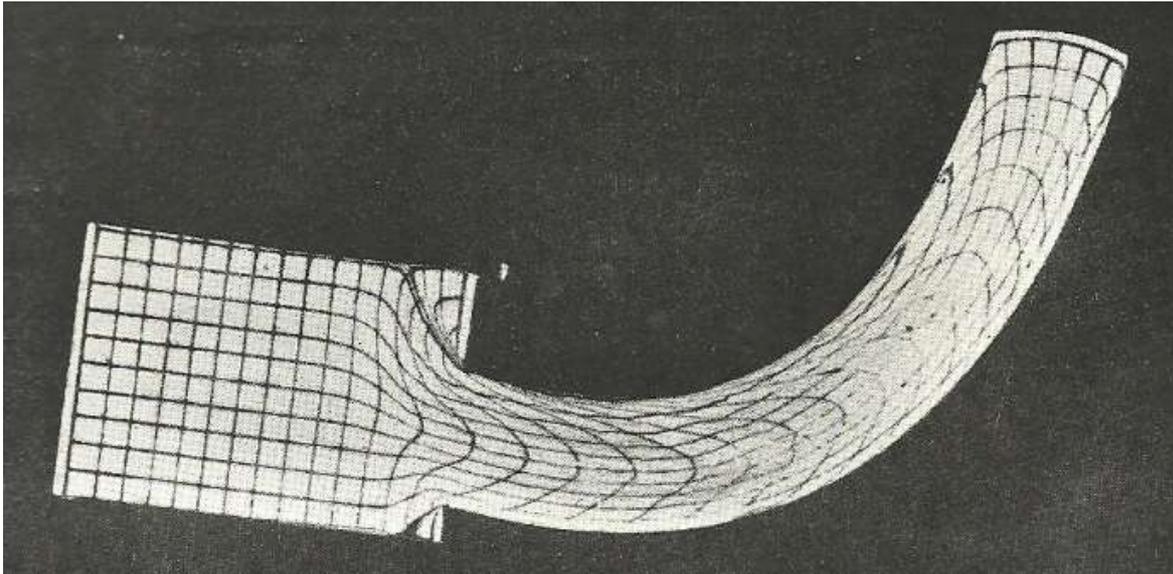


Figura 2-6. Extrusión con flujo asimétrico

Experimentos de Johnson para localizaciones inusuales del orificio de la matriz

En el año 1956 W. Johnson llegó a la conclusión de que el número cada vez mayor de procesos de extrusión que se usaban para producir partes con forma asimétrica justificaba la investigación de las consecuencias que tenían en estos procesos la geometría del flujo asimétrico y las localizaciones inusuales de la matriz con respecto a la dirección de movimiento del pistón.

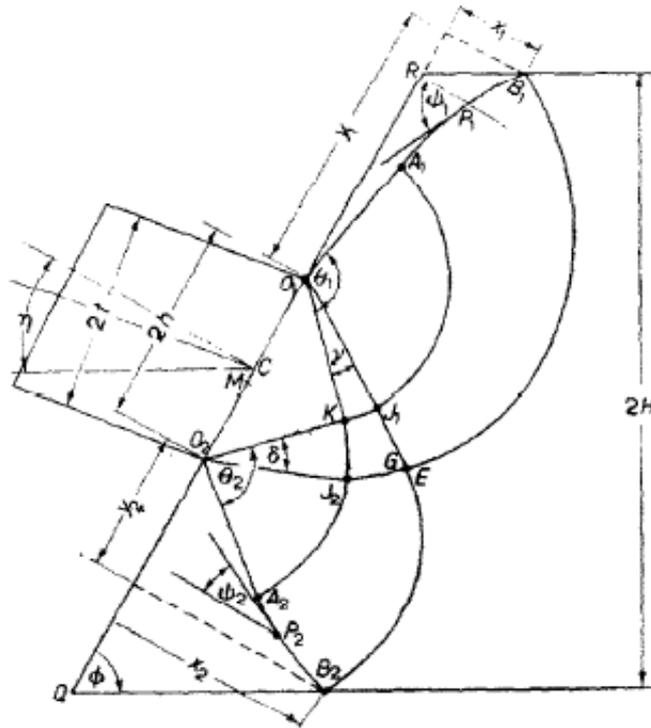
Para ello investigó con diferentes magnitudes de orificios y distintas excentricidades en primer lugar, cómo ya se ha comentado arriba, y después probó a variar la inclinación de la matriz.



Figuras 2-7 y 2-8. Extrusión lateral parcial y extrusión a través de una matriz escalonada

Para reducciones de 0,5 a 0,7 y distintos ángulos de la base del contenedor Johnson examinó los efectos de dichos parámetros y la velocidad de extrusión en la presión de extrusión necesaria para llevar a cabo el proceso.

El análisis teórico de este problema le llevó a diferenciar entre dos zonas distintas, la zona de la matriz por encima del orificio y la zona de la matriz por debajo del orificio, ya que en ambas zonas se originaban dos zonas muertas bien diferenciadas.



Figuras 2-9. Diagrama de los parámetros que influyen en el cálculo de la presión de extrusión

La fuerza en la cara superior del contenedor viene dada por la siguiente expresión:

$$\frac{F_1}{k} = (x_1 \sin \phi + y_1 \cos \phi) + \left(1 + 4\theta_1 - \frac{\pi}{2}\right) (y_1 \sin \phi + x_1 \cos \phi) - 2 \left(\sin \phi \int_{O_1}^{B_1} \psi_1 dy_1 - \cos \phi \int_{O_1}^{B_1} \psi_1 dx_1 \right)$$

De forma similar, para la cara inferior la fuerza es:

$$\frac{F_2}{k} = (x_2 \sin \phi + y_2 \cos \phi) + \left(1 + 4\theta_2 - \frac{\pi}{2}\right) (y_2 \sin \phi + x_2 \cos \phi) - 2 \left(\cos \phi \int_{O_2}^{B_2} \psi_2 dx_2 + \sin \phi \int_{O_2}^{B_2} \psi_2 dy_2 \right)$$

La presión de extrusión viene dada por la siguiente expresión:

$$\frac{p}{2k} = \frac{(F_1/k + F_2/k)}{4H}$$

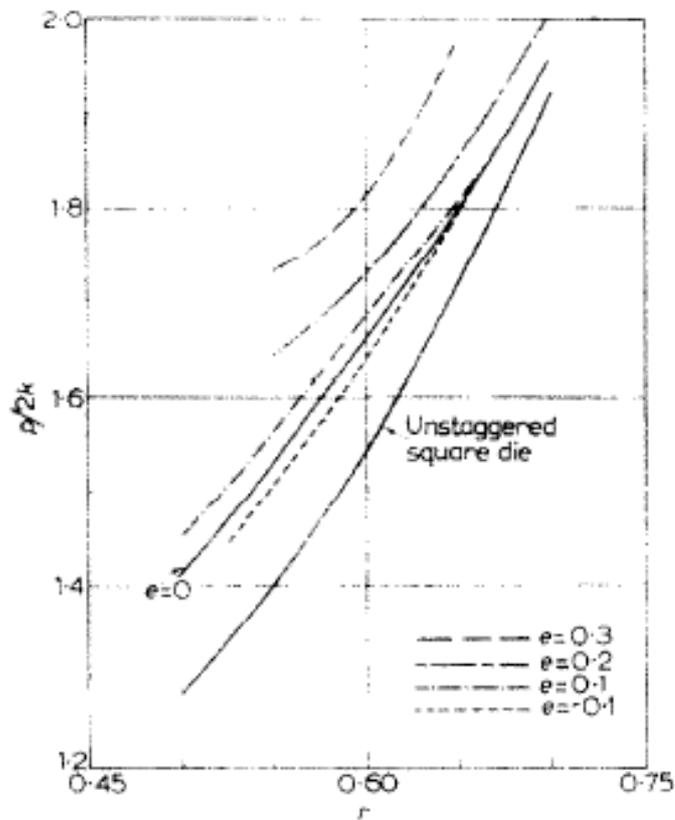
La reducción r la define usualmente como:

$$r = 1 - 2t/2H$$

Y la posición del orificio de salida con respecto a las paredes de la matriz, o la excentricidad:

$$e = 1 - \frac{(h + y_2) \sin \phi + x_2 \cos \phi}{H}$$

Sus experimentos quedaron reflejados en la siguiente gráfica, donde se aprecia la variación de la presión de extrusión con respecto a la reducción y la excentricidad para este tipo de extrusión:

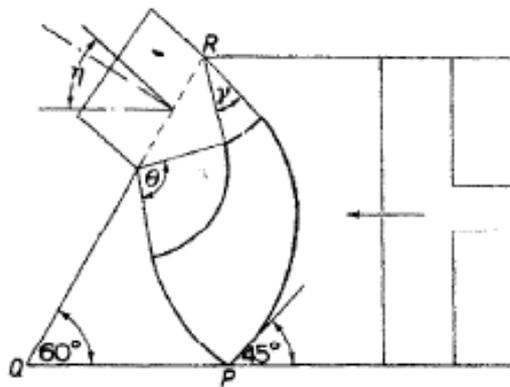


Figuras 2-10. Variación de $p/2k$ con respecto a r y e

Para el caso particular en que el orificio se sitúa en el extremo superior, que puede ser que el que más se parezca a una extrusión lateral, la excentricidad es máxima y negativa, por estar situada en el extremo superior. Para este caso particular no hay zona muerta en la parte superior de la matriz y la zona muerta es máxima en la zona inferior, por lo tanto la fórmula del cálculo de la presión de extrusión queda:

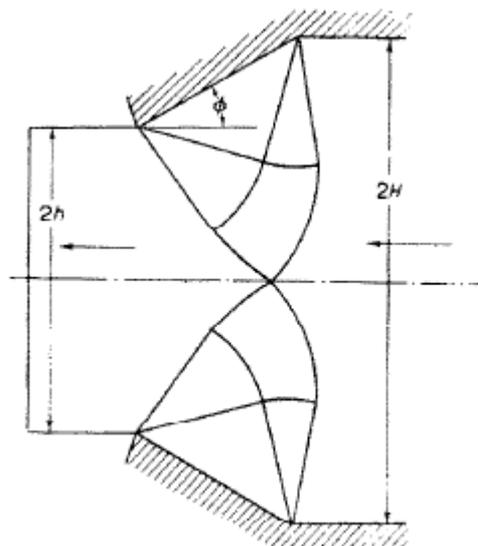
$$\frac{p}{2k} = \frac{(F_2/k)}{4H}$$

Donde k es el máximo esfuerzo cortante que resiste el material.



Figuras 2-11. Extrusión con el orificio de salida en uno de los extremos de la matriz

Para este caso en particular Johnson describió un método alternativo para determinar la presión de extrusión, en el cual $p/2k$ depende de la similitud del campo de esfuerzos con el de una extrusión directa.



Figuras 2-12. Matriz para extrusión directa con igual ángulo ϕ que la matriz de la figura 2-11

Si definimos $(p/2k)_\omega$ a la presión de extrusión para el proceso de extrusión directa, y luego definimos r_ω como:

$$\left(\frac{p}{2k}\right)_\omega = a + b \cdot \ln\left(\frac{1}{1-r}\right)$$

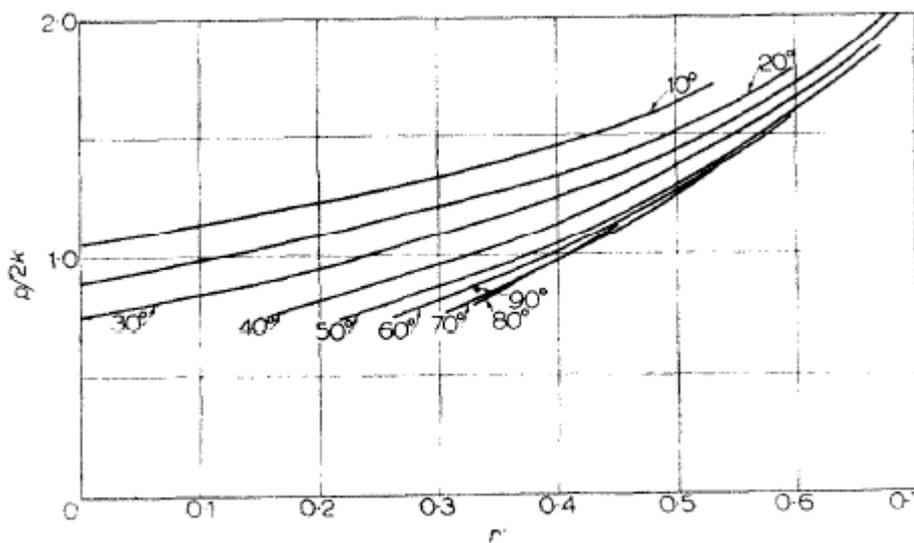
$$r_\omega = 1 - \frac{2d}{2D}$$

Entonces la presión de extrusión para una matriz como la de la figura 2-11 puede calcularse como:

$$\frac{p}{2k} = \frac{1 - r_\omega}{r_\omega} \left(\frac{p}{2k}\right)_\omega$$

En la siguiente gráfica se representa la variación de $p/2k$ y r_ω con respecto al ángulo ϕ ($10^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$), para ello se define previamente r' :

$$r' = 1 - r_\omega / \sin \phi$$



Figuras 2-13. Gráfica $p/2k - r'$

Si tenemos en cuenta que k es el esfuerzo cortante, entonces por el criterio de fluencia de Tresca se define la tensión de fluencia como:

$$Y = 2k \quad \text{ó} \quad \sigma_y = 2k$$

Por el de von Mises:

$$\sigma_y = \sqrt{3} k$$

Como podemos observar para este experimento en particular, la presión de extrusión es igual en el peor de los casos a dos veces la tensión de fluencia del material. Sin embargo a estos análisis hay que añadir porcentajes de reducción mayores y también los efectos de la fricción en el contenedor y la matriz.

Dentro de estos experimentos Johnson sacó la conclusión de que $p/2k$ es insensible a los cambios de la dimensión x para este tipo de problemas y que por regla general el ratio r/r' ronda siempre la unidad, y que sólo para grandes operaciones industriales podría variar. También para operaciones más grandes la fricción es un factor determinante a tener en cuenta.

No obstante podemos sacar de estos ensayos la conclusión de que para un proceso de extrusión como el que queremos llevar a cabo nosotros (extrusión lateral pura) la presión de extrusión va a ser más o menos del orden de la tensión de fluencia del material.

A falta de una fórmula aproximada conocida o de ensayos similares conocidos de este tipo, al menos los experimentos de Johnson para flujos asimétricos y localizaciones inusuales del orificio de la matriz de extrusión, nos proporcionan una base desde la que comenzar a abordar nuestro diseño.

Caso particular: Extrusión en canal angular constante (ECAE)

La extrusión en canal angular constante, conocida como ECAE (Equal Channel Angular Extrusion), es un proceso de extrusión desarrollado en 1973 en la Unión Soviética. Esta técnica de extrusión es capaz de producir en los metales una microestructura de grano ultrafino (UFG). Estos materiales UFG presentan propiedades fisico-químicas poco comunes, en particular una resistencia y tenacidad muy altas junto con la posibilidad de comportarse superplásticamente a temperaturas relativamente bajas y altas velocidades de deformación.

Varias investigaciones han demostrado que se pueden aplicar técnicas de intensa o severa deformación plástica para la producción de materiales de grano submicrométrico, con tamaños entre $1\ \mu\text{m}$ y $0,1\ \mu\text{m}$, y nanométrico, entre $0,1\ \mu\text{m}$ y $10\ \text{nm}$. Sin embargo, en los procesos de conformado normales, como el laminado, la forja, la extrusión, el estirado, etc. la deformación del material conlleva una reducción de su sección. La ECAE es un método ingenioso de deformación plástica muy intensa que nos permite grandes deformaciones del material sin variar la sección del mismo.

Básicamente un proceso ECAE consiste en extrudir una preforma a través de una esquina, por regla general a 90 grados. La sección del material es la misma a la entrada que a la salida, pero al atravesar la esquina el material experimenta una severa deformación plástica por cizalladura simple, deformación que se concentra en una capa, más o menos delgada, en un plano coincidente con el de la intersección de los dos canales en ángulo. Como la sección de entrada es igual que la de salida, entonces el material puede extrudirse varias veces para incrementar la deformación del mismo.

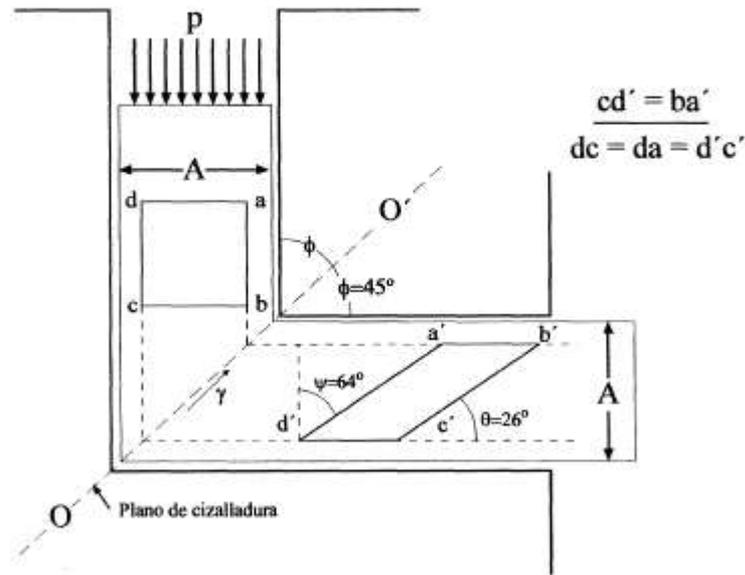


Figura 2-14. Extrusión ECAE

Procesos industriales tradicionales como la laminación o la extrusión, son también capaces de producir materiales UFG. Pero mediante estas técnicas, al reducirse las dimensiones del material, si queremos acumular grandes deformaciones lo que obtenemos son láminas o filamentos muy delgados que tendrían poca utilidad práctica.

Los aspectos más relevantes a la hora de diseñar un proceso ECAE son:

- Canales idénticos de entrada y salida para poder realizar varias pasadas.
- Los canales deben tener una superficie especular y deben lubricarse bien para disminuir el rozamiento.
- Es vital que el material se extruda en frío, para evitar la recristalización. Si bien se puede aumentar la temperatura para extrudir los materiales más duros, siempre que la temperatura de trabajo sea menor a $0,3T_m$.

En un proceso ECAE las presiones que se necesitan son del orden de la tensión de fluencia del material que se quiere extrudir.

De acuerdo con la figura 2-7, puede demostrarse que la deformación por cortadura es igual a:

$$\gamma = \tan \psi = 2 \cot \phi$$

Donde ψ es el ángulo de inclinación de un elemento de material distorsionado respecto al elemento sin deformar y, ϕ es la mitad del ángulo entre los canales de extrusión (2ϕ).

La deformación efectiva por pasada, de acuerdo al criterio de Von Mises es:

$$\varepsilon = \frac{2}{\sqrt{3}} \cot \phi$$

Como puede observarse la deformación alcanzada en una sola pasada está, en teoría determinada, por la geometría del proceso, siendo el ángulo entre canales el factor determinante. Por lo tanto cuanto más agudo sea el ángulo mayor es la deformación conseguida, ya que la cotangente es una función decreciente con el ángulo.

El análisis mecánico demuestra, por otra parte, que la relación entre la presión de extrusión y la tensión de fluencia es igual a:

$$\frac{p}{\sigma_y} = \varepsilon = \frac{2}{\sqrt{3}} \cot \phi$$

Por otro lado para un proceso de extrusión tradicional la deformación se expresaría como:

$$\varepsilon = \log \left(\frac{A_0}{A} \right)$$

Tabla 2-1. Parámetros de proceso ECAE en múltiples extrusiones para $2\phi=90^\circ$

Número de extrusiones (N)	Razón (p/Y)	Deformación total ε	Razón de reducción equivalente, (RRE)	Reducción de área equivalente (RAE)	Alargamiento equivalente (AE)
1	1,15	1,15	3,2	69 %	220 %
2	1,15	2,31	10,2	90 %	920 %
4	1,15	4,62	105	99 %	10.400 %
6	1,15	6,93	1.073	99,9 %	107.200
8	1,15	9,24	10.100	99,99 %	1.009.900

Consideraciones del diseño

A la hora de abordar el diseño de nuestra extrusora lateral hemos tenido que partir de una limitación, la fuerza máxima que nos permite aplicar la prensa que vamos a usar. En nuestro caso vamos a utilizar como prensa una máquina universal, la cual se utiliza para someter materiales tanto a tracción como a compresión, que nos permite aplicar una fuerza máxima de 250 kN.



Figura 2-15. Máquina universal para someter materiales tanto a tracción como a compresión

Partiendo de que no contamos con una prensa de gran capacidad debemos diseñar un proceso de extrusión lateral que no requiera grandes presiones para poder llevarse a cabo. Con el objetivo de diseñar un proceso que requiera la menor presión posible se han tomado las siguientes decisiones:

- Uso de materiales blandos: plomo y estaño.
- Partiremos de preformas cilíndricas pequeñas, con secciones pequeñas.
- El proceso de extrusión será en caliente.
- Proceso bien lubricado utilizando grafito en polvo como lubricante.
- Relaciones de extrusión no demasiado extremas.
- El producto extruido tendrá una forma geométrica sencilla.

Por último no sólo nos encontramos con limitaciones técnicas, como son la capacidad de la máquina o la temperatura a la que podemos calentar la preforma, sino que hay también limitaciones constructivas. Cuando se estudió la posibilidad de realizar este proyecto se propuso que, en la medida de lo posible, se utilizaran elementos con los que ya contáramos en el taller, es decir, que se aprovecharan los tubos, barras, piezas, etc. que tuviéramos en el taller.

Esta limitación no es fundamental, afortunadamente disponemos de una gran variedad de piezas que nos pueden servir para el proyecto con el consiguiente ahorro de dinero, pero nos lleva a invertir el proceso de diseño. En lugar de diseñar una máquina a partir de los datos teóricos calculados, hemos partido de un diseño teórico aproximado de la máquina para luego ajustar las medidas mediante los datos teóricos.

Material de extrusión

Para nuestro prototipo de extrusora lateral hemos decidido usar plomo y estaño como materiales de extrusión. La razón de nuestra elección es que tanto el plomo como el estaño son materiales blandos, no requieren grandes presiones, y dúctiles, se extruden con facilidad.

Tabla 2-2. Propiedades de los materiales de extrusión que se van a utilizar en caliente

Material	T _{fus}	T _{trabajo}	C	m	T _{rec}
Sn	232°C	180°C	5	0,1	T _{amb}
Pb	327°C	260°C	2	0,1	T _{amb}

Tanto el plomo como el estaño recristalizan a temperatura ambiente, por lo que toda deformación que se les produzca se puede considerar “trabajo en caliente”. Además ambos presentan bajas temperaturas de fusión, por lo tanto tienen bajas temperaturas de trabajo, lo que nos va a permitir llevarlos a una temperatura adecuada de extrusión con los hornos de que disponemos en el taller.

Preformas

Las preformas que se van a utilizar son unas barras cilíndricas de 40 mm de diámetro y 120 mm de longitud.

La justificación de las medidas viene dada por el hecho de que para diseñar un proceso de extrusión que no requiera grandes presiones ni fuerzas de extrusión es necesario que el área transversal de la preforma sea pequeña. Además si queríamos obtener un producto extruido con una longitud significativa pues necesitábamos que la cantidad de material disponible fuese la mayor posible, de ahí la longitud seleccionada.

Por otro lado el uso de preformas pequeñas nos permite hacer la suposición de que la temperatura va a ser homogénea a lo largo de toda la preforma, es decir, toda ella se va a encontrar a la misma temperatura al inicio del proceso de extrusión.

Cálculo de la fuerza de extrusión necesaria

La presión y la fuerza necesarias para que se produzca la descarga continua de metal a través la matriz o boquilla de extrusión depende como ya hemos visto de numerosas variables. No obstante existen varias ecuaciones que nos permiten estimar la presión de extrusión necesaria para algunos de los procesos de extrusión más comunes.

En este proyecto se van a aplicar las ecuaciones simplificadas que propone J.A. Schey para la estimación de la presión de extrusión.

La fórmula estimativa de la presión de extrusión viene dada por la siguiente expresión:

$$p(L) = K \cdot \bar{\sigma}_y \cdot \left(a + b \cdot \Delta\varepsilon + \psi \frac{2L}{D_0} \right)$$

donde:

- $p(L)$: Presión del pistón para una longitud L de la preforma
- K : Factor de forma de la sección del producto extruido
- $\bar{\sigma}_y$: Tensión media de fluencia del proceso
- a y b : Coeficientes experimentales de Johnson
- $\Delta\varepsilon$: Incremento de deformación del proceso
- ψ : Coeficiente de fricción
- D_0 : Diámetro de la preforma

Esta expresión está basada en el hecho de que todos los procesos de extrusión pueden ser considerados procesos estacionarios, la zona donde se produce la deformación del material es la misma salvo los transitorios inicial y final. El carácter estacionario de la extrusión nos permite hacer un análisis sencillo del proceso basado en un balance de energía que conduce al concepto de tensión de fluencia promedio.

El procedimiento de análisis consiste en suponer un conjunto de hipótesis iniciales con el que obtener una primera estimación de la presión de extrusión necesaria y que se va a ir corrigiendo posteriormente al ir relajando dichas hipótesis.

No obstante el desarrollo de los pasos que llevan a esta ecuación se puede encontrar en los apuntes de clases y en libros, por lo que es redundante plasmar en este trabajo todo el desarrollo, así que nosotros nos limitaremos a utilizarla justificando cuando sea necesario algunos de los pasos a seguir.

El tratamiento analítico de estos factores es muy difícil e imposibilita un cálculo exacto de la presión y la fuerza de extrusión necesaria.

Tipo de extrusión

La presión que se requiere para un proceso de extrusión depende de la forma en que el material fluye en el contenedor y a través de la matriz, o sea en función de cómo sea el flujo del material. Por ello la presión de extrusión varía considerablemente según el tipo de extrusión. En la siguiente figura por ejemplo se puede observar cómo varía la presión para un proceso de extrusión en función del recorrido del vástago para la extrusión directa e indirecta.

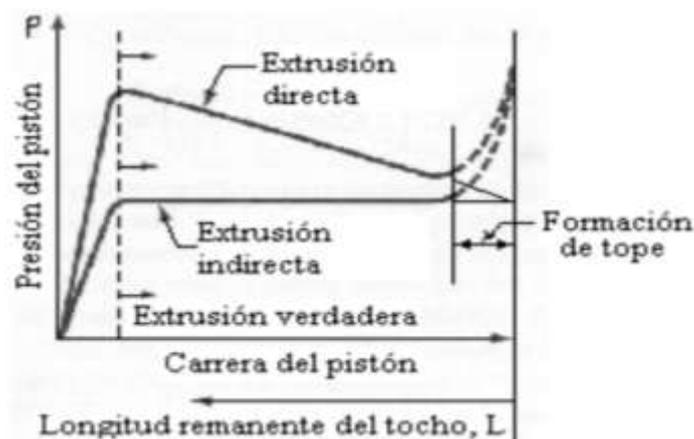


Figura 2-16. Variación de la presión para extrusión en función del recorrido del vástago

Aunque esta fórmula es válida para la extrusión directa e indirecta, la diferencia de las presiones que observamos en la figura es debida al factor de fricción. Para el caso de la extrusión indirecta sabemos que no hay fricción entre el contenedor y la preforma, así que el factor de fricción ψ es igual a 0. En el extremo opuesto un proceso de extrusión directa con adherencia, es decir sin lubricación, tendrá un factor de fricción ψ igual a 1.

Esta fórmula para calcular la presión de extrusión de Schey sabemos que nos permite estimar la presión de extrusión para un proceso de extrusión directa ($0 < \psi < 1$) o de extrusión indirecta ($\psi = 0$), pero en principio no sabemos si es válida para un proceso de extrusión lateral. La razón por la que hemos decidido escoger ésta expresión para estimar la presión de extrusión de nuestro proceso es porque sabemos que se puede considerar la extrusión lateral una variación de un proceso de extrusión directa, y, por otro lado es que tampoco hemos encontrado en ningún medio referencia a los cálculos para un proceso de extrusión lateral.

No obstante no puede considerarse tampoco que nos hayamos permitido una licencia muy grande, ya que en teoría la fuerza de extrusión va a depender de la reducción de área. Además los cálculos para los procesos de extrusión son estimativos y los cálculos teóricos que se hagan es obligatorio refrendarlo con resultados experimentales.

Siguiendo esta idea vamos a realizar unos cálculos muy conservativos.

Lubricación

Con el fin de reducir al máximo la presión de extrusión y dada la influencia de ésta en el proceso de extrusión hemos decidido que vamos a lubricar la preforma con polvo de grafito a fin de garantizar una buena fluencia del material en el interior del contenedor y a través de la matriz.

Una buena lubricación es esencial a la hora de llevar a cabo un proceso de extrusión. Sin embargo, a la hora de calcular la presión de extrusión, vamos a tomar el caso de un proceso de extrusión con adherencia con el fin de obtener unos valores extremos ya que no tenemos garantías de que estos cálculos vayan a reflejar la realidad y es mejor pasarnos que quedarnos cortos en nuestra estimación.

$$\psi = 1 \leftarrow \text{Fricción con adherencia}$$

Incremento de deformación del proceso

Para hacer ensayos significativos del proceso de extrusión lateral es necesario realizar varias pruebas y para varias secciones y tamaños distintos, a fin de poder encontrar unos parámetros generales de este proceso. Sin embargo, para el cálculo de la presión de extrusión valdrá con que tomemos el producto extruido de sección más pequeña, proceso para el cual se requerirán las mayores presiones.

Como vamos a partir de la hipótesis de relaciones de extrusión pequeñas, el producto de menor sección que vamos a tomar es una barra cilíndrica de 10 mm de diámetro. Si vamos a partir de una barra igualmente cilíndrica de 40 mm de diámetro:

$$\frac{A_o - A_f}{A_o} \cdot 100 = \frac{\pi \cdot \frac{D_o^2}{4} - \pi \cdot \frac{D_f^2}{4}}{\pi \cdot \frac{D_o^2}{4}} \cdot 100 = \frac{\pi \cdot \frac{0,04^2}{4} - \pi \cdot \frac{0,01^2}{4}}{\pi \cdot \frac{0,04^2}{4}} \cdot 100 = 93,75$$

Obtenemos unas reducciones de cerca de un 94% y un incremento de deformación del proceso:

$$\Delta\varepsilon = \log R = \log\left(\frac{A_0}{A_f}\right) = \log\left(\frac{\pi \cdot \frac{D_0^2}{4}}{\pi \cdot \frac{D_f^2}{4}}\right) = \log\left(\frac{\pi \cdot \frac{0,04^2}{4}}{\pi \cdot \frac{0,01^2}{4}}\right) = 2,7726$$

Coefficientes experimentales de Johnson

Las constantes o coeficientes de Johnson son unas constantes experimentales. Se trata de unos valores experimentales con valor:

$$a = 0,8 \text{ y } b = 1,2 \div 1,5$$

Nosotros vamos a tomar: $a = 0,8$ y $b = 1,5$.

Extrusión en caliente

Cuando se conforma un metal en caliente la tensión de fluencia se modela con la ley de Hollomon, que para el caso de trabajo en caliente es:

$$\sigma_y = C \cdot \dot{\varepsilon}^m$$

La tensión de fluencia promedio se calculará con una velocidad de deformación media:

$$\bar{\sigma}_y = C \cdot \bar{\dot{\varepsilon}}^m$$

La velocidad de deformación media se obtiene a partir del incremento de deformación aplicado durante el proceso y del tiempo que tarda el material en atravesar la matriz de extrusión. La velocidad de deformación media se puede expresar como:

$$\bar{\dot{\varepsilon}} = \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta t} = \frac{3\sqrt{\pi}v_0A_0 \tan \alpha}{A_0^{3/2} - A_f^{3/2}} \Delta\varepsilon$$

En esta expresión v_0 es la velocidad del pistón y α el ángulo de la matriz de extrusión. Debido a la aparición de zonas muertas en el flujo del metal a través de la matriz de extrusión, suele tomarse un ángulo α de 45° en aquellos casos en los que el ángulo de la matriz sea superior a dicho valor, siempre y cuando no se disponga de evidencias experimentales que aconsejen tomar otro valor.

La velocidad de extrusión vamos a tomar una muy baja, 1 mm/s, en principio, aunque luego podrá variarse en función de los ensayos que realicemos para buscar una más óptima. En cuanto al valor de α , como no tenemos datos que nos indiquen tomar otro valor, usaremos 45° para nuestra estimación.

$$\bar{\dot{\varepsilon}} = \frac{3\sqrt{\pi} \cdot 0,001 \cdot \pi \cdot \frac{0,04^2}{4} \cdot \tan 45}{\left(\pi \cdot \frac{0,04^2}{4}\right)^{3/2} - \left(\pi \cdot \frac{0,01^2}{4}\right)^{3/2}} \cdot 2,7726 = 0,6843$$

Finalmente C y m son dos coeficientes que dependen del material y de la temperatura de trabajo. C es el coeficiente de resistencia y m es el exponente de endurecimiento por velocidad de deformación.

Para el caso de extrudir probetas de plomo a 260°C la tensión de fluencia promedio es:

$$\bar{\sigma}_y = C \cdot \bar{\epsilon}^m = 2 \cdot 0,6843^{0,1} = 1,9256 \text{ MPa}$$

Para el caso de extrudir probetas de estaño a 180°C la tensión de fluencia promedio es:

$$\bar{\sigma}_y = C \cdot \bar{\epsilon}^m = 5 \cdot 0,6843^{0,1} = 4,814 \text{ MPa}$$

Factor de forma

La modificación que se propone utilizar como coeficiente por el cambio de formar de la sección de salida está basada en el hecho de que, a igualdad de áreas, la sección más sencilla es el círculo, desde el punto de vista de que es la sección de menor perímetro que contiene un área dada. Así, la presión de extrusión en el caso de un perfil extruido de sección no circular se corrige de la siguiente forma:

$$K = 0,98 + 0,02 \left(\frac{C_x}{C_c} \right)^{2,25} \quad \text{donde } 1 < \frac{C_x}{C_c} < 6$$

C_x es el perímetro del perfil extruido y C_c es el perímetro de un círculo equivalente que encierra la misma área que dicho perfil.

Obviamente para perfiles extruidos con secciones circulares K vale 1. Como para estos cálculos estamos partiendo de que no sabemos una expresión más aproximada para el cálculo de la presión de extrusión en un proceso de extrusión lateral, utilizaremos en un principio secciones circulares, para pasar posteriormente a extrudir secciones algo más complejas como triángulos, cuadrados, ...

No obstante supongamos que queremos extrudir un perfil con sección de triángulo equilátero de 10 mm de lado:

$$C_x = 30 \text{ mm} \quad \text{y} \quad A_x = 56 \text{ mm}^2$$

$$D_{eq} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_x}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 56}{\pi}} = 8,444 \text{ mm} \rightarrow C_c = \pi \cdot D_{eq} = 26,528 \text{ mm}$$

Por lo que el factor de forma quedaría:

$$K = 0,98 + 0,02 \left(\frac{C_x}{C_c} \right)^{2,25} = 0,98 + 0,02 \left(\frac{30}{26,528} \right)^{2,25} = 1,006$$

Como podemos observar, para perfiles pequeños y sencillos se puede considerar que K va a valer siempre 1.

Presión de extrusión

Si sustituimos estos valores en la expresión general de la presión de extrusión nos sale para el caso de utilizar plomo a 260°C:

$$p_{Pb} = 1,9256 \cdot \left(0,8 + 1,5 \cdot 2,7726 + \frac{2 \cdot 0,12}{0,04} \right) = 19,18 \text{ MPa}$$

Para el caso de usar estaño a 180°C:

$$p_{Sn} = 4,814 \cdot \left(0,8 + 1,5 \cdot 2,7726 + \frac{2 \cdot 0,12}{0,04} \right) = 52,76 \text{ MPa}$$

Las presiones halladas no son en principio valores muy altos y además son resultados bastante razonables. Estas son las presiones que hemos obtenido para plomo a 260°C y estaño a 180°C con unas reducciones porcentuales del 94%. Si nos vamos a la tabla que nos muestra cómo varía la temperatura con la presión de extrusión veremos que para reducciones del 96%, para el plomo a 260°C se estima una presión de extrusión de unos 10 MPa, mientras que para el estaño a 180°C la presión estimada es de unos 40 MPa. Parece que en principio estos valores de presión pudieran ser válidos.

Fuerza de extrusión

Finalmente la fuerza necesaria para extrudir un material viene dada por la ecuación:

$$F = p \cdot A_0$$

Para el caso de utilizar plomo a 260°C:

$$F_{Pb} = (19,18 \cdot 10^6) \cdot \pi \cdot \frac{0,04^2}{4} = 24,1 \text{ kN}$$

Para el caso de usar estaño a 180°C:

$$F_{Sn} = (52,76 \cdot 10^6) \cdot \pi \cdot \frac{0,04^2}{4} = 66,3 \text{ kN}$$

Como podemos observar la mayor fuerza de extrusión va a ser la requerida para extrudir las probetas de estaño. Aun así la fuerza requerida para ello es bastante inferior a los 250 kN que nos permite utilizar nuestra máquina, por lo que vamos a poder extrudir nuestras probetas.

Cálculo del contenedor

El contenedor de nuestra extrusora lo vamos a calcular como un cilindro sometido a esfuerzos radiales y tangenciales con magnitudes que van a depender del radio del elemento en consideración. Al determinar los esfuerzos radiales σ_r y tangenciales σ_t suponemos que la elongación longitudinal es constante a lo largo del cilindro, es decir, una sección recta (plana) del cilindro permanece plana tras ser sometida a esfuerzo.

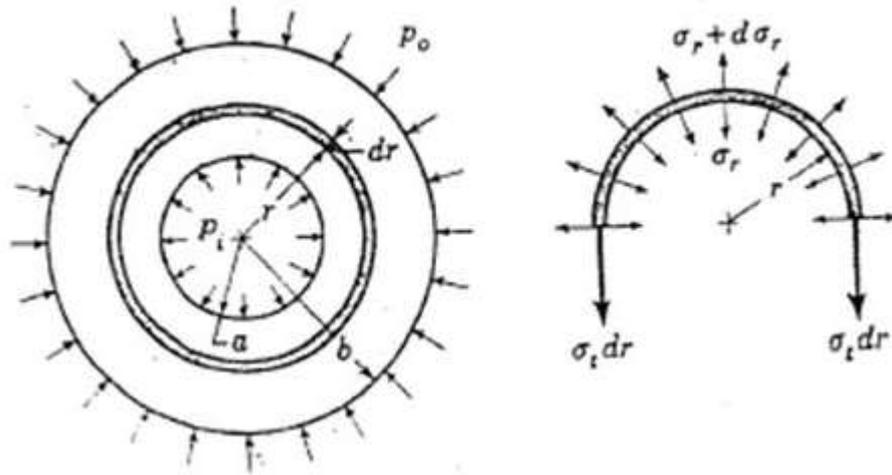


Figura 2-17. Esfuerzos radiales y tangenciales en la sección de un cilindro

Las ecuaciones de estos esfuerzos para cilindros de pared gruesa son:

$$\sigma_t = \frac{p_i \cdot a^2 - p_o \cdot b^2 - a^2 \cdot b^2 \cdot (p_o - p_i) / r^2}{b^2 - a^2}$$

$$\sigma_r = \frac{p_i \cdot a^2 - p_o \cdot b^2 + a^2 \cdot b^2 \cdot (p_o - p_i) / r^2}{b^2 - a^2}$$

Partiendo del material del que disponemos en el taller hemos escogido para fabricar el contenedor de nuestra extrusora un tubo de acero de radio interior a de 20 mm, y de radio exterior b de 25 mm.

Teniendo en cuenta la fuerza mínima que vamos a necesitar para extrudir las probetas de estaño es de 66,3 kN, vamos a estimar que realizamos el experimento con 75 kN de fuerza. Por lo que la presión interna en el cilindro p_i será:

$$p_i = \frac{F}{A} = \frac{75000}{\pi \cdot \frac{0,04^2}{4}} = 59683103,66 \text{ Pa} \approx 60 \text{ MPa}$$

Por otro lado la presión exterior p_0 será 0, por lo que las magnitudes de los esfuerzos tangenciales y radiales se pueden simplificar quedando de la siguiente manera:

$$\sigma_t = \frac{p_i \cdot a^2}{b^2 - a^2} \cdot \left(1 + \frac{b^2}{r^2}\right)$$

$$\sigma_r = \frac{p_i \cdot a^2}{b^2 - a^2} \cdot \left(1 - \frac{b^2}{r^2}\right)$$

La tensión longitudinal a lo largo del cilindro será:

$$\sigma_l = \frac{p_i \cdot a^2}{b^2 - a^2}$$

Como el cilindro va a estar sometido a únicamente a presión interna, la distribución de los esfuerzos radial y tangencial en el espesor de la pared serán máximos los dos en la cara interior del cilindro, es decir, para $r=a$.

El esfuerzo tangencial será un esfuerzo de tracción y el esfuerzo radial de compresión.

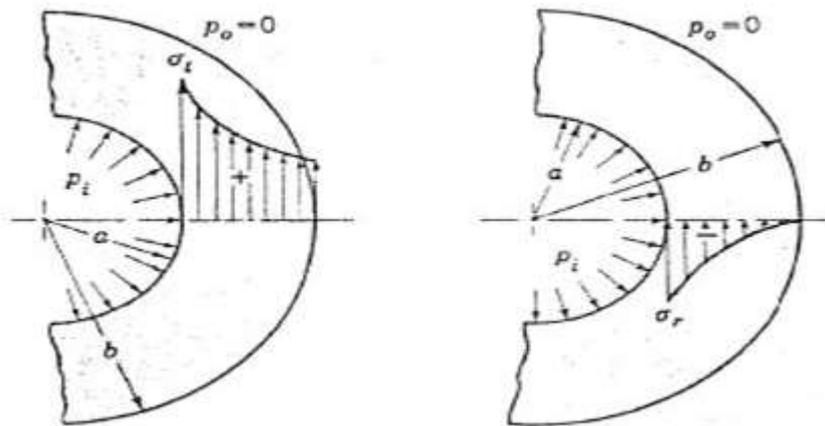


Figura 2-18. Distribución de esfuerzos radiales y tangenciales en la sección de un cilindro

Para $r=a=0,02$ m los esfuerzos máximos tangencial, radial y longitudinal no salen:

$$\sigma_t = \frac{p_i \cdot a^2}{b^2 - a^2} \cdot \left(1 + \frac{b^2}{r^2}\right) = \frac{60 \cdot 0,02^2}{0,025^2 - 0,02^2} \cdot \left(1 + \frac{0,025^2}{0,02^2}\right) = 273,33 \text{ MPa}$$

$$\sigma_r = \frac{p_i \cdot a^2}{b^2 - a^2} \cdot \left(1 - \frac{b^2}{r^2}\right) = \frac{60 \cdot 0,02^2}{0,025^2 - 0,02^2} \cdot \left(1 - \frac{0,025^2}{0,02^2}\right) = -60 \text{ MPa}$$

$$\sigma_l = \frac{p_i \cdot a^2}{b^2 - a^2} = \frac{60 \cdot 0,02^2}{0,025^2 - 0,02^2} = 106,67 \text{ MPa}$$

Conocidos los valores de los esfuerzos en el contenedor vamos a comprobar si este va a ser capaz de resistirlos de manera satisfactoria. El material del que se va a fabricar el contenedor es un acero AISI-4340, cuyas propiedades estructurales son:

- Tensión de fluencia: $S_y=710$ MPa
- Máximo esfuerzo de tracción: $S_u=1110$ MPa

Según el AISC (American Institute of Steel Construction) para garantizar la seguridad de un elemento estructural hecho de acero el esfuerzo normal permisible σ_{per} ha de estar entre un 40 y un 90% del valor de S_y , dependiendo del tipo de esfuerzo. Esto significa que para garantizar la seguridad el recipiente metálico no puede llegar nunca a entrar en el régimen plástico.

Tabla 2-3. Esfuerzo normal permisible para elementos de acero

TENSIÓN	$0.45 S_y \leq \sigma_{perm} \leq 0.60 S_y$
CORTANTE	$T_{perm} = 0.4 S_y$
FLEXIÓN	$0.60 S_y \leq \sigma_{perm} \leq 0.75 S_y$
APLASTAMIENTO	$\sigma_{perm} = 0.90 S_y$

En el caso del contenedor cilíndrico de nuestra estructura está sometido a esfuerzos de flexión, por lo que el esfuerzo máximo permisible vendrá dado por:

$$0,6 \cdot S_y \leq \sigma_{per} \leq 0,75 \cdot S_y$$

$$426 \text{ MPa} \leq \sigma_{per} \leq 532,5 \text{ MPa}$$

Si nos ponemos en el caso más restrictivo entonces vamos a suponer que el esfuerzo normal permisible no pueda ser en ningún caso superior a 426 MPa.

Como existen tres esfuerzos principales, en base a la teoría de la energía de distorsión vamos a calcular el esfuerzo efectivo de Von Mises. El esfuerzo efectivo de Von Mises para el caso tridimensional se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}{2}}$$

Donde los esfuerzos cortantes son nulos, por lo tanto la expresión puede simplificarse:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2}{2}}$$

Si sustituimos los valores de las tensiones principales:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(273,33 - (-60))^2 + (-60 - 106,67)^2 + (106,67 - 273,33)^2}{2}} = 290 \text{ MPa}$$

El factor de seguridad puede definirse por tanto como:

$$N = \frac{\sigma_{per}}{\sigma_{VM}} = \frac{426 \text{ MPa}}{290 \text{ MPa}} = 1,47$$

Podemos asumir por lo tanto que las dimensiones del contenedor van a soportar las cargas de trabajo sin experimentar grandes deformaciones. El factor de seguridad es bueno.

Diseño de la matriz de extrusión

El diseño de la matriz es quizás la parte más delicada de un proceso de extrusión, y en particular el ángulo de la matriz. Por regla general un ángulo muy pequeño lleva a un incremento de la presión de extrusión debido a la zona muerta que se crea y un aumento del rozamiento, pero un ángulo muy grande también conlleva un incremento de la presión de extrusión debido al rozamiento debido al contacto entre el material y la superficie de la matriz.

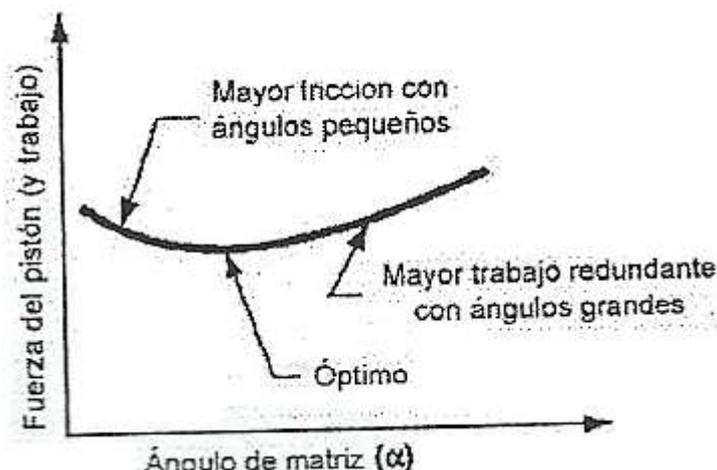


Figura 2-19. Gráfica fuerza de extrusión y ángulo de la matriz

Siebel, Pearson y Johnson realizaron numerosos experimentos para determinar el efecto del ángulo de extrusión de la matriz en la presión de extrusión necesaria. En particular, Pearson comprobó que para el uso de materiales blandos, como son el plomo o el estaño, a altas temperaturas, un ángulo grande conlleva un incremento de la presión de extrusión.

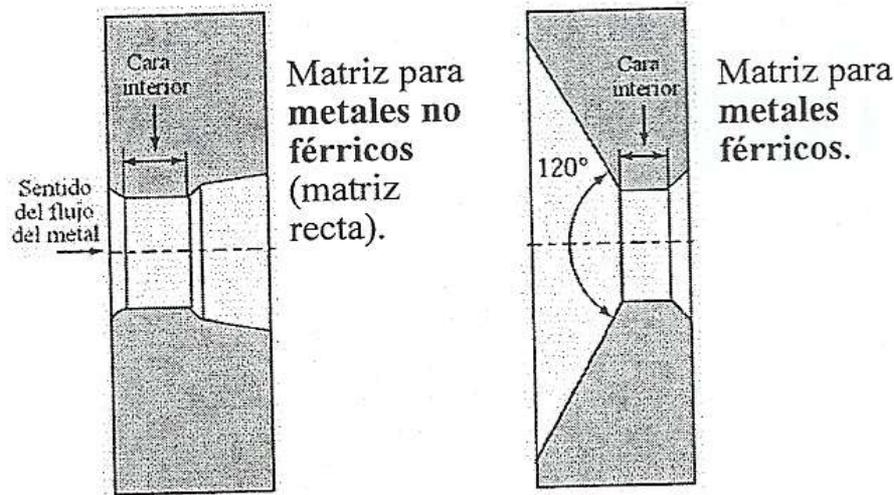


Figura 2-20. Diseño de matrices para materiales férricos y no férricos

Para nuestra máquina, nosotros hemos decidido que la matriz sea recta. Ya que estamos diseñando un proceso de extrusión para plomo y estaño, que son materiales blandos sabemos que las matrices rectas son la mejor opción, pero también por razones constructivas nos conviene el uso de matrices rectas.

Consideraciones del diseño

Más allá de los cálculos realizados para diseñar nuestra extrusora alteral, debíamos limitarnos en la medida de lo posible al uso de materiales que pudiéramos coger en el taller. Por ello diseñamos una máquina muy simple en la que el contenedor fuera un tubo de acero, que se cerraría en un extremo mediante el uso de un macho inclinado y como portamatriz y matrices de extrusión escogimos un sistema de tuerca y tornillos.

Este sistema además de simple nos permitiría trabajar de manera flexible, ya que es fácil de montar y desmontar y por lo tanto de limpiar. El conjunto de tuerca y tornillos nos va a permitir ajustar perfectamente las matrices al portamatriz y en caso de querer diseñar más matrices lo único que habría que comprar son más tornillos.

Una vez que sabíamos que la tuerca y los tornillos que íbamos a utilizar son de métrica 20, diseñamos un agujero de 28 mm de diámetro y 4 mm de profundidad sobre el que apoyaríamos nuestra tuerca, cilindrada también a 28 mm de diámetro y 4 mm de profundidad. También se le haría al contenedor un agujero pasante de 15 mm de diámetro y concéntrico con el anterior que sería la entrada a la matriz de extrusión.

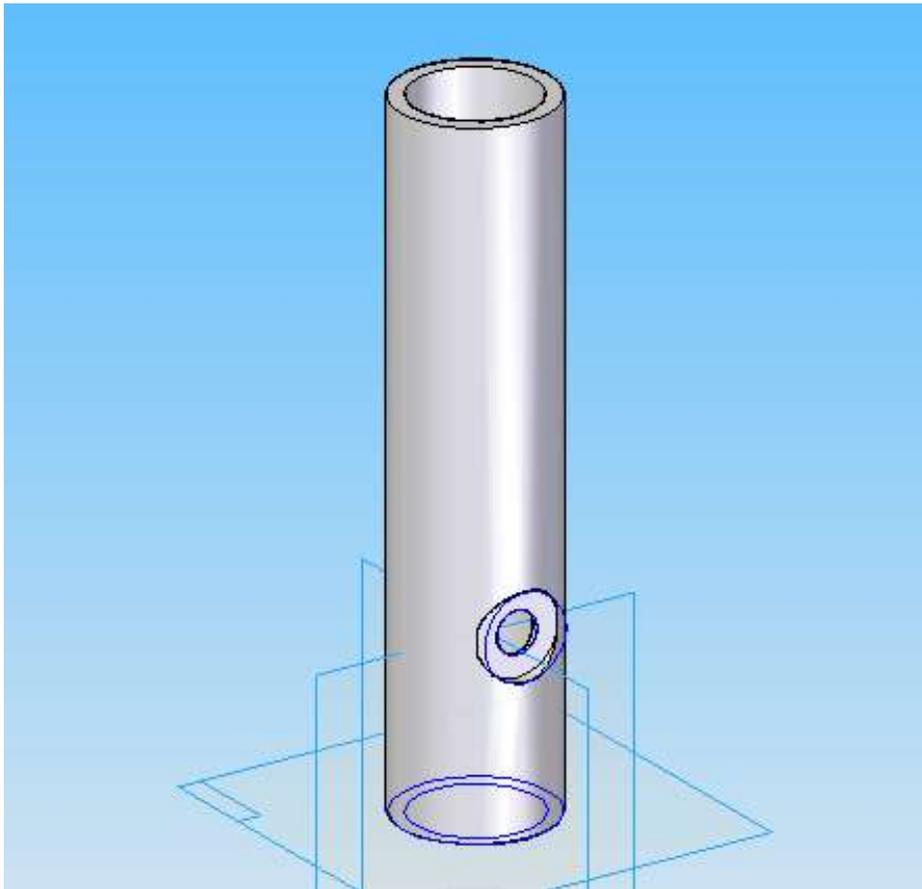


Figura 2-21. Diseño gráfico del contenedor

Una vez puesta la tuerca sobre el agujero del contenedor se soldarían ambos y éstas serían las únicas piezas de nuestra máquina que van a estar fijadas la una a la otra.

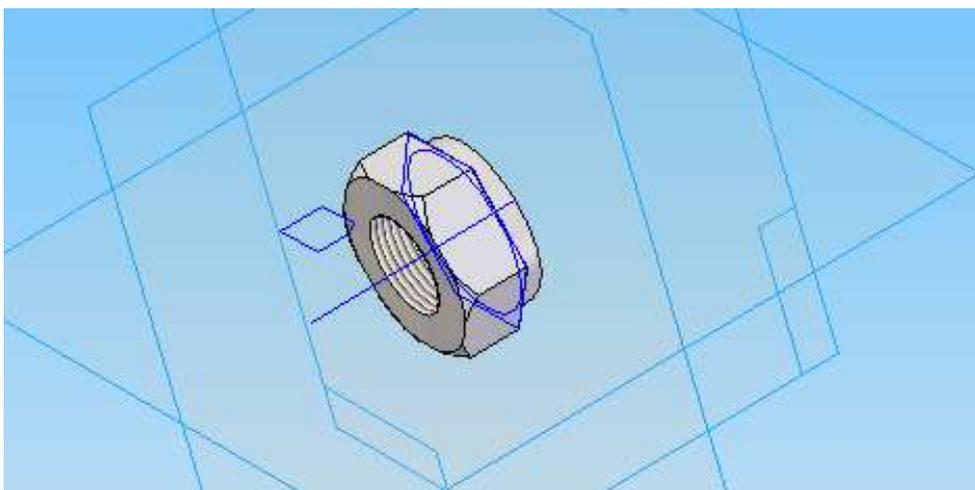


Figura 2-22. Diseño gráfico del casquillo de la matriz

Nuestra matriz de extrusión es simplemente un tornillo con un taladro en su centro y un cilindrado de 1 mm de profundidad en el borde de la matriz para que encaje en el agujero de 14 mm del contenedor y no tenga ningún resalte la entrada a la matriz de extrusión.

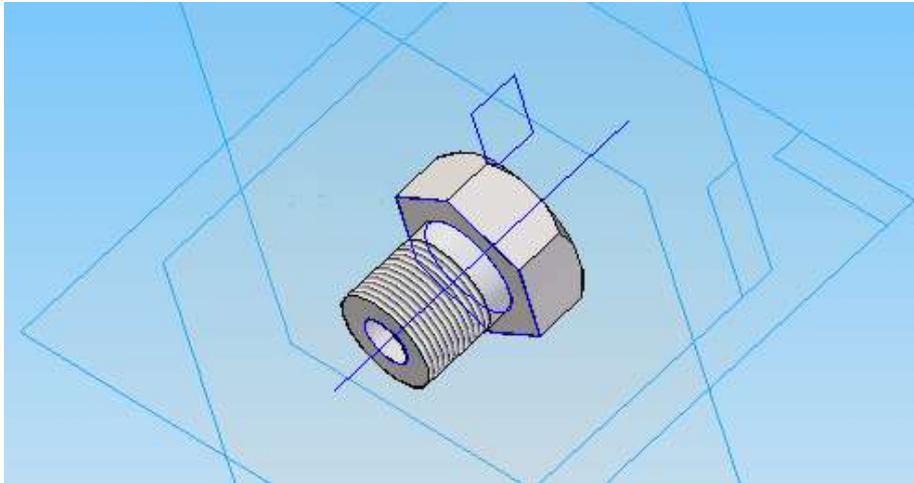


Figura 2-23. Diseño gráfico de la matriz

El conjunto de la extrusora se termina con un macho de 40 mm de diámetro que cierra el contenedor en la parte inferior y que a su vez va firmemente unido mediante un pasador de 12 mm y una tuerca de apriete a la cogida inferior de la máquina universal. A nuestro macho se le ha dado una pequeña inclinación, de 12° aproximadamente, para dirigir el flujo del material hacia la boquilla de la matriz.

Dado que la cogida de la máquina universal tiene 30 mm de diámetro, decidimos fabricar una rosca de métrica 32 y tuercas de apriete de métrica 32 para apretar el macho a la cogida de la máquina.

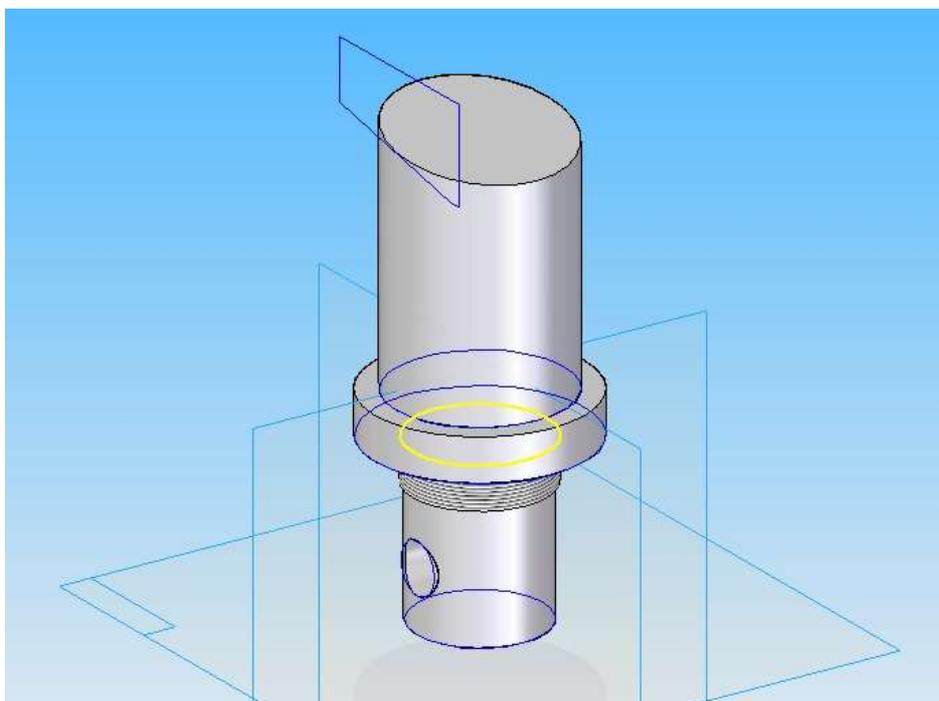


Figura 2-24. Diseño gráfico del macho inferior

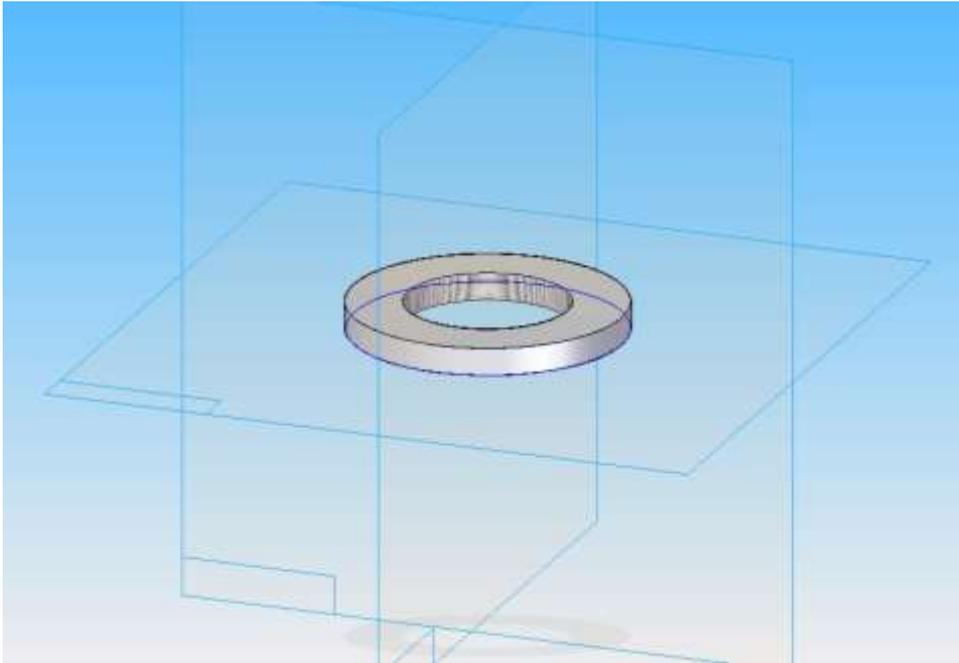


Figura 2-25. Tuerca de apriete

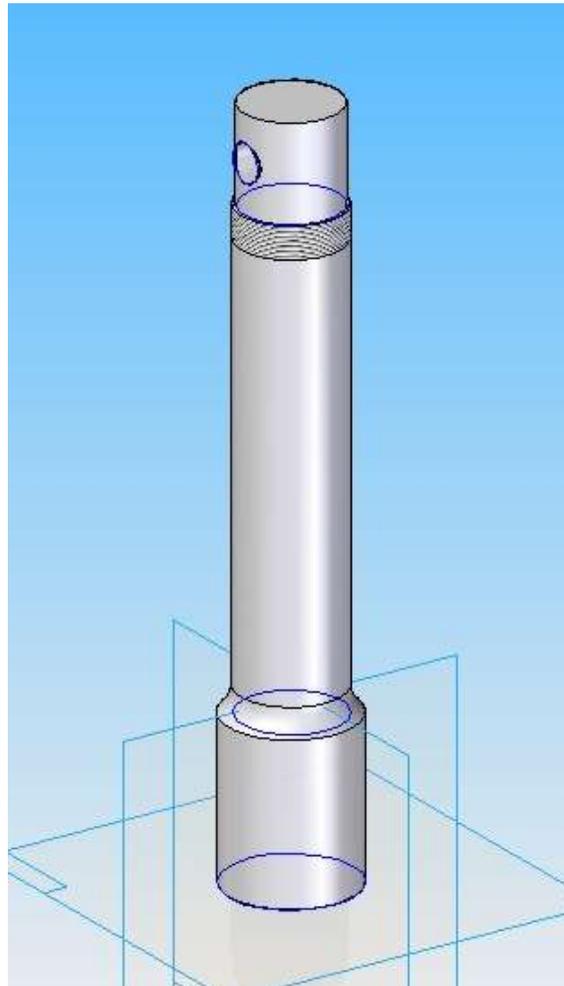


Figura 2-26. Diseño gráfico del émbolo o pistón

El émbolo se ha diseñado de manera que tenga una cabeza que ajusta al contenedor y un vástago, de esta manera únicamente la cabeza del pistón roza con las paredes del contenedor cerrando el sistema. De igual modo que el macho interior, el émbolo o pistón va cogido mediante un pasador de 12 mm a la cogida superior de la máquina y luego se ajusta mediante una tuerca de apriete.

Por último vamos a mostrar una imagen de cómo quedaría el conjunto de la extrusora ensamblado y cogido a la base inferior de la máquina universal del laboratorio.

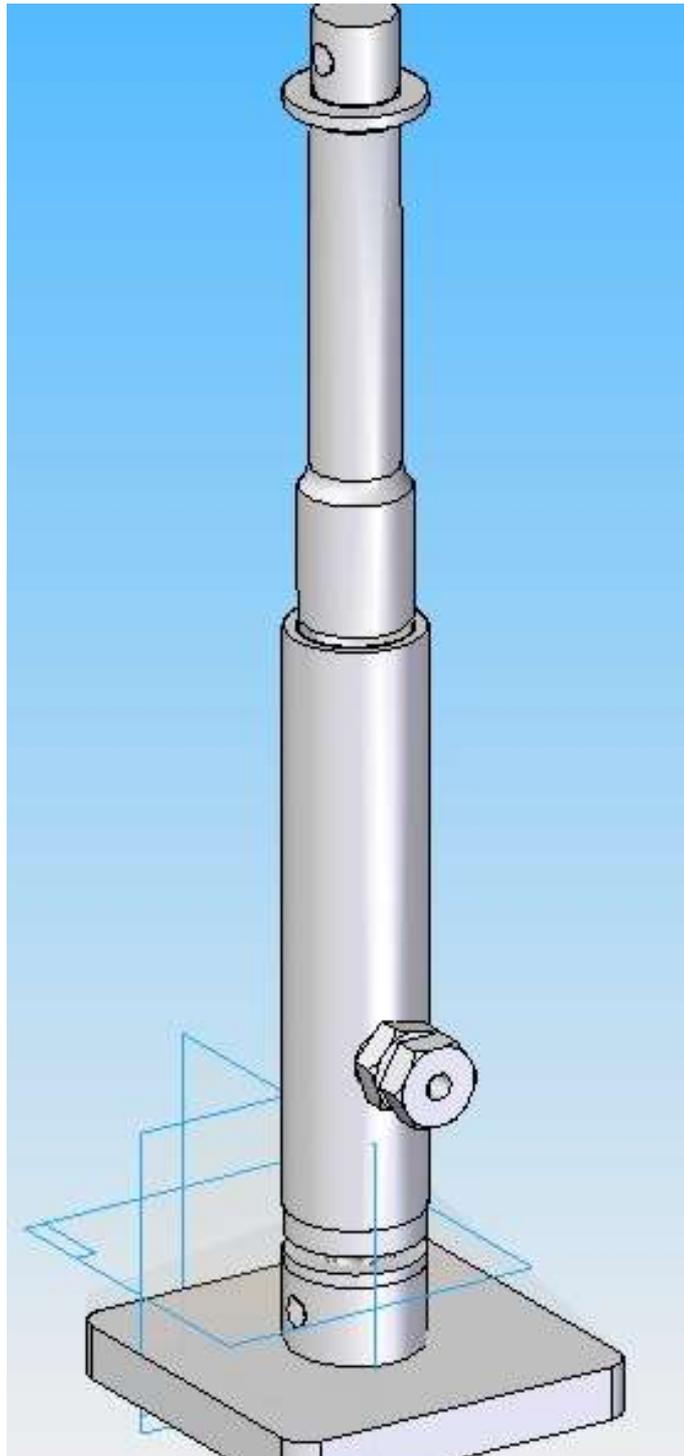


Figura 2-27. Diseño gráfico del conjunto de la extrusora lateral

Como se puede ver en la figura 2-27, se trata de un diseño sencillo y fácil de desmontar y de limpiar. Esto último es esencial que sea fácil ya que van a quedar restos de las probetas de material en el contenedor y la matriz después de un ensayo. Todas sus piezas se pueden desmontar con excepción del portamatriz que va soldado al contenedor.

Además podemos fabricar varias matrices circulares con distintos tornillos que se ponen y se quitan fácilmente.

Más adelante nos gustaría también hacer matrices con varias formas, para ello habíamos pensado en taladrar un tornillo lo máximo posible, unos 12 mm, y encargar plaquitas circulares de apenas 1 mm de grosor y que encajen entre la tuerca y el tornillo. En estas plaquitas circulares irían recortados perfiles triangulares, cuadrangulares, etc., que como máximo habrían de quedar inscritos en una circunferencia de 12 mm. Se colocaría la plaquita dentro de la tuerca hasta el fondo y luego se apretaría con el tornillo, de esta forma creemos que se podrían extrudir secciones muy diferentes.

No obstante, todo esto sería un trabajo posterior, después de comprobar que nuestra extrusora lateral cumple su misión satisfactoriamente y que pueden extrudirse probetas de plomo y estaño sin problema.

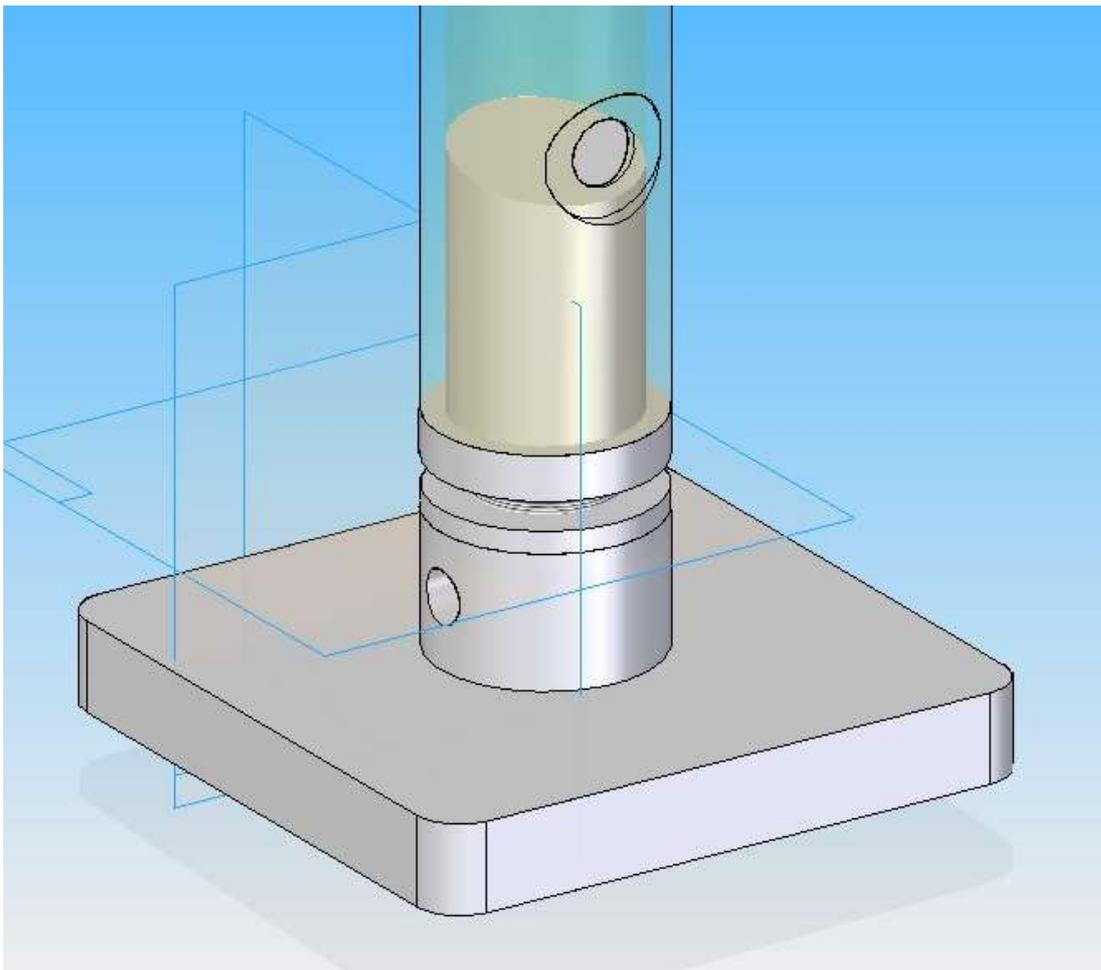


Figura 2-28. Vista del encaje del macho inferior con el contenedor

Nos ha parecido interesante también mostrar también cómo debería de quedar la zona que comprende el macho y la matriz. En esta zona la inclinación del macho cae por debajo de la boquilla de la matriz creando una especie de cuña. La inclinación se le ha dado al diseño para direccionar el flujo de material hacia la matriz, pero justo debajo de esta se crea una pequeña zona muerta en la cual el material permanece estático. El material que queda dentro de la denominada zona muerta permanece ahí a lo largo de todo el proceso. Al quedar por debajo de la matriz de extrusión, este material no tiene posibilidad alguna de salir por la matriz, no obstante la formación de la zona muerta favorece que el resto del material sí fluya a través de la matriz.

3 CONSTRUCCIÓN DE UNA EXTRUSORA LATERAL

Construcción del contenedor

Para la construcción del contenedor hemos usado un tubo de acero AISI-4340 del que disponíamos en los talleres. El tubo se encontraba en buenas condiciones y la razón por la que nos decantamos por él se debieron principalmente al buen acabado superficial que tenía su interior, algo que era muy deseable ya que así nos ahorraríamos tiempo de mecanizado.



Figura 3-1. Tubo con respecto a la cogida superior de la máquina universal



Figura 3-2. Tubo con respecto a la cogida inferior de la máquina universal

Como ya se ha dicho en el apartado de diseño, este tubo tiene un diámetro interior de 40 mm y uno exterior de 50 mm.

Aunque su acabado interior era bastante bueno, los maestros de taller y yo consideramos oportuno el darle unas pasadas de acabado para que su superficie interior fuera lo más pulida posible.

Como elemento portamatriz habíamos tomado una tuerca de métrica 20 la cual se ha mecanizado y soldado al tubo. A tal efecto le hicimos un taladro de 28 mm de diámetro y 4 mm de profundidad al tubo, de manera que no fuese pasante, para crear una pared sobre la que apoyara la tuerca. La tuerca se cilindró 4 mm a 28 mm de diámetro, y así encajamos nuestro conjunto tubo-tuerca, para después fijarlos mediante una soldadura.



Figura 3-3. Tuerca de métrica 20



Figura 3-4. Tuerca soldada al tubo

Finalmente, para terminar el contenedor se ha diseñado un macho interior que encaja justo con el tubo cerrándolo por completo. En esta ocasión, por motivos de limpieza del conjunto, se decidió que este no fuera soldado al tubo, de manera que pudiera desmontarse una vez terminado un ensayo para poder limpiarlo fácilmente.

Para fabricar el macho interior hemos seleccionado una barra de acero AISI-4340, mismo material que el tubo, de 50 mm de grosor. A partir de ahí, mediante un cilindrado progresivo, se ha fabricado nuestro macho interior. Por último se le ha refrentado la cara interior del macho a 12° para crear una suave pendiente que dirija el flujo del material hacia la matriz.



Figura 3-5. Barra de acero de 50 mm de diámetro



Figura 3-6. Macho interior terminado y con su tuerca de apriete

Para la fabricación de la cogida inferior se han tomado medidas minuciosas de la cogida inferior de la máquina universal. Así se ha diseñado un pequeño cilindro con un pasante que encaja justamente con la cogida inferior de la máquina. El macho se ajusta mediante el pasante a la cogida y finalmente se aprieta bien a la cogida inferior mediante la tuerca de apriete que se le ha incorporado.



Figura 3-7. Vista de perfil del macho interior terminado y con su tuerca de apriete

Construcción de la matriz

Para la construcción de la matriz nos decantamos por un tornillo y tuerca de calidad (dureza) 8.8. La clasificación de los tornillos según su calidad viene especificada normalmente por la norma EN ISO 898-1, y establece las siguientes calidades: 4.6, 5.6, 5.8, 6.8, 8.8, 10.9 y 12.9. Nos decantamos por esta calidad porque queríamos utilizar un material lo más resistente posible, dado que se trata de una parte crítica del conjunto, pero teniendo en cuenta nuestras posibilidades de mecanizado.



Figura 3-8 y 3-9. Tornillo y matriz de 12 mm de diámetro fabricada a partir del tornillo

En un principio nuestra idea era realizar varios ensayos de extrusión para reducciones de 10, 12 y 14 mm, para ésta última no haría falta matriz. Sin embargo, por cuestiones de tiempo y de seguridad decidimos eliminar el ensayo de extrusión a 10 mm y fabricamos una única matriz de 12 mm.

Construcción del pistón

El pistón los hemos fabricado a partir de la misma barra de acero AISI-4340, que utilizamos para el macho interior. Para el pistón hemos decidido fabricarlo en 2 partes bien diferenciadas: la cabeza, que se ajusta al interior del contenedor, y el vástago. Todo ello con objetivo de disminuir la fricción en el interior del contenedor.



Figura 3-10. Barra de acero de 50 mm de diámetro y segueta



Figura 3-11. Pistón con su tuerca de apriete

Al igual que para el macho interior fue necesario fabricar la cogida inferior, para el pistón hemos tenido que fabricar una cogida superior. Para ello nuevamente tomamos minuciosamente las medidas de la cogida superior de la máquina ya que el pistón se ajusta a la cogida superior mediante un pasante y luego se aprieta mediante una tuerca de apriete.



Figura 3-12. Pistón colocado en la cogida superior de la máquina

También hemos aprovechado esta barra de acero para fabricar las dos tuercas de apriete que íbamos a necesitar para ensamblar nuestro conjunto. La fabricación de las tuercas ha sido la parte más laboriosa de todo el mecanizado, ya que fueron necesarios varios procesos distintos de mecanizado para poder fabricarlas y todo ello conllevaba numerosos cambios de herramienta.

En primer lugar tuvimos que cortar el tubo y luego lijarlo. Después fueron necesarias varias pasadas de moleteado para imprimirle a la pieza la superficie rugosa que la caracteriza, luego se le taladró un agujero para poder roscar el interior y fabricar la tuerca. Finalmente se cortaron dos tuercas y se les hizo un pequeño agujero para poder apretarlas mediante un alicate de uñeta.



Figura 3-13. Fabricación de las tuercas de apriete

Consideraciones finales del apartado de construcción

Como apartado final del proceso de construcción de la extrusora lateral decir que una vez terminadas todas las partes que componen nuestra máquina, estas se han guardado envueltas en un plástico y bien recubiertas de aceite para protegerlas de la corrosión.

Todas el conjunto se ha desarmado totalmente a fin de que no haya fricción entre ninguna de las piezas y se han recubierto de papel embadurnado en aceite.

El fin último de este proyecto era el de diseñar y fabricar la máquina y ensayarla para comprobar que efectivamente funciona, pero no el realizar ensayos de extrusión lateral dada la limitación de tiempo que teníamos. No obstante, dado el trabajo que ha sido necesario para poder fabricarla, hemos querido conservarla con el fin de que alguien en un futuro pueda llevara cabo ensayos que de algún modo pueda determinar un proceso de extrusión lateral.

4 TRABAJO EXPERIMENTAL

Máquina universal

El primer inconveniente con que nos encontramos a la hora de realizar nuestro trabajo experimental fue el que la máquina que teníamos pensado utilizar desde un primer momento tenía instalada una célula de carga de 50 kN, cinco veces menos de lo que en principio creíamos que podríamos utilizar.

Esto nos limita a que los experimentos sólo los pudieramos hacer con plomo, y no con estaño, ya que para el segundo no tenemos en teoría fuerza suficiente para extrudirlo.



Figura 4-1. Célula de carga de 50 kN de la máquina universal

Preparación de las probetas de plomo

El primer paso a la hora de realizar los trabajos experimentales fue el de preparar las probetas que se iban a utilizar. Para asegurarnos de que tenían unas dimensiones iguales a las del contenedor de la máquina extrusora decidimos utilizar un molde metálico que era un tubo de acero como el que se utilizó para fabricar el contenedor. Dicho tubo lo pulimos para que tuviera una superficie lo más fina posible, ya que el metal fundido copia bastante bien la superficie del molde. Posteriormente a dicho tubo se le colocó un tapón de acero y se fijó en posición vertical sobre un molde con arena húmeda y luego se compactó.

Como finalmente a la hora de realizar el ensayo se nos notificó que la máquina universal sólo podíamos utilizarla con la célula de carga de 50 kN que estaba montada, entonces sólo podríamos llevara cabo el experimento con plomo, para el cual se estimó que podría llevarse a cabo con 20 kN de fuerza. Para extrudir estaño sería necesario en principio cambiar la célula de carga, lo cual por motivos de tiempo no era posible entonces.

Se calentó el plomo a unos 400°C para fundirlo y posteriormente lo vertimos en el molde que habíamos preparado. Lo dejamos solidificar y enfriar y luego con ayuda de un martillo sacamos la barra de plomo con un ligero golpe. Durante el enfriamiento el material experimenta una ligera contracción, lo cual facilita que se pueda sacar sin esfuerzo. Las barras de plomo ya enfriadas pasamos luego a darle unas ligeras pasadas de cilindrado a fin de reducir un poco más su diámetro para que luego al calentarlas, como aumentan ligeramente su tamaño por efecto de la dilatación, entraran sin problema en el contenedor de nuestra extrusora.

Finalmente se cortó las barras para obtener cuatro probetas de plomo de 50 mm de largo. Aunque en un principio habíamos pensado extrudir probetas de 120 mm de largo, finalmente decidimos que los ensayos se realizaran con probetas más pqueñas para disminuir el tiempo del ensayo y para asegurarnos mejor que la temperatura de la preforma iba a ser lo más homogénea posible.



Figura 4-2. Barras de plomo fabricadas mediante fundición en un molde metálico



Figura 4-3. Probetas de plomo de 50 mm

Cálculo del enfriamiento de una probeta de plomo

Por ser el parámetro primordial del cual depende nuestro ensayo, se ha hecho un cálculo aproximado de cómo va a ir variando la temperatura de la probeta de plomo a lo largo del tiempo.

Experimentalmente se puede demostrar y bajo ciertas condiciones obtener una buena aproximación de la temperatura de una sustancia usando la <<Ley de Enfriamiento de Newton>>. Esta ley puede enunciarse de la siguiente manera: “La temperatura de un cuerpo cambia a una velocidad que es proporcional a la diferencia de las temperaturas entre el medio externo y el cuerpo”.

Suponiendo que la constante de proporcionalidad r es la misma, ya sea que la temperatura aumente o disminuya, entonces la ecuación diferencial de la ley de enfriamiento es:

$$\frac{dT}{dt} = -r(T - T_a)$$

Donde $r = \frac{h \cdot A}{m \cdot c_p}$ y T_a es la temperatura del ambiente.

- m : masa de la probeta (kg)
- c_p : calor específico del material (J/(kg·K))
- h : coeficiente de transferencia de calor por convección (W/(m² K))
- A : área de transferencia de calor (m²)

Si integramos la ecuación anterior llegamos a la siguiente expresión exponencial:

$$T(t) = T_a + (T_0 - T_a)e^{-rt}$$

Partimos de una probeta cilíndrica de plomo (Pb) a 270°C y vamos a suponer que el ambiente está a 25°C con aire en reposo.

- Geometría probeta: $D=40$ mm y $L=50$ mm
- Datos material: $\rho=11.340$ kg/m³, $c_p=129$ J/(kg·K)

Lo primero que vamos a hacer es calcular el área y la masa totales de nuestra probeta:

$$A = \pi DL + 2\pi R^2 = \pi \cdot 0,04 \cdot 0,05 + 2 \cdot \pi \cdot 0,02^2 = 0,0088 \text{ m}^2$$

$$m = \rho V = \rho \cdot (\pi R^2 \cdot L) = 11.340 \cdot (\pi \cdot 0,02^2 \cdot 0,05) = 0,7125 \text{ kg}$$

Calculadas el área y la masa vamos a pasar a calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección. Como sabemos que el aire del recinto va a estar en reposo se va a utilizar la ecuación de correlación de Morgan:

$$Nu = C \cdot Ra^n$$

Tabla 4-1. Correlaciones convección libre, flujo externo, cilindro largo horizontal

Cilindro largo horizontal				
Nº	Correlación	Condiciones de aplicación	Tª Propiedades	Nombre
40	$\overline{Nu}_D = C Ra_D^n$ (Tabla 6.9.1)	Medio, T , cte.	Tª media de película.	Morgan
41	$\overline{Nu}_D = \left\{ 0.60 + \frac{0.387 Ra_D^{1/4}}{[1 + (0.559/Pr)^{1/4}]^{1/4}} \right\}^2$	Medio, T , cte, $10^{-5} < Ra_D \leq 10^{12}$	Tª media de película.	Churchill y Chu

Tabla 4-2. Coeficientes C y n de la correlación de Morgan (40)

Ra_D	C	n
$10^{-10} - 10^{-2}$	0.675	0.058
$10^{-2} - 10^2$	1.020	0.148
$10^2 - 10^4$	0.850	0.188
$10^4 - 10^7$	0.480	1/4
$10^7 - 10^{12}$	0.125	1/3

Esta correlación es la más idónea para calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección (h) para cilindros expuestos al aire libre cuando este se encuentra en reposo. Los coeficientes C y n son coeficientes propios de la correlación y dependen únicamente del número de Rayleigh (Ra):

- Nu (Número de Nusselt)

$$Nu = \frac{hD}{k}$$

- Ra (Número de Rayleigh)

$$Ra = \frac{g\beta\Delta TD^3}{\alpha\nu}$$

Para que el cálculo sea exacto todas las propiedades se deben tomar a la temperatura media de película (T_{mp}), que es la media de las temperaturas de la superficie de la probeta (T_0) y del aire del ambiente (T_a):

$$T_{mp} = \frac{T_0 + T_a}{2} = \frac{270 + 25}{2} = 147,5^\circ\text{C} = 420,65\text{K}$$

- Propiedades del aire seco a 25°C : $k=25,51 \cdot 10^{-3} \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, $\alpha=21,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ y $\nu=15,61 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

Calculamos el número de Rayleigh:

$$Ra = \frac{g\beta\Delta TD^3}{\alpha\nu} = \frac{9,81 \cdot \frac{1}{420,65} \cdot (270 - 25) \cdot 0,04^3}{21,4 \cdot 10^{-6} \cdot 15,61 \cdot 10^{-6}} = 1.094.655,6$$

Conocido el Rayleigh sacamos el Nusselt:

$$Nu = C \cdot Ra^n = 0,48 \cdot 1.094.655,6^{0,25} = 15,526$$

Conocido el Nusselt sacamos finalmente el coeficiente de transferencia de calor por convección (h):

$$Nu = \frac{hD}{k} \rightarrow h = \frac{Nu \cdot k}{D} = \frac{15,526 \cdot 25,51 \cdot 10^{-3}}{0,04} = 9,902 \text{ W}/(m^2K)$$

Finalmente con todos estos datos podemos calcular la constante de proporcionalidad r de nuestra ecuación de enfriamiento:

$$r = \frac{h \cdot A}{m \cdot c_p} = \frac{9,902 \cdot 0,01508}{0,7125 \cdot 129} = 1,6246 \cdot 10^{-3} s^{-1}$$

Conocida la constante de proporcionalidad y la temperatura de la probeta en el instante inicial (T_0), de 270°C , en un ambiente (T_a) a 25°C , la temperatura transcurridos 5 min (300s) será:

$$T(300) = 298,15 + (543,15 - 298,15) \cdot e^{-1,6246 \cdot 10^{-3} \cdot 300} = 448,64K = 175,5^\circ\text{C}$$

A temperatura ambiente (20°C) nuestra probeta transcurridos 5 min estará a $151,34^\circ\text{C}$, lo que es una pérdida significativa de temperatura.

Si estimamos que nuestro experimento dura 2 min (120s):

$$T(120) = 293,15 + (453,15 - 293,15) \cdot e^{-6,58 \cdot 10^{-4} \cdot 120} = 500K = 226,85^\circ\text{C}$$

Y si fuera 1 min (60s):

$$T(60) = 293,15 + (453,15 - 293,15) \cdot e^{-6,58 \cdot 10^{-4} \cdot 60} = 520,4K = 247,25^\circ\text{C}$$

Para nuestro experimento, un tiempo aceptable de traslado de la probeta hasta la máquina extrusora desde el horno es 1 min como máximo. Sin embargo también hay que tener en cuenta que la extrusora de metal no se ha precalentado, y que por lo tanto va a estar a temperatura ambiente el acero. Nos es conveniente estimar también cómo se va a enfriar la probeta en el interior del tubo de acero mientras que comienza el proceso, ya que la velocidad del ensayo va a ser bastante baja en principio por motivos de seguridad.

Podemos observar que en un tiempo relativamente bajo, se produce un descenso considerable de la temperatura de la probeta, del orden de los 10°C.

En un ensayo como el nuestro, en el que la temperatura es un parámetro esencial del proceso, no podemos asumir una bajada significativa de la temperatura con respecto a la estimada, por lo que se impone buscar una solución al problema.

Entre las posibles soluciones que se podrían implementar:

1. Sobrecalentar la probeta por encima de la temperatura estimada del proceso.
2. Calentar el contenedor donde se va a colocar la probeta para que la caída de temperatura no sea tan brusca.



Figura 4-4. Horno del taller

Lubricación para la extrusión de una probeta de plomo

Aunque a la hora de calcular nuestra máquina extrusora habíamos considerado que no se iba a utilizar ningún tipo de lubricación para ponernos del lado de la seguridad, en realidad a la hora de llevar a cabo nuestros experimentos la lubricación va a ser esencial.

Para extrudir probetas de plomo se utiliza usualmente como lubricante polvo de grafito. El grafito es una forma natural del carbono y es material sólido y flexible, no elástico. El grafito se utiliza mucho como lubricante en ambientes a altas temperaturas debido a su alta temperatura de fusión. Sus inconvenientes son que suele manchar los objetos que lubrica y que también tiende a acelerar la corrosión de algunos metales como el acero y el aluminio cuando ese metal es sumergido en agua con el grafito.



Figura 4-5. Grafito en polvo

Antes de ensamblar nuestra extrusora lateral en la máquina universal, nos aseguramos bien de que el contenedor y la matriz, las partes que van a entrar en contacto con la probeta de plomo, estén muy bien lubricadas. Para ello le espolvoreamos abundante polvo grafito en el momento de ensamblar la máquina.

Proceso de extrusión de la probeta de plomo

Antes de lubricar el contenedor y la probeta se llevó a cabo una prueba para comprobar que una vez montada en la máquina universal, el pistón y el contenedor estaban perfectamente alineados y que por tanto al bajar el pistón este entraba en el contenedor sin problemas. Efectivamente comprobamos que el pistón bajaba sin problemas hasta llegar al tope, aunque sí que existía una leve fricción. Esto es detectable debido a que se produce una pequeña fuerza de compresión, del orden de pocos newtons, para que el pistón continúe descendiendo.

Esta prueba se realizó descendiendo el pistón a muy baja velocidad para poder parar rápidamente en caso de que detectáramos un repentino incremento de la fuerza de extrusión necesaria.

Una vez comprobado que el conjunto se ensamblaba perfectamente y que el pistón era capaz de realizar el recorrido completo, procedimos a ajustar mediante las tuercas de apriete el macho inferior a la cogida inferior de la máquina y el pistón a la cogida superior de la máquina.



Figura 4-6. Pistón bajado hasta el tope inferior de la extrusora

Una vez comprobado que el pistón baja sin problemas y que se va a poder realizar el ensayo con garantías, lubricamos el contenedor y la matriz y ensamblamos nuevamente el conjunto en la máquina universal y comenzamos nuestro ensayo.

Para nuestro primer ensayo decidimos establecer una velocidad de extrusión muy baja, de 0,01 mm/s. En varias de las gráficas y tablas que hemos visto los experimentos se han realizado a una velocidad de 0,1 inch/min, o lo que es igual, 0,0423 mm/s. Cuando las relaciones de extrusión son muy grandes lo aconsejable es realizar el experimento a velocidades bajas, el problema es que la probeta se enfríe si este tiempo es elevado.

Se sacó la probeta del horno a 280°C y se llevó rápidamente, con ayuda de unas pinzas hasta la máquina extrusora y la depositamos en el contenedor. Inmediatamente comenzamos a bajar el pistón, sin embargo fueron necesarios cerca de 5 minutos para bajar el pistón hasta que tocó la probeta y comenzó la extrusión propiamente dicha. El momento en que el pistón toca la probeta y comienza a apretar la fuerza que registra la máquina universal comienza a subir rápidamente.



Figura 4-7. Inicio del experimento de extrusión de la probeta de plomo

Desafortunadamente a los 5 minutos de comenzar la extrusión la máquina alcanzó 47,5 kN de fuerza, que era el tope que habíamos establecido para que no se alcanzaran los 50 kN de fuerza que son el límite de la célula de carga instalada. El proceso se paró y la probeta de plomo tan solo había sido comprimida 2,6 mm, sin llegar siquiera a llenar la matriz.

Al llegar a una región cercana a los 30 kN de presión la máquina empezó a ejercer unos ciclos de fuerza cada vez más grandes hasta que alcanzó un pico los 47,5 kN y se detuvo el ensayo. No está muy claro por qué la máquina empezó a funcionar así, lo esperado en todo caso era que siguiera aplicando una fuerza continua cada vez mayor hasta alcanzar los 47,5 kN y que entonces se parara súbitamente. En cualquier caso llegamos al límite de capacidad de fuerza que disponíamos y no fuimos capaces de extrudir la probeta de plomo.

Aunque hay que analizar las causas de por qué si habíamos estimado que con unos 30 kN seríamos capaces de extrudir nuestras probetas de plomo hemos necesitado 47,5 kN y no hemos sido capaces de conseguirlo, en principio creemos que el enfriamiento de la probeta podría haber sido la causa.

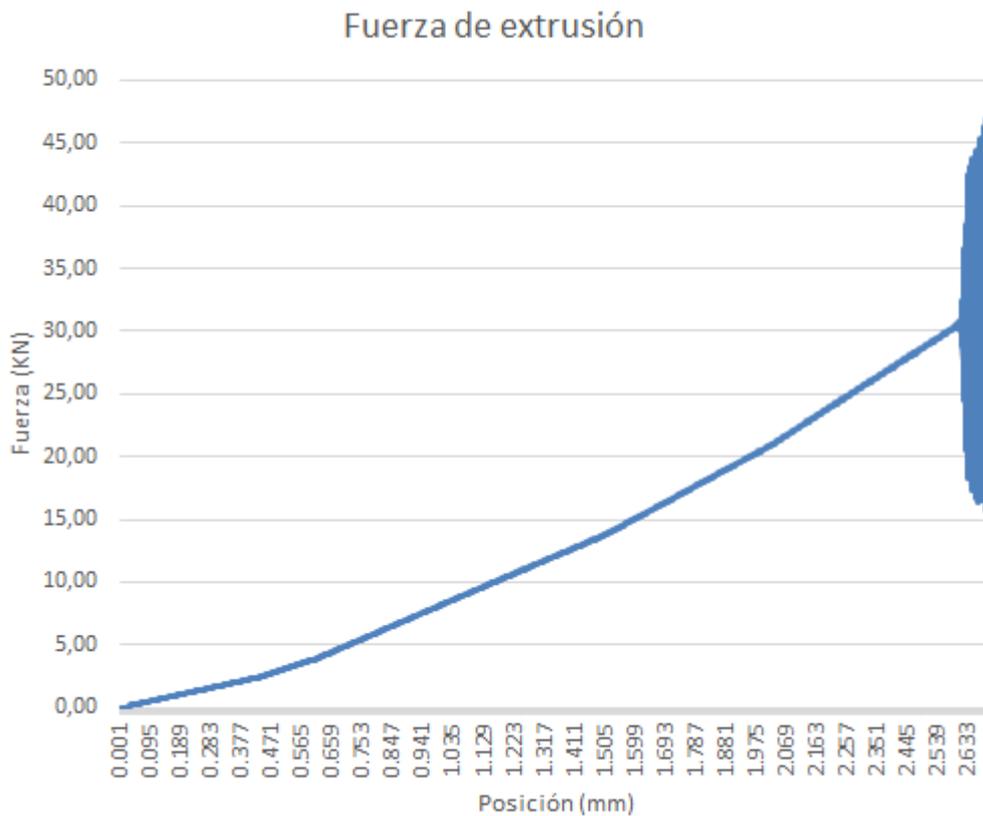


Figura 4-8. Gráfica fuerza-desplazamiento de la extrusión de la probeta de plomo

Ensayo de extrusión de una probeta de plastilina

Motivación del uso de la plastilina

Ante la imposibilidad de realizar la extrusión de una probeta de plomo o estaño, fin con el que se había diseñado la máquina, decidimos valorar las siguientes opciones:

- Buscar un laboratorio que tuviera una máquina universal con más capacidad
- Extrudir un material más blando como es la plastilina

Por cuestiones de tiempo y simplicidad se decidió que lo mejor sería probar a extrudir plastilina, y si en un futuro se tenía más tiempo podría extrudirse plomo en otra máquina de los laboratorios.

La plastilina es un material de plástico, de colores variados, compuesto de sales de calcio, vaselina y otros compuestos alifáticos, principalmente ácido esteárico. Es un material muy utilizado para ensayos de extrusión debido a que modela muy bien el comportamiento de los materiales metálicos como son los aceros y los aluminios, o en este caso, el plomo y el estaño.

Su baja resistencia la hace ideal para simular ensayos de extrusión o conformado plástico sin la necesidad de utilizar grandes fuerzas. Además los pigmentos que se añaden a la plastilina no modifican su reología, por lo que se pueden utilizar plastilinas de distintos colores para observar visualmente cómo cambia el material.

Propiedades del material

Al tratarse de un material muy blando, este experimento se va a realizar a temperatura ambiente, por lo que los datos que vamos a necesitar son el coeficiente de resistencia (K) y el exponente de endurecimiento por deformación (n).

Tabla 4-3. Valores de K , m y n para las distintas plastilinas comerciales

Nom commercial	K ($10^5 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-m}$)	m	n Filé (figure 10)	n Compression
<i>Pierre Humide ENSMP</i>	1,80	0,16	0,07	- 0,02
<i>Pierre Humide Maternelle bleue</i>	2,40	0,14	0,16	- 0,13
<i>Pierre Humide Maternelle jaune</i>	2,30	0,15	0,16	- 0,13
<i>Pâte silicone</i>	$0,25 < K < 0,86$	$0,23 < m < 0,40$	0,16	- 0,09
<i>Peter Pan rouge</i>	1,94	0,05	0,25	0,05
<i>Peter Pan ocre</i>	1,50	0,07		
<i>Filia</i>	2,30	0,15	0,20	0,06
<i>Emi</i>	1,50	0,10	0,02	- 0,01
<i>Cire colophane</i>	1,23	0,25		- 0,05

Cálculo de la fuerza de extrusión necesaria

La fórmula de la presión de extrusión es igual:

$$p(L) = K \cdot \bar{\sigma}_y \cdot \left(a + b \cdot \Delta\varepsilon + \psi \frac{2L}{D_0} \right)$$

Considerando que el experimento es el mismo que para el caso del plomo y el estaño los valores relativos al proceso de extrusión no varían, ya que estamos considerando probetas de idénticas dimensiones (L y D_0), mismo incremento de deformación ($\Delta\varepsilon$) y también el caso de extrusión sin lubricación (ψ):

- Factor de forma (K): $K=1$
- Constantes de Johnson (a y b): $a=0,8$ y $b=1,5$
- Incremento de deformación: $\Delta\varepsilon=2,7726$
- Sin lubricación: $\psi=1$
- Dimensiones de la probeta: $L=0,12 \text{ m}$ y $D_0=0,04 \text{ m}$

Lo que sí va a variar es la tensión de fluencia promedio, la cual viene dada por el material que se utilice y la temperatura a la que se realice el ensayo.

La tensión de fluencia se calcula con la ley de Hollomon, que para el caso de trabajo en frío es:

$$\bar{\sigma}_y = \frac{K}{n+1} \cdot \frac{\varepsilon_f^{n+1} - \varepsilon_0^{n+1}}{\varepsilon_f - \varepsilon_0}$$

Si consideramos que la deformación inicial es nula, $\varepsilon_0 \approx 0$, entonces nuestra fórmula se puede simplificar de la siguiente manera:

$$\bar{\sigma}_y = \frac{K}{n+1} \cdot \varepsilon_f^{n+1}$$

Como no conocemos el tipo de plastilina exacto que tenemos, hemos tomado como valores aproximados $K=0,23$ MPa y $n=0,2$. Si sustituimos estos valores:

$$\bar{\sigma}_y = \frac{0,23}{0,2+1} \cdot 2,7726^{0,2} = 0,235 \text{ MPa}$$

Conocido el valor de la tensión de fluencia media, calculamos la presión de extrusión necesaria:

$$p_{\text{Plastilina}} = 0,235 \cdot \left(0,8 + 1,5 \cdot 2,7726 + \frac{2 \cdot 0,12}{0,04} \right) = 2,57 \text{ MPa}$$

Finalmente la fuerza necesaria para extrudir un material viene dada por la ecuación:

$$F = p \cdot A_0$$

Para el caso de la plastilina:

$$F_{\text{Plastilina}} = (2,57 \cdot 10^6) \cdot \pi \cdot \frac{0,04^2}{4} = 3,2 \text{ kN}$$

En teoría con 3,2 kN de fuerza seríamos capaces de extrudir probetas de plastilina de 120 mm de largo y 40 mm de diámetro. Nuevamente este dato es muy aproximado, teniendo en cuenta que esta fórmula de la presión de extrusión para un proceso de extrusión directa es válido también para el caso de la extrusión lateral.

Preparación de las probetas

Se ha utilizado como molde para fabricar las probetas de plastilina el mismo tubo de acero que nos había sobrado de fabricar el contenedor y que habíamos preparado para fabricar las probetas de plomo. En este caso simplemente embadurnamos bien el tubo con aceite de parafina, que es el líquido que se utiliza para lubricar la plastilina, y metimos un rulo de plastilina de más o menos el grosor del tubo.

Finalmente con el mismo pistón de la máquina extrusora aprovechamos para compactar la plastilina y darle un diámetro final de 40 mm. Al igual que para el caso de las probetas de plomo, para acortar el tiempo de ensayo se decidió cortar unas probetas de 50 mm de largo.



Figura 4-9 y 4-10. Plastilina y rulo de plastilina después de conformarlo



Figura 4-11. Probetas de plastilina

Lubricación para la extrusión de una probeta de plastilina

La parafina es el nombre común de un grupo de hidrocarburos alcanos de fórmula general C_nH_{2n+2} , donde n es el número de átomos de carbono. La molécula más simple de parafina es el metano, CH_4 , un gas a temperatura ambiente; en cambio, los miembros más pesados de la serie, como las formas sólidas de parafina, llamadas cera de parafina, provienen de las moléculas más pesadas C_{20} a C_{40} . La parafina se obtiene normalmente como un derivado del petróleo en las refinerías.

La parafina líquida, o aceite de parafina, es una mezcla de hidrocarburos pesados y se utiliza como lubricante en la industria entre muchas otras cosas. El aceite de parafina también es un ingrediente popular para cosméticos, incluyendo bálsamos de labios y lápices labiales, además la base aceitosa conteniendo parafina asegura que un producto cosmético no se limpiará o sacará fácilmente. El aceite de parafina puede ser usada como ingrediente químico en medicinas, incluyendo cremas tópicas, cremas hidratantes, ungüentos, bálsamos y laxantes. Esto es debido a que el organismo no tiene la capacidad de absorber la parafina, por la que esta se elimina de un modo u otro.



Figura 4-12. Aceite de parafina utilizado como lubricante para la plastilina

Proceso de extrusión

Nuevamente al inicio del ensayo comprobamos que el pistón recorre enteramente el contenedor de la matriz y que no hay rozamiento, o que sea despreciable. Una vez hecha esta comprobación pasamos a lubricar bien todo el contenedor con el aceite de parafina y realizamos un primer ensayo muy lento para verificar que efectivamente se podía extrudir la plastilina sin problemas.

Este primer ensayo además se hizo sin ponerle ninguna matriz, es decir, que el producto extruido copiaba la forma del agujero del contenedor que son 14 mm. Decidimos hacerlo así para no hacer de golpe la reducción mayor que teníamos preparada, de 12 mm, y quedarnos del lado de la seguridad.

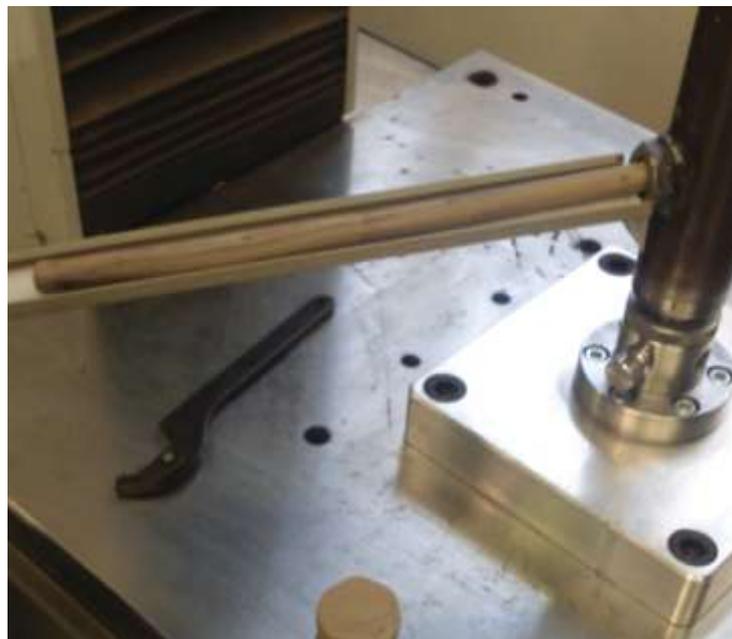
Para este primer ensayo fijamos una velocidad de 0,125 mm/s, 10 veces la velocidad a la que realizó el ensayo de la probeta de plomo. Al ser un material mucho más blando consideramos que nuestro margen era mucho mayor y que éste nuevo ensayo podría realizar a una velocidad sensiblemente mayor que el anterior.

En esta ocasión nuestra probeta de plastilina se pudo extrudir con facilidad, con un esfuerzo máximo de 100 N, sin problemas. Como podemos ver la fuerza requerida para llevar a cabo la extrusión de la plastilina fue bastante inferior a la estimada con la fórmula para el cálculo de la presión de extrusión.

Para este primer ensayo no se tomaron datos ni se obtuvo la gráfica fuerza-desplazamiento ya que sólo queríamos comprobar que íbamos a poder realizar nuestro ensayo con garantía.



Figuras 4-13 y 4-14. Producto extruido al principio del ensayo y a mitad del mismo



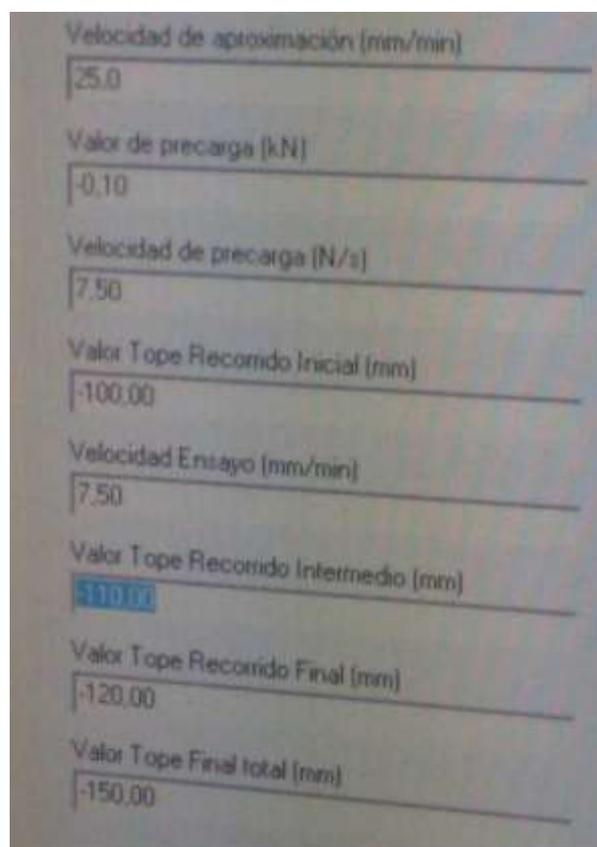
Figuras 4-15. Producto extruido al final del ensayo

De una probeta de plastilina obtuvimos finalmente un producto extruido del diámetro de la matriz, 14 mm, y unos 36 cm de longitud. El producto extruido lo recogimos sobre una regleta de plástico con una superficie de papel parafinado y bien lubricada con aceite de parafina para facilitar que el producto extruido avanzara recto sin problemas.



Figuras 4-16. Producto extruido final

Una vez comprobado que el ensayo de extrusión con plastilina podía realizarse sin problemas pasamos a colocarle nuestra matriz de 12 mm. La velocidad de extrusión que se fijó fue la misma que para el ensayo anterior, 0,125 mm/s



Figuras 4-17. Parámetros del ensayo final con plastilina



Figuras 4-18. Salida del producto extruido a través de la matriz



Figuras 4-19. Recogida del producto extruido con la matriz

En este último ensayo con la matriz colocada obtuvimos un producto extruido algo mayor, de 40 cm, y una mejor calidad superficial, ya que el material extruido copiaba mejor la forma de la matriz. No obstante, el rozamiento en la matriz también incrementó la presión necesaria para extrudir esta probeta. En esta ocasión fueron necesarios unos 560 N para poder extrudir la plastilina a través de la matriz. Finalmente la presión comenzó a subir hasta los 1,2 kN al final del proceso de extrusión debido a la formación del tope, cuando ya no queda apenas material y a éste le cuesta llegar hasta la matriz para salir a través de esta.



Figuras 4-20 y 4-21. Vista de perfil del resto de la extrusión y vista de frente

Las figuras 4-19 y 4-20 son una vista del frontal y del perfil que quedan de la probeta extruida una vez terminado el ensayo.

Como se puede observar a pesar de la lubricación no se ha conseguido del todo eliminar la fricción entre la probeta de plastilina y las paredes del contenedor y la matriz como denota la superficie rugosa de los restos de la plastilina.

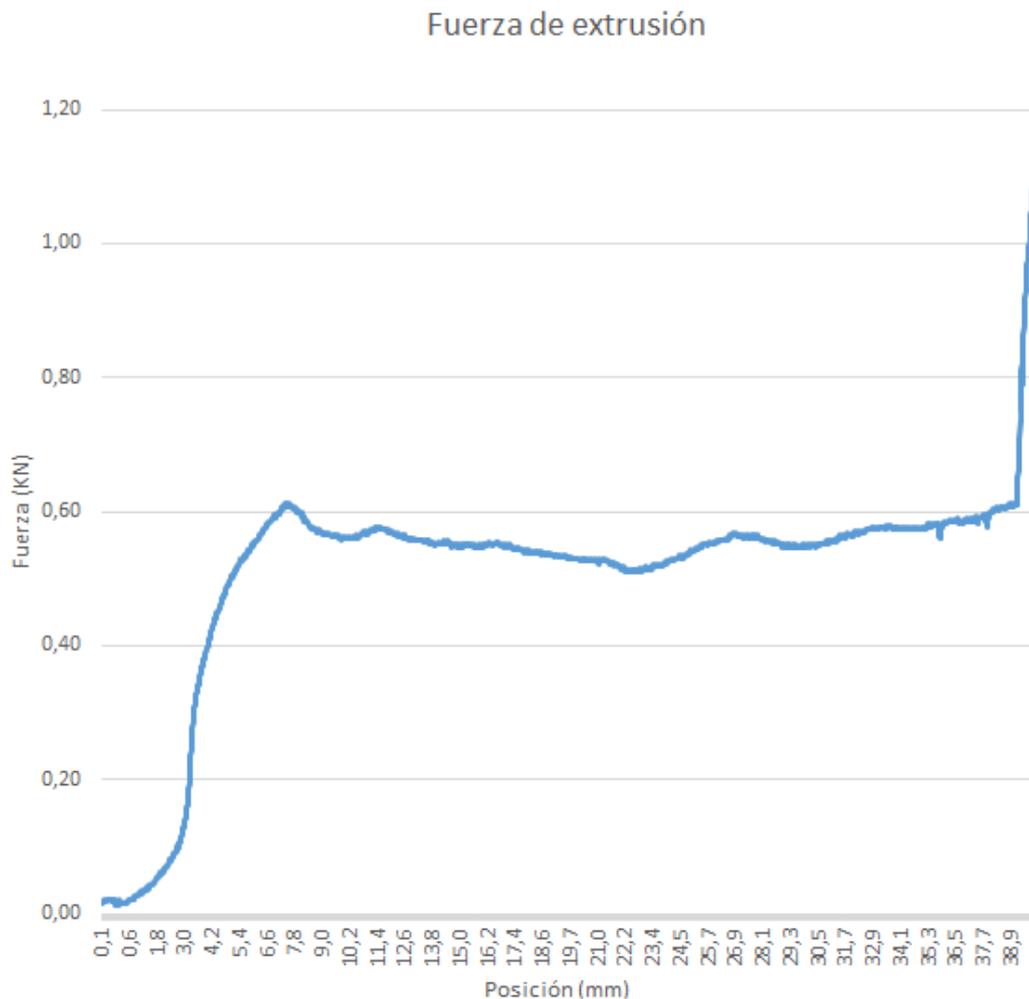


Figura 4-22. Gráfica fuerza-desplazamiento de la extrusión de la probeta de plastilina

Como podemos ver en la gráfica fuerza-desplazamiento para la extrusión de la plastilina, se observa la evolución típica de la presión en un proceso de extrusión. Al comienzo de la extrusión no existe apenas resistencia al avance del pistón por lo que la presión arranca desde cero. A medida que la matriz se va llenando cada vez es mayor la cantidad de material que se deforma por lo que la presión va aumentando hasta un máximo que coincide con el llenado completo de la matriz.

A partir de este momento la resistencia que ofrece el avance del pistón al paso del material por la matriz no varía. Si la extrusión fuese sin fricción (lubricación perfecta o extrusión indirecta) la presión se mantendría constante. Como podemos observar, en este caso existe fricción debido al rozamiento con el contenedor y la matriz.

Por último, cuando el pistón se acerca a la boca de la matriz, el material que queda en el contenedor sufre un severo aplastamiento mientras trata aún de salir por la matriz. Esto hace que el empuje del pistón sea muy poco eficiente y que hagan falta presiones muy grandes para hacer fluir al material en dirección a la matriz.

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Ensayo de extrusión del plomo

Para extrudir probetas de plomo habíamos estimado que con unos 30 kN íbamos a poder llevar a cabo el proceso, sin embargo como ya se ha dicho a 47,5 kN el ensayo se paró y no había comenzado la extrusión. Únicamente se llegó a comprimir la probeta 2,6 mm.

Entre las posibles causas de este experimento fallido barajamos que:

- La fórmula de la extrusión directa no es válida para predecir la presión de extrusión para un ensayo de extrusión lateral.
- El material no se ha caracterizado correctamente del todo. El coeficiente de resistencia (C) y el exponente de endurecimiento por velocidad de deformación (m) se han extrapolado de los resultados de otros experimentos.
- La probeta se enfrió mucho debido a lo lento del proceso, cambiando totalmente las condiciones del proceso.

Aunque con un único ensayo realizado y sin haber extruido la probeta para ver verdaderamente que fuerza habríamos necesitado es quizás un poco precipitado sacar conclusiones, vamos a aventurar una solución a priori de lo que pudo haber ocurrido.

En primer lugar no podemos descartar la fórmula para la extrusión directa como estimación para una extrusión lateral todavía. Los datos obtenidos utilizando esta expresión parecen más o menos acordes a los valores que se manejan en los experimentos de Johnson para matrices singulares. Para descartar esta expresión es necesario a nuestro juicio el haber corregido al menos las otras dos posibles causas de error.

El que el material de extrusión, en este caso plomo, no se ha caracterizado bien es un hecho. Las propiedades de este material a su temperatura de trabajo se han extrapolado de otros experimentos y ensayos que se han estudiado. La manera correcta de proceder habría sido el aplastar varias probetas de plomo a 260°C a distintas velocidades y obtener sus curvas tensión-deformación a fin de extraer de estas sus valores exactos del coeficiente de resistencia y el exponente de endurecimiento por deformación.

Por último está el hecho de la temperatura real a la que se realizó el ensayo. Como ya se ha comentado antes, la temperatura es un factor esencial en todo proceso de extrusión y cuando se hace una estimación en base a una temperatura de trabajo, debemos asegurarnos de que el ensayo va a realizarse efectivamente a esa temperatura.

En el cálculo del enfriamiento de la probeta, estimamos que dejando la probeta al aire libre, ésta pasaba de 270°C a 175,5°C en tan solo 5 min. Adoptamos entonces como solución el sobrecalentarla 10°C más, pero luego de llevarla hasta el contenedor, el cual se encontraba a temperatura ambiente, pasaron 5 min aproximadamente hasta que dio comienzo la extrusión y otros 5 min de extrusión propiamente dicha.

Vamos a suponer ahora que nosotros hubiéramos cogido el contenedor de acero y lo hubiéramos calentado también a 280°C en el horno junto con la probeta de plomo para que no hubiera habido un brusco descenso de la temperatura de la probeta de plomo. Por lo tanto vamos a partir de que tengo un tubo de acero a 280°C para ver a qué temperatura se encontraría pasado los 10 min del experimento.

Si partimos de un tubo de acero a 280°C y vamos a suponer que el ambiente está a 25°C con aire en reposo.

- Geometría probeta: $D=50$ mm y $L=50$ mm
- Datos material: $\rho=7.854$ kg/m³, $c_p=434$ J/(kg·K)

Lo primero que vamos a hacer es calcular el área y la masa totales de nuestra probeta:

$$A = \pi DL + 2\pi R_2^2 = \pi \cdot 0,05 \cdot 0,05 + 2 \cdot \pi \cdot 0,025^2 = 0,0118 \text{ m}^2$$

$$m = \rho V = \rho \cdot \pi \cdot L(R_2^2 - R_1^2) = 7.854 \cdot \pi \cdot 0,05 \cdot (0,025^2 - 0,02^2) = 0,28 \text{ kg}$$

Calculadas el área y la masa vamos a pasar a calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección. Como sabemos que el aire del recinto va a estar en reposo se va a utilizar la ecuación de correlación de Morgan:

$$Nu = C \cdot Ra^n$$

Esta correlación es la más idónea para calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección (h) para cilindros expuestos al aire libre cuando este se encuentra en reposo. Los coeficientes C y n son coeficientes propios de la correlación y dependen únicamente del número de Rayleigh (Ra):

- Nu (Número de Nusselt)

$$Nu = \frac{hD}{k}$$

- Ra (Número de Rayleigh)

$$Ra = \frac{g\beta\Delta TD^3}{\alpha\gamma}$$

Para que el cálculo sea exacto todas las propiedades se deben tomar a la temperatura media de película (T_{mp}), que es la media de las temperaturas de la superficie de la probeta (T_0) y del aire del ambiente (T_a):

$$T_{mp} = \frac{T_0 + T_a}{2} = \frac{280 + 25}{2} = 152,5^\circ\text{C} = 425,65\text{K}$$

- Propiedades del aire seco a 25°C: $k=25,51 \cdot 10^{-3} \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, $\alpha=21,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ y $\nu=15,61 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

Calculamos el número de Rayleigh:

$$Ra = \frac{g\beta\Delta T D^3}{\alpha\nu} = \frac{9,81 \cdot \frac{1}{425,65} \cdot (280 - 25) \cdot 0,05^3}{21,4 \cdot 10^{-6} \cdot 15,61 \cdot 10^{-6}} = 2.199.124,85$$

Conocido el Rayleigh sacamos el Nusselt:

$$Nu = C \cdot Ra^n = 0,48 \cdot 2.199.124,85^{0,25} = 18,48$$

Conocido el Nusselt sacamos finalmente el coeficiente de transferencia de calor por convección (h):

$$Nu = \frac{hD}{k} \rightarrow h = \frac{Nu \cdot k}{D} = \frac{18,48 \cdot 25,51 \cdot 10^{-3}}{0,05} = 9,43 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

Finalmente con todos estos datos podemos calcular la constante de proporcionalidad r de nuestra ecuación de enfriamiento:

$$r = \frac{h \cdot A}{m \cdot c_p} = \frac{9,43 \cdot 0,0118}{0,28 \cdot 434} = 9,157 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$$

Conocida la constante de proporcionalidad y la temperatura del tubo en el instante inicial (T_0), de 280°C, en un ambiente (T_a) a 25°C, la temperatura transcurridos 10 min (600s) será:

$$T(600) = 298,15 + (553,15 - 298,15) \cdot e^{-9,157 \cdot 10^{-4} \cdot 600} = 445,36\text{K} = 172,21^\circ\text{C}$$

Si suponemos, de manera muy optimista, que a principios del experimento teníamos un contenedor de acero a 280°C, éste se encontraría a 172,21°C a los 10 minutos del experimento. El acero tiene un calor específico mucho mayor que el del plomo, por lo que tarda más en enfriarse.

Obviamente este cálculo no es para nada un reflejo del proceso real de enfriamiento de nuestra probeta de plomo a 280°C en el interior del contenedor de acero a temperatura ambiente, pero sirve para darnos una idea de cuan drásticamente cae la temperatura de los materiales metálicos al aire libre.

Si ahora nos ponemos en nuestro caso real, el de la probeta de plomo que se metió a 280°C en el interior de un tubo de acero a temperatura ambiente y se la dejó ahí 10 min, consideramos que con toda seguridad al cabo de los 10 min dicha probeta no se encontraba a más de 170°C. Si nos vamos a las tablas que reflejan la influencia de la temperatura en los procesos de extrusión, para el plomo a unos 170°C se estima una presión de extrusión de unas 2 tons/sq.in lo que equivale a unos 28 MPa.

Para esta presión de extrusión habríamos necesitado según nuestros cálculos unos 35,2 kN con respecto a los 24,1 kN a los que habíamos estimado que se podría realizar nuestro proceso. Con esto no conseguimos invalidar tampoco la hipótesis de que fue el descenso de temperatura el causante de que necesitaríamos tanta fuerza para poder extrudir el plomo. Incluso a unos 100°C los datos que hemos manejado estiman que se pueden lograr reducciones de cerca de un 96% con unas 2 tons/sq.in de presión, es decir, 41,37 MPa. ¿Se encontraba nuestra probeta a menos de 100°C durante el proceso de extrusión? No hemos querido seguir ahondando en este tipo de cálculos debido a la complejidad de las operaciones y al número de suposiciones que venimos haciendo, pero con esto queremos incidir en que deberíamos encontrar la manera de garantizar la temperatura de trabajo requerida durante todo el proceso dada su importancia.

También la simulación del flujo de metal por ordenador mediante DEFORM 3D pueda aportarnos otra visión del proceso de la extrusión lateral. Ya que aunque nosotros hemos considerado que el flujo no va a incrementar drásticamente la presión de extrusión en base a la información que hemos analizado, el tratar una extrusión lateral como una extrusión directa puramente no es correcto.

Ensayo de extrusión de la plastilina

El caso de la plastilina ha sido curiosamente el contrario al del plomo. Mientras que para el plomo se había estimado una presión de extrusión menor de la necesaria, en el caso de la plastilina la presión que se había estimado era mucho mayor de la que finalmente hizo falta para llevar a cabo el ensayo.

Como causas de error creemos que se deberían considerar:

- La fórmula de la extrusión directa no es válida para predecir la presión de extrusión para un ensayo de extrusión lateral.
- El material no se ha caracterizado correctamente del todo. Simplemente hemos cogido unos valores para el coeficiente de resistencia (K) y el exponente de endurecimiento por deformación (n) lo más perjudiciales posible para estar del lado de la seguridad.
- El sobredimensionamiento en casi todos los aspectos (lubricación, longitud de la probeta, etc.) que se ha hecho del proceso.

Si intentamos hacer ahora una estimación más realista del mismo proceso, es decir, longitud de la probeta exacta y una buena lubricación, aún considerando el mismo material, seguramente el valor de la presión de extrusión necesaria va a descender considerablemente.

Supongamos que coeficiente de fricción es bajo, $\psi=0,3$ y que la longitud de la probeta es de 50 mm, nada más con estas modificaciones:

$$p(L) = K \cdot \bar{\sigma}_y \cdot \left(a + b \cdot \Delta\varepsilon + \psi \frac{2L}{D_0} \right)$$

$$p_{Plastilina} = 0,235 \cdot \left(0,8 + 1,5 \cdot 2,7726 + 0,3 \cdot \frac{2 \cdot 0,05}{0,04} \right) = 1,34 \text{ MPa}$$

Como podemos observar para unas estimaciones más realistas, la presión de extrusión que necesitaríamos ahora son de 1,34 MPa, casi dos veces la presión de extrusión estimada al principio. Para esta presión de extrusión, la fuerza de extrusión requerida sería de:

$$F = p \cdot A_0$$

$$F_{Plastilina} = (1,34 \cdot 10^6) \cdot \pi \cdot \frac{0,04^2}{4} = 1,68 \text{ kN}$$

Como podemos observar este cálculo ya es mucho más cercano a los valores que se han obtenido experimentalmente.

Seguramente si realizáramos los ensayos pertinentes para estimar el coeficiente de resistencia (K) y el exponente de endurecimiento por deformación (n) de nuestro material, podríamos hacer estimaciones más exhaustivas y obtener resultados analíticos que se ajustaran más a los experimentales.

Finalmente no podemos obviar tampoco que este es un proceso de extrusión lateral calculado a partir de expresiones y datos obtenidos para ensayos de extrusión directa. Al igual que ocurría con el plomo, una simulación por ordenador podría arrojar más luz sobre el comportamiento del flujo del material y reafirmarnos o descartar la hipótesis de la extrusión lateral como una variación de la extrusión directa.

6 CONCLUSIÓN

Si bien los ensayos con plomo han podido parecer desesperanzadores, el ensayo de la plastilina nos permite ser más optimistas respecto a nuestra hipótesis de que se puede estimar la extrusión lateral con la fórmula de Schey para la extrusión directa e indirecta.

Con tan sólo dos ensayos realizados no podemos aventurar ninguna conclusión al respecto de los resultados obtenidos. Si bien es verdad que se había estimado que podríamos extrudir plomo con 24,1 kN, también es cierto que debíamos haber caracterizado el material correctamente y que se debería de haber buscado el modo de que la probeta se encontrara a 270°C durante todo el proceso de extrusión.

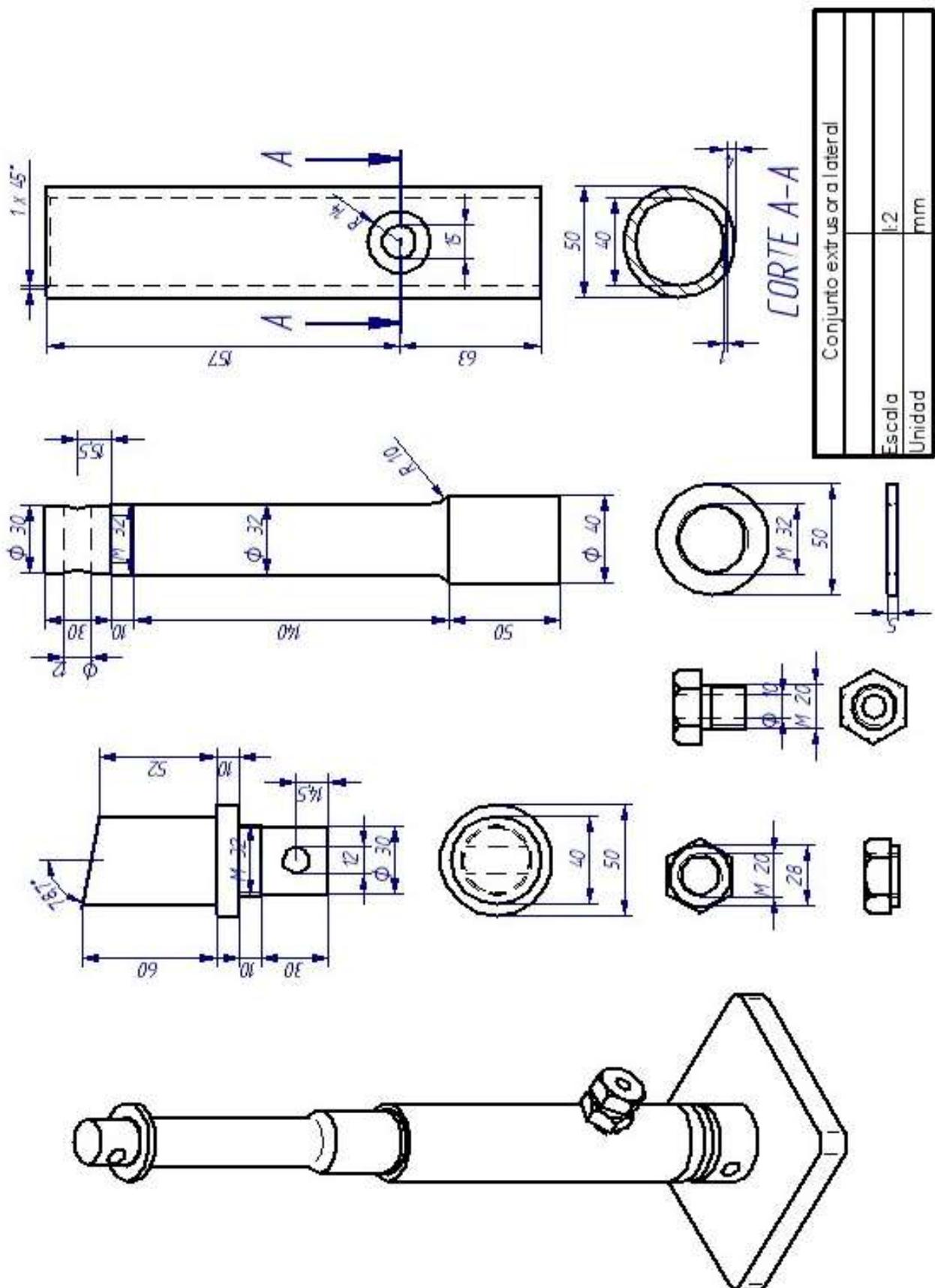
La temperatura como se ha venido repitiendo a lo largo de todo este trabajo es un factor primordial a la hora de estimar la presión de extrusión necesaria, por lo que debe garantizarse que se va a mantener a lo largo de todo el proceso de extrusión.

Como posible solución a esto último se ha planteado la posibilidad de rodear el contenedor con una resistencia térmica y luego meterlo en un cilindro aislante, para intentar de este modo mantener la temperatura del contenedor lo más alta posible. De esta manera trataríamos de realizar una repetición de nuestro ensayo para el plomo garantizando que se cumplen todas las condiciones que habíamos considerado al inicio.

De igual modo tanto para la plastilina como para el plomo, sería conveniente realizar ensayos de aplastamiento a distintas velocidades para determinar el coeficiente de resistencia y el exponente de endurecimiento por deformación exactos del material que se va a usar. Una vez con estos datos se procedería a repetir los ensayos de extrusión, a distintas velocidades y con matrices de extrusión de distintos diámetros, para tratar de ver en qué medida los resultados experimentales concuerdan con los analíticos.

Un único ensayo como hemos hecho nosotros no es determinante y no podemos arrojar ninguna conclusión al respecto ya que sería precipitado. Si bien en principio parece ser que la presión de extrusión calculada analíticamente es una estimación más o menos correcta de la presión de extrusión que se ha obtenido experimentalmente, tan sólo se ha realizado un único ensayo. Es necesario realizar más pruebas para eliminar el riesgo de la incertidumbre y poder llegar a conclusiones más exactas.

ANEXO I: PLANO DE LA EXTRUSORA LATERAL



BIBLIOGRAFÍA

- [1] Claude E. Pearson & Redvers N. Parkins. “*The extrusion of metals*”. Chapman & Hall LTD, 2nd edition, 1961.
- [2] Kalpakjian, S., Schmid, S.R. “*Manufactura. Ingeniería y Tecnología*”. Pearson Educación, 2002.
- [3] Groover, M.P. “*Fundamentos de Manufactura Moderna. Materiales, Procesos y Sistemas*”. Prentice Hall Iberoamericana, 1997.
- [4] Domingo Morales Palma, Francisco Javier Doblás Charneco, Gabriel Centeno Báez, Andrés Jesús Martínez Donaire y Carpóforo Vallellano Martín. “*Apuntes de clase de Tecnología de Fabricación*”. Sección de Publicaciones, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, 2012.
- [5] Domingo Morales Palma, Francisco Javier Doblás Charneco, Gabriel Centeno Báez, Andrés Jesús Martínez Donaire y Carpóforo Vallellano Martín. “*Cuestiones resueltas de Tecnología de Fabricación*”. Sección de Publicaciones, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, 2012.
- [6] Claude E. Pearson & J. A. Smythe. “*The influence of Pressure and Temperature on the Extrusion of Metals*”. Journal of the Institute of Metals, 1931.
- [7] W. Johnson. “*Partial Sideways Extrusion from a Smooth Container*”. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1957. Pergammon Press Ltd., London.
- [8] W. Johnson. “*Experiments in the Cold Extrusion of Rods of Non-Circular Section*”. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1958. Pergammon Press Ltd., London.
- [9] W. Johnson, P.B. Mellor and D.M Woo. “*Extrusion Through Single Hole Staggered and Unequal Multi-Hole Dies*”. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1958. Pergammon Press Ltd., London.
- [10] W. Johnson. “*Experiments in Plan-Strain Extrusion*”. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1956. Pergammon Press Ltd., London.
- [11] Diana María Garófalo Méndez y Mario Gonzalo Hidalgo León. “*Diseño y Construcción de Prototipo de Extrusión Directa para Producir Perfiles de Plomo Artesanal*”. Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador, 2011.
- [12] Alain Le Floc’H, Suzanne Jacomet et Pierre Montmitonnet. “*Simulation physique des procédés de mise en forme: théorie et pratique*”. Techniques de l’Ingénieur, traité Matériaux métalliques.
- [13] P.A. González, C. Luis-Pérez, Y. Garcés y J. Gil-Sevilla. “*ECAE, una tecnología de procesado emergente para producir propiedades relevantes en materiales metálicos*”. Revista de Metalurgia, Madrid 37, 2001.
- [14] J. Macheret, G. E. Korth, T. M. Lillo, A. D. Watkins and J. E. Flinn. “*Equal Channel Angular Extrusion Progress Report for March 1998–May 1999*”. Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, Idaho, 1999.
- [15] Juan Francisco Coronel Toro. “*Colección de tablas, gráficas y ecuaciones de Transmisión de Calor. Versión 3.2*”. Departamento de Ingeniería Energética y Mecánica de Fluidos, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, 2005