

Proyecto Final  
Ingeniería en Materiales

“Modelo teórico de extrusión de  
perfiles de aleación de aluminio 6063”



Autor: Juan Andrés Méndez

Directora: Dra. Silvia Simison

## INDICE

	<i>Página</i>
0. Resumen.....	1
1. Origen del proyecto.....	2
2. Objetivos.....	2
2.1 Objetivo general.....	2
2.2 Objetivos particulares.....	2
3. Introducción.....	2
3.1 La empresa.....	2
3.11 Aluar División Elaborados – Situación actual .....	4
3.2 El proceso de extrusión.....	5
3.2.1 Principios generales.....	5
3.2.1.1 Método de operación y desarrollo histórico.....	5
3.2.1.2 Estado mecánico de tensiones y trabajabilidad durante el proceso de extrusión.....	7
3.2.1.3 Flujo de material en extrusión.....	9
3.3 Procesos convencionales de extrusión.....	10
3.3.1 Extrusión directa.....	11
3.3.2 Método de lubricación en extrusión directa.....	13
3.4 Tecnología en extrusión de aluminio y sus aleaciones.....	14
3.4.1 Aleaciones y productos extrudidos.....	14
3.4.2 Extrudabilidad en la aleación 6063.....	16
3.5 Balance térmico y cambios de temperatura en extrusión....	17
3.5.1 Perfil de temperatura en el tocho.....	18
3.5.2 Balance térmico.....	18
3.5.3 Cálculo de la temperatura de salida a partir del trabajo de deformación.....	19
3.6 Velocidad de extrusión.....	21
3.7 Requerimientos de carga y energía .....	24
3.7.1 Estudio de los métodos de cálculo.....	24
3.7.2 Análisis elemental.....	25
3.7.3 Cálculo del trabajo de deformación y de la carga de extrusión.....	27

4. Desarrollo.....	28
4.1 Selección del modelo.....	29
4.1.1 Cálculo de la temperatura de salida.....	29
4.1.2 Cálculo de la presión máxima requerida.....	31
4.1.3 Cálculo de la velocidad de salida máxima.....	32
4.2 Ajuste del modelo.....	33
4.3 Valores calculados por el modelo.....	44
5. Conclusiones.....	50
6. Trabajos futuros.....	51
7. Nomenclatura.....	53
8. Bibliografía.....	54
9. Anexo.....	55

## 0. Resumen

Este proyecto plantea los fundamentos y un primer desarrollo de un modelo teórico de correlación de parámetros de prensado para la extrusión de perfiles de aluminio de la aleación 6063 ajustado experimentalmente. El siguiente texto describe las actividades desarrolladas por el autor durante una pasantía de verano realizada en Aluar Aluminio Argentino División Elaborados.

Las actividades se dividen en tres etapas principales:

- Selección y desarrollo de un modelo teórico propio a partir de ecuaciones extraídas de literatura <sup>[2,3, 4, 5]</sup>.
- Ajuste de las constantes experimentales con las condiciones actuales de proceso.
- Cálculo de nuevas condiciones de proceso utilizando el modelo propio desarrollado.

## **1. Origen del proyecto**

Este proyecto surgió como objetivo en una pasantía de verano desarrollada por el autor en la empresa ALUAR Aluminio Argentino S.A. División Elaborados durante los meses de enero a marzo de 2007, avanzando en los meses posteriores debido a la complejidad del mismo.

## **2. Objetivos**

### *2.1. Objetivo General*

- Correlacionar los parámetros de prensado y desarrollar un modelo teórico representativo.

### *2.2. Objetivos particulares*

- Interpretar la correlación entre los parámetros de prensado.
- Realizar un ajuste experimental del modelo, según el relevamiento realizado en planta.
- Definir condiciones futuras de procesamiento a fin de aumentar la productividad.

## **3. Introducción**

### *3.1. La empresa*

Desde su creación en 1970, Aluar ha expandido sus actividades hasta lograr un elevado grado de integración vertical en la cadena de producción y comercialización del aluminio.

Los fundamentos rectores de tal integración fueron la búsqueda de actividades y productos con una mayor cuota de valor agregado al aluminio primario y de un incremento de la competitividad de Aluar. Por esas razones, incursionaron en actividades tanto aguas abajo (productos extruídos y laminados en la División Elaborados) como aguas arriba (producción y transporte de energía eléctrica, insumo básico del sector) con respecto a la producción de aluminio primario.



La División Elaborados representa el último eslabón en la cadena productiva que posibilita que el aluminio puro sea utilizado en las numerosas aplicaciones.

A través de la fabricación de perfiles, barras, tubos, laminados gruesos y foil (papel de aluminio) Aluar División Elaborados provee a las empresas materiales de alto valor agregado. Los mismos son fabricados en su planta situada en la localidad de Abasto, provincia de Buenos Aires. La capacidad de producción del total de la gama de productos alcanza las 35000 toneladas anuales.



### 3.1.1. Aluar División Elaborados - Situación actual

La empresa consta de dos unidades de negocios independientes: la unidad de negocios de laminación y la de extrusión. La primera produce dos productos, chapas y foil y la segunda una gran variedad de perfiles estructurales, entre otros.

El área productiva de la empresa está formada por dos gerencias principales. La gerencia de producción y la gerencia de procesos. La gerencia de procesos se conforma por un gerente de procesos, que abarca ambas unidades de negocio, y 3 ingenieros de procesos, dos para la unidad de negocios de laminación y uno para la de extrusión. Este proyecto, se desarrollo en el área de procesos de extrusión junto al ingeniero de esa área.

Debido a la gran demanda sobre la única persona dedicada a procesos de extrusión, el desarrollo del mismo estaba postergado. La propuesta del ingeniero de realizarlo durante la pasantía resultó desafiante y a la vez ambiciosa para el plazo de duración de ésta. De todos modos, se inició el mismo con la idea de avanzar lo máximo posible y por menos que sea, un desarrollo futuro contaba con el punto de partida. Con esto, se procedió al desarrollo del modelo, partiendo desde cero.

La unidad de negocios de extrusión comercializa una gran variedad de perfiles de aluminio de la familia 6XXX, denominación asignada por la Aluminium Association a las aleaciones de aluminio compuestas por Mg y Si como aleantes principales <sup>[1]</sup>.

Este modelo es aplicable a la aleación de aluminio 6063, su rango de composición se muestra en la tabla 1.

<i>Aleación</i>	<i>% Mg</i>	<i>% Si</i>	<i>%Fe</i>
6063 <sup>[1]</sup>	0,45 - 0,9	0,2 - 0,6	Max 0,35

**Tabla 1. Rango de composición de la aleación de aluminio de interés<sup>[1]</sup>.**

Cada perfil tiene asignada por el área de procesos una prensa determinada como estándar para la extrusión con esa matriz. A su vez, para cada perfil, se poseen varias matrices (copias) debido a la necesidad de recambio por el desgaste que sufren las mismas con el uso. Cada copia tiene un diseño similar, por lo que no debería haber grandes variaciones de las condiciones de proceso necesarias. Esto se sabe que no es así, pero se apunta a que la respuesta del modelo no se encuentre afectada por las pequeñas diferencias que se puedan presentar entre las copias.

### *3.2. El proceso de Extrusión*

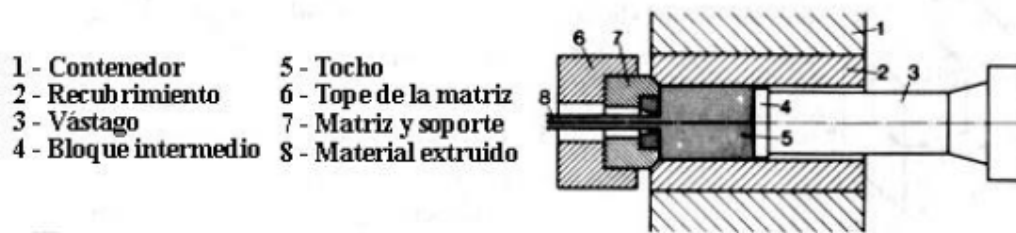
#### 3.2.1. Principios Generales:

##### 3.2.1.1. Método de operación y desarrollo histórico

En el caso de los materiales metálicos, la extrusión es un proceso de deformación utilizado para producir productos semi - terminados elongados tales como barras, secciones huecas y sólidas, tubos, alambres, etc. El principio es muy simple: bajo una carga elevada, un cilindro (tocho) del material es prensado en un recipiente cerrado a través de una matriz causando una reducción del área transversal. Pueden extrudirse áreas transversales de



variada complejidad, dependiendo del material y de la matriz usada. Este proceso se puede llevar a cabo a temperatura ambiente o a altas temperaturas, dependiendo de la aleación. La figura 1 muestra los componentes de la prensa, la matriz y el material. La carga de extrusión es transmitida a través de un pistón impulsado mecánicamente o hidráulicamente. El recipiente es construido de varios cilindros de diferente espesor resistentes al desgaste.



**Figura 1. Diagrama esquemático del proceso de extrusión**

La prensa para extrusión hidráulica fue inventada en 1810 por el Inglés S. Bramah, la cual fue diseñada para extrusión de plomo. El principio básico es todavía utilizado hoy en día en la manufactura de tubos de este material. El proceso fue aplicado para aleaciones de alto punto de fusión por el alemán A. Dick, en la década de 1890. Dick propuso independizar la cabeza del pistón (bloque intermedio) del cuerpo del mismo (vástago) permitiendo descartarlo cuando el desgaste impida su correcto funcionamiento. Este fue el primer invento decisivo que condujo a la extrusión de otros metales. Desarrollos posteriores del proceso hasta el presente estuvieron íntimamente relacionados con los avances en la construcción mecánica de instalaciones de prensas, el perfeccionamiento de las herramientas y el desarrollo de aceros para trabajado en caliente.

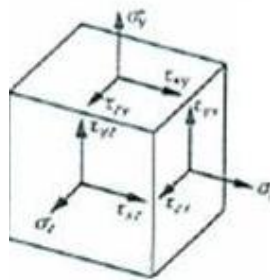
Existen cuatro diferencias características entre los diferentes métodos de extrusión y las prensas usadas:

- a) El movimiento del producto extrudido relativo al pistón: extrusión directa o inversa.

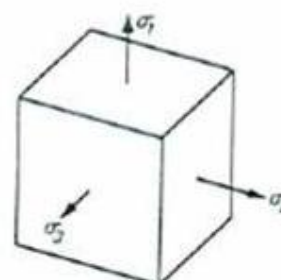
- b) Posición del eje de la prensa: prensas verticales u horizontales.
- c) Tipo de accionamiento: prensas hidráulicas (agua o aceite) o mecánicas.
- d) Modo de aplicación de la carga: extrusión convencional o hidrostática.

### 3.2.1.2 Estado tensional y trabajabilidad durante el proceso de extrusión

El proceso de extrusión es catalogado bajo la denominación “deformación en compresión” en la clasificación de procesos de deformación según normas DIN 8582 y 8583. La deformación puede definirse conociendo las tensiones actuantes referidas a un sistema de ejes coordenados. Las componentes de tensiones en las tres direcciones se denominan como: una tensión normal  $\sigma$  y dos tensiones de corte  $\tau$  perpendiculares a la anterior (Figura 2.a). Si, como es usual, las coordenadas son paralelas a las direcciones de máximas tensiones normales, el sistema de tensiones puede ser representado por las tres tensiones normales  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$  – conocido como tensiones principales debido a que las tensiones de corte son cero (Figura 2.b). En este sistema las tensiones de tracción son positivas y las compresivas negativas.



**2. a- Tensiones normales ( $\sigma$ ) y tensiones de corte ( $\tau$ ) en un sistema coordenado aleatoriamente orientado**



**2. b- Tensiones principales en el sistema de ejes coordenados paralelo a las direcciones principales.**

**Figura 2. Representación de las tensiones en un sistema de ejes coordenados**

De acuerdo al criterio de fluencia de Tresca, el flujo plástico – el comienzo de la deformación plástica – ocurre cuando la diferencia entre las tensiones principales máxima y mínima ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ) alcanza cierto valor (gradiente de tensiones):

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_y$$

Donde  $\sigma_y$  es la tensión de fluencia, una propiedad muy importante en la tecnología de deformación.

El criterio de fluencia de Tresca enuncia que el flujo plástico, puede ser iniciado por tensiones compresivas como de tracción, mientras el gradiente de tensiones alcance el valor  $\sigma_y$ . Sin embargo, una importante característica de este proceso es que las tensiones principales son todas compresivas, en contraste con la mayoría de los otros procesos de deformación. La tensión axial  $\sigma_3$  tiene el mayor valor. Las tensiones radiales y tangenciales  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  tienen aproximadamente el mismo valor en un tocho cilíndrico pero son menores a  $\sigma_3$ .

Puesto que las tres tensiones principales son negativas (compresivas), luego:

$$\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3 \text{ y } \sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_y$$

Ignorando la fricción entre el tocho y el recipiente. Por lo tanto, la tensión longitudinal es dada por:

$$-\sigma_3 = \sigma_y - \sigma_1$$

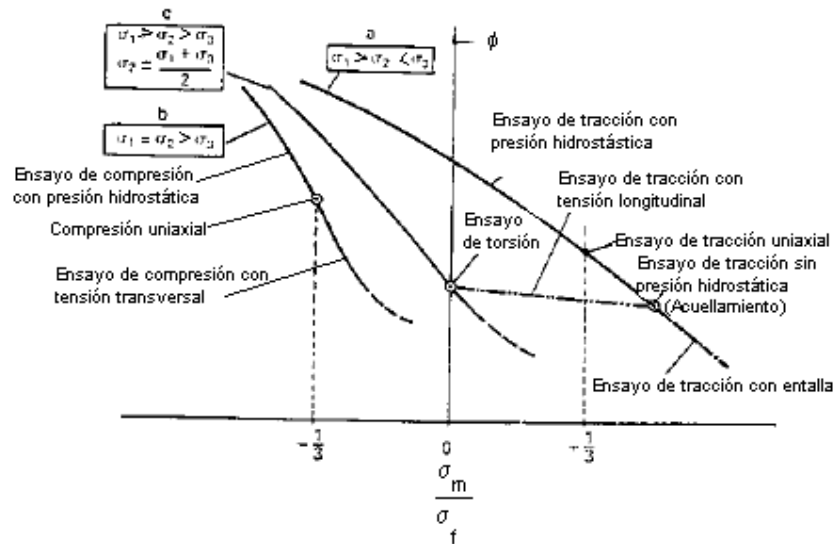
Si, por ejemplo, la tensión de fluencia del material a extrudir es 100 MPa y  $\sigma_1$  es supuesta como el 50 % de  $\sigma_3$ , luego la tensión axial en el pistón (despreciando la fricción) es dada por:

$$-\sigma_3 = \sigma_y - 0.5 \sigma_3; -\sigma_3 = \sigma_y / 0.5 = 2 \sigma_y = 200 \text{ MPa.}$$

Este ejemplo muestra como la carga en el pistón es significativamente mayor que la tensión de fluencia, aún sin tener en cuenta la fricción. La ventaja

de la deformación plástica bajo un estado de compresión multiaxial en extrusión es la gran deformación que puede obtenerse. Aunque la tensión de fluencia de acuerdo con el criterio de Tresca es independiente del estado de tensiones, la trabajabilidad  $\phi$  (deformación hasta la fractura) aumenta al aumentar la presión media  $\sigma_m$  :

$$\sigma_m = 1/3 (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$



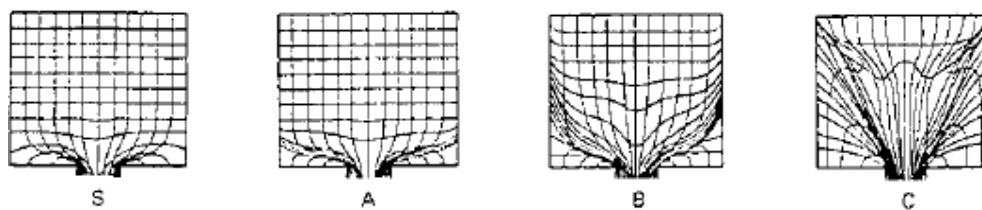
**Figura 3. Efecto del tipo de tensiones aplicadas sobre la trabajabilidad ( $\phi$ ) en función de la tensión media relativa ( $\sigma_m / \sigma_f$ ) [3].**

Como se observa en la figura 3, el estado de tensiones compresivas indica una gran capacidad de deformación, a diferencia con otros estados tensionales.

### 3.2.1.3. Flujo de material en extrusión

La extrusión es usualmente un proceso discontinuo - el segundo tocho no es cargado hasta que el primero no fue extrudido completamente-. Se produce un flujo no estacionario causado por las variaciones de temperatura en el tocho y la longitud limitada del mismo, así como por la fricción entre el recipiente y el tocho y entre el bloque intermedio con el tocho. Esto conduce a

un flujo no uniforme desde el centro del tocho hacia las capas más externas del mismo que resulta en un cambio en la carga de extrusión en todo el ciclo, variaciones en las propiedades del material a través del área transversal y a lo largo del producto extrudido, y la posibilidad de aparición de defectos. Se han llevado a cabo numerosas investigaciones del flujo de material en el recipiente para estudiar y controlar estos efectos indeseables. Existen muchos métodos para analizar este comportamiento. Uno de ellos es conocido como el método de la grilla, que consiste en realizar un corte longitudinal al tocho, marcando la superficie libre generada con una grilla y luego es extrudido parcialmente. La deformación resultante de la grilla indica el sentido de las líneas de flujo. Las diferencias son función de la intensidad de la fricción entre el tocho y la pared interna del recipiente. En orden decreciente de uniformidad de flujo, se observan 4 tipos de típicos (Figura 4) denominados arbitrariamente como S, A, B y C <sup>[3]</sup>.



**Figura 4. Diagrama esquemático de cuatro tipos de flujo típicos <sup>[3]</sup>**

### 3.3. *Procesos convencionales de extrusión*

Las diferentes características de flujo de las diferentes aleaciones extrudidas y la relación compleja entre los parámetros de extrusión y el patrón de flujo en el recipiente indican que es imposible usar el mismo método para todos los materiales. Generalmente se utilizan métodos diferentes de acuerdo con el comportamiento de la aleación en cuestión, para obtener la relación óptima entre productividad y calidad. Existen dos métodos básicos:

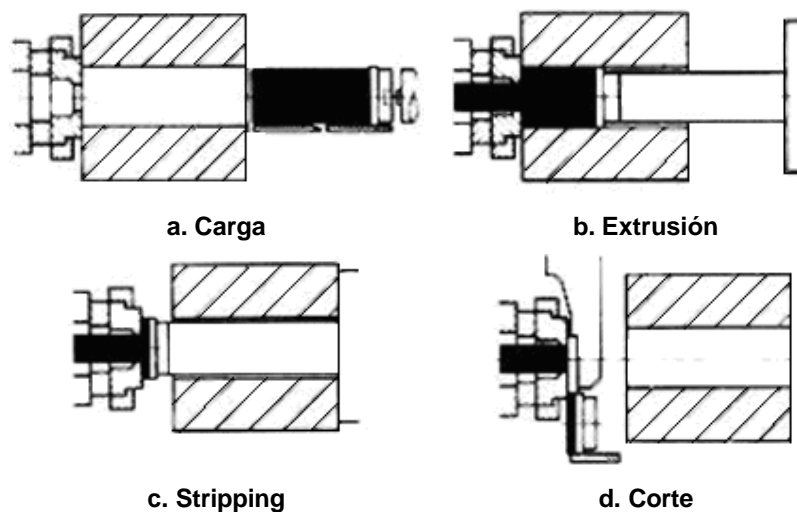
- a. Extrusión directa
- b. Extrusión inversa

El método utilizado en Aluar es el de extrusión directa que se describe a continuación:

### 3.3.1. Extrusión Directa

El método de uso mas generalizado en extrusión de materiales metálicos es el proceso directo, el cual se describe en cinco pasos:

- a. Carga del tocho y el pistón a la prensa
- b. Extrusión del tocho
- c. Descompresión de la prensa y apertura del recipiente para retirar el descarte (stripping).
- d. Corte del descarte
- e. Retorno de la cortadora, el recipiente y el pistón a la posición de carga.



**Figura 3. Pasos del proceso de extrusión**

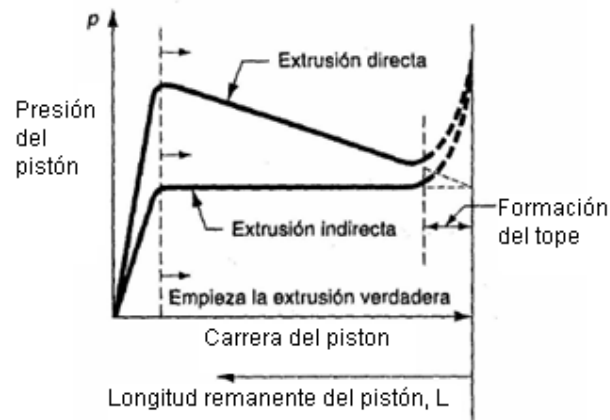
La superficie del tocho se desliza a lo largo de la pared del recipiente y la facilidad con la que esto se lleva a cabo, depende de la aleación y de la

lubricación. En todos los casos, parte de la carga de extrusión es consumida en fricción entre el tocho y el recipiente – lo que depende de la longitud remanente del tocho en el recipiente -, o en deformación por corte debido al movimiento relativo de las capas de material más interno y las de material periférico (adyacente a la pared) que se mueve más lentamente.

La presión del pistón aumenta muy rápidamente a medida que el tocho comienza a llenar el recipiente. En ese momento, la presión aumenta abruptamente hasta el valor necesario para que el producto comience a ser extrudido (presión de ruptura). Se desarrolla una zona de deformación con forma de cono frente a la apertura de la matriz, donde se presenta la mayor velocidad de deformación.

Luego de la máxima carga, la presión de extrusión cae hasta un mínimo a medida que la longitud del tocho disminuye y luego aumenta rápidamente nuevamente (Figura 5). Este aumento de presión se debe a que sólo queda un disco del tocho y el metal debe fluir radialmente hacia la apertura de la matriz.

La resistencia a la deformación aumenta considerablemente con la disminución del espesor.



**Figura 5. Evolución de la presión del pistón durante un ciclo de extrusión.**

### 3.3.2. Métodos de lubricación en Extrusión directa

El proceso de extrusión directa se puede llevar a cabo con o sin lubricación, y en el segundo de los casos, con o sin “cáscara”. Si el material posee tendencia a pegarse en las paredes del molde, se produce flujo no uniforme; primero fluye hacia la matriz la región central del tocho mientras que la región periférica lo hace recién al final del proceso. Por este motivo, a fin de evitar que la capa externa del tocho, que usualmente presenta superficies rugosas de colada, óxidos e impurezas, salga con el producto extrudido, existe el método de la “cáscara”, que consiste en que el diámetro del bloque intermedio sea de 1,5 a 2 mm menor que el diámetro del recipiente dejando la capa externa del tocho dentro del mismo como descarte.

Es posible que el flujo no homogéneo del metal dentro del recipiente, provoque que el lubricante ingrese dentro del producto extrudido perjudicando la calidad del mismo (por ejemplo afectando la terminación superficial). Por lo tanto, debe intentar evitarse la lubricación en materiales que presenten flujo inhomogeneo (tipo b o c). Sin embargo, muchos de estos materiales son muy difíciles de extrudir en el rango de temperaturas tecnológicamente factibles. En estos casos, se utiliza lubricación y diseño de moldes cónicos a fin de homogeneizar el flujo de material. La lubricación es necesaria en los siguientes casos:

- a) Extrusión en frío a temperaturas relativamente bajas (menos de 300°C).
- b) Extrusión de aleaciones difíciles de extrudir – por ejemplo aleaciones de cobre en el rango de temperatura medio (600 a 1000 °C) –.
- c) Extrusión de aleaciones difíciles de extrudir – por ejemplo, aleaciones de níquel, aceros, etc. – por encima de 1000°C.

En el caso de las aleaciones de aluminio, es común la extrusión sin lubricación y sin una “cáscara”.



### 3.4. Tecnología en Extrusión de Aluminio y sus aleaciones

#### 3.4.1. Aleaciones y productos extrudidos

Todas las aleaciones de aluminio comercialmente disponibles pueden ser extrudidas. Las más utilizadas para extrusión están estandarizadas de acuerdo a un grupo de productos:

- DIN 1746: Tubos de aluminio
- DIN 1747: Alambres y tubos de aluminio
- DIN 1748: Secciones extrudidas de aluminio

Estos estándares abarcan un amplio rango de aleaciones, aunque sólo algunas se utilizan en volúmenes importantes. La construcción, la industria automotriz y aplicaciones de componentes pequeños son las principales áreas de aplicación. Las siguientes aleaciones (tabla 2) son las más significativas para los diferentes grupos de productos según nomenclatura de Aluminium Association<sup>[1]</sup>:

- Tubos: 6060, 5754, 2024, 3103, 1050
- Barras: 2030, 6060, 5754, 6262.
- Alambres: 1050 (conductores eléctricos), otros similares a las barras.
- Secciones: 6063, 6060, 7011.

Grade designation			Composición (% peso)												
Aluminium Association	UNS N°	ISO R209 N°	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	V	Specified other elements	Ti	Unspecified other elements	Al, min
1050	A91050	Al99.5	0,25	0,40	0,05	0,05	0,05			0,05	0,05		0,03	0,03	99,5
2024	A92024	AlCu4Mg	0,50	0,50	3,8-4,9	0,30-0,9	1,2-1,8	0,10		0,25			0,15	0,05	0,15
2017	A92017	AlCu4MgSi	0,20-0,8	0,7	3,5-4,5	0,4-1	0,4-0,8	0,1		0,25			0,15	0,05	0,15
2030		AlCu4PbMg	0,8	0,7	3,3-4,5	0,2-1	0,5-1,5	0,1		0,50		0,20Bi; 0,8-1,5 Pb	0,20	0,10	0,30
5754	A95754	AlMg3	0,40	0,40	0,10	0,50	2,6-3,6	0,30		0,20		0,10-0,6 (Mn +Cr)	0,15	0,05	0,15
3103		AlMn	0,50	0,7	0,10	0,9-1,5	0,3	0,1		0,20		0,10 Zr + Ti		0,05	0,15
6082		AlSi1MgMn	0,7-1,3	0,5	0,10	0,40-0,10	0,6-1,2	0,25		0,20			0,10	0,05	0,15
6060	A96060	AlMgSi	0,30-0,6	0,10 - 0,30	0,10	0,10	0,35-0,6	0,05		0,15			0,10	0,05	0,15
6063	A96063	AlMg 0,5Si	0,20-0,6	0,35	0,10	0,10	0,45-0,9	0,10		0,10			0,10	0,05	0,15
6262	A96262	AlMgSiPb	0,4-0,8	0,7	0,15-0,40	0,15	0,8-1,2	0,04-0,14		0,25			0,15	0,05	0,15
7010		AlZn6MgCu	0,12	0,15	1,5-2	0,10	2,1-2,6	0,05	0,05	5,7-6,7		0,10-0,16 Zr	0,06	0,05	0,15
7011	A97011	AlMgZn	0,15	0,20	0,05	0,10-0,30	1-1,6	0,05-0,20		4-5,5			0,05	0,05	0,15

**Tabla 2. Rangos de composiciones según Aluminium Association<sup>[1]</sup>.**

A diferencia de las aleaciones de aluminio para laminado, que usualmente son trabajadas en frío por requerimientos de propiedades mecánicas, las aleaciones envejecibles de la familia 6060, 2024, 7011 y 7010 son las más utilizadas en extrusión, especialmente para secciones de geometrías complejas que no pueden ser acabadas en frío.

Algunas formas menos complejas, como tubos, barras o alambres, pueden ser trabajadas en frío si se requiere alta tolerancia dimensional.

Hay, por lo tanto, dos procedimientos diferentes de extrusión, dependiendo del material y el producto:

- *Aleaciones no envejecibles:* la temperatura de salida y el enfriamiento no son críticas para las propiedades mecánicas.
- *Aleaciones envejecibles:* Con el objeto de obtener un producto extrudido homogeneizado, donde el envejecido resulte efectivo, el templado desde la temperatura de extrusión (temperatura de solidus) necesita un control de la velocidad de enfriamiento y de la

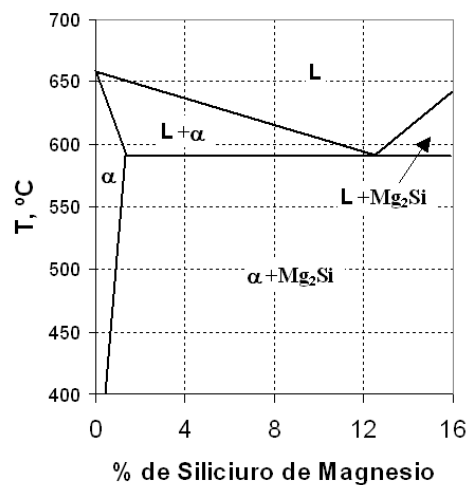
temperatura. De todos modos, si se planifica realizar un tratamiento térmico de homogeneizado entre la extrusión y el envejecimiento, estas variables dejan de requerir tal atención.

### 3.4.2. Extrudabilidad en la aleación 6063

La materia prima para la extrusión, son tochos cilíndricos. Los diámetros de los mismos son dados por los diámetros de recipientes más comunes, en un estándar propuesto por diferentes productores de extrudidos. El rango de los diámetros de tocho oscila entre 74 y 694 mm para capacidades de prensas entre 5 y 125 MN.

Previo a la extrusión, los tochos colados son generalmente homogeneizados debido a que el producto de colada presenta baja calidad y baja trabajabilidad. Esto se debe a:

- Segregación en los bordes de grano de compuestos eutécticos de bajo punto de fusión y/o compuestos intermetálicos frágiles que reducen la trabajabilidad del metal (figura 6).



**Figura 6. Diagrama pseudobinario Al-Mg<sub>2</sub>Si**

- Precipitados de Mg<sub>2</sub>Si durante el enfriamiento luego de la colada que reduce la capacidad de endurecimiento de la sección extrudida.

- Diferencias de concentración de los aleantes, que producen no uniformidad de propiedades superficiales en tratamientos posteriores.

Estos efectos pueden ser parcial o completamente eliminados por el tratamiento de homogeneizado. Sin embargo, el propósito de este tratamiento térmico varía de acuerdo a los requerimientos económicos y de calidad y pueden involucrar disolución o distribución homogénea de los aleantes. En el caso de los materiales endurecibles por precipitación, en particular la aleación 6063 (de interés en este proyecto), resulta necesario un enfriamiento rápido desde la temperatura de homogeneizado a fin de evitar la precipitación de la fase secundaria ( $Mg_2Si$ ).

### *3.5. Balance térmico y cambios de temperatura en extrusión*

La temperatura es uno de los parámetros más importantes en extrusión. La tensión de fluencia disminuye si la temperatura aumenta y la deformación es, por lo tanto, más sencilla pero, al mismo tiempo, se reduce la velocidad de extrusión máxima, debido a que se presentan picos de temperatura que pueden conducir a la fusión de eutécticos y/o heterogeneidades de menor punto de fusión, y a una superficie desgarrada. Los cambios de temperatura durante el proceso de extrusión dependen de la temperatura del tocho, la transferencia de calor del tocho al recipiente, y del calor generado por deformación y fricción.

#### 3.5.1. Perfil de temperatura en el tocho

Durante el calentamiento por inducción, el calor es conducido desde la superficie del tocho; la profundidad de penetración depende de la frecuencia usada, y también de la permeabilidad y la conductividad eléctrica de la aleación. A una frecuencia de 50 Hz, la penetración para el cobre es de alrededor de 15 mm, para el bronce 22mm y para el aluminio 18mm, aproximadamente. El calentamiento por horno eléctrico de inducción permite una temperatura uniforme en todo el tocho y, bajo condiciones de operación normales existe una diferencia de temperaturas de 3 a 4 % entre la temperatura del centro y la superficie al dejar el horno generado por el contacto con el aire del ambiente durante la carga. La variación de temperatura longitudinal del tocho es usualmente menor que el 3%.

En los hornos a gas, la uniformidad del calor depende del tipo de horno y la transferencia de calor. El calor no es generado internamente como en el caso anterior. Sino que es transferido a la superficie del tocho por radiación y convección. Esto puede generar grandes diferencias de temperatura si la ubicación del tocho y el modo de transferencia de calor no son cuidadosamente controlados. Sin embargo, en los hornos más modernos la distribución de los mecheros permite obtener un perfil uniforme de temperaturas como el obtenido por inducción. El ciclo de calentamiento dura entre 15 y 20 minutos.

### 3.5.2. Balance térmico

Tan pronto como el tocho es cargado en el recipiente precalentado y comienza la extrusión se inician cambios térmicos muy complejos. Éstos tienen origen en los siguientes procesos:

- a) Producción de calor por la deformación llevada a cabo en la zona de entrada de la matriz.
- b) Producción de calor por fricción entre el tocho y el recipiente y por corte en la zona de “metal muerto”, que es la zona donde el metal no fluye hasta que la mayoría del material ha sido extrudido. Se ubica en las esquinas del recipiente más cercanas a la matriz.

- c) Transferencia de calor a medida que el tocho se mueve hacia la matriz.
- d) Conducción de calor a través del herramental (recipiente, matriz, pistón)
- e) Conducción de calor al tocho.
- f) Conducción de calor al producto.
- g) Producción de calor por fricción a través de la matriz.

La temperatura decisiva en extrusión es la temperatura de salida del producto extrudido, la cual depende de todos los factores mencionados anteriormente. Esta temperatura aumenta si el calor producido por deformación y fricción excede las pérdidas de calor, y disminuye en caso contrario. La conducción de calor requiere un tiempo definido y, por lo tanto, dependiendo de la aleación y las condiciones de extrusión, la producción de calor predomina por encima de una dada velocidad del pistón. Esto explica la dependencia del perfil de temperaturas a lo largo del proceso con la velocidad del pistón. En los casos extremos, ocurre extrusión adiabática: no se pierde ningún calor generado y todo es retenido en el material deformado, resultando en un aumento de temperatura. Si se desea mantener el proceso bajo control (temperatura de salida constante), deben conocerse las leyes naturales que gobiernan el balance de calor. Así, se han desarrollado varios modelos para calcular las cantidades de calor involucradas y el balance térmico antes mencionado.

### 3.5.3. Cálculo de la temperatura de salida a partir del trabajo de deformación

Como primera aproximación puede realizarse una estimación muy simple de los cambios de temperatura durante la extrusión usando las ecuaciones de aproximación de Stuwe <sup>[2]</sup>. Éste supone que el aumento en la temperatura del producto se debe a tres componentes:

- a) Aumento de temperatura causado por el trabajo de deformación que casi en su totalidad es convertido en calor:

$$\Delta T_1 \approx \frac{\sigma_f \cdot \varphi}{\rho \cdot C_p} \quad (1)$$

Siendo  $\sigma_f$  = tensión de fluencia del material,

$\varphi = \ln \left( \frac{A_0}{A_1} \right)$  logaritmo natural de la relación de extrusión.

$\rho$  = densidad (kg/m<sup>3</sup>)

$C_p$  = Capacidad calorífica (J / Kg. °K)

b) Aumento de temperatura en la superficie del tocho causada por la fricción con la pared del recipiente, teniendo en cuenta el balance de temperatura con la superficie del tocho y asumiendo deformación adiabática:

$$\Delta T_2 \approx \frac{\sigma_f \cdot \varphi}{4 \cdot \rho \cdot C_p} \sqrt{\frac{v_a \cdot L_0}{a \cdot R}} \quad (2)$$

Siendo  $V_a$  = velocidad de salida del perfil (m/min.)

$L_0$  = longitud del tocho expandido (m)

$a$  = difusividad térmica (m<sup>2</sup>/min)

$R = A_0/A_1$  = relación de extrusión.

c) Aumento de temperatura en la superficie del producto extrudido causado por la fricción en el plano de la matriz. Se llama plano de la matriz a la superficie perteneciente al interior de la matriz que se encuentra en contacto con el producto durante la extrusión. La longitud del plano de la matriz se refiere a la distancia en la dirección de extrusión de este plano.

$$\Delta T_3 \approx \frac{\sigma_f \cdot \phi}{4 \cdot \rho \cdot C_p} \sqrt{\frac{v_a \cdot s}{a}} \quad (4)$$

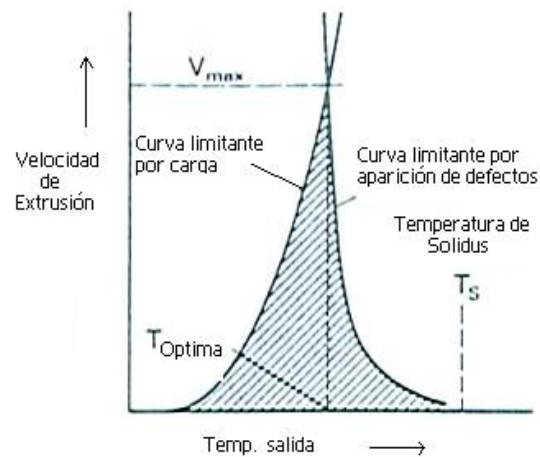
s= longitud del plano de la matriz (m)

### 3.6. Velocidad de extrusión

La carga de extrusión es función de la tensión de fluencia de la aleación. El fundamento del trabajado en caliente es que la deformación es llevada a cabo a elevadas temperaturas a fin de reducir la tensión de fluencia a un valor que permita altas deformaciones tecnológica y económicamente factibles. Sin embargo, si la temperatura de salida resultante de la temperatura inicial del tocho y de la velocidad de extrusión es cercana a la temperatura de solidus, debido a calentamiento localizado algunas zonas del material pueden pasar a estado líquido y entonces producir el desgarro o agrietamiento de la superficie del mismo, obteniéndose así un producto de calidad inaceptable. Un diagrama de la máxima velocidad de extrusión en función de la temperatura de salida da dos curvas limitantes (Figura 8). Una representa la carga de extrusión limitante, por encima de la cual la deformación es imposible, y la otra el límite metalúrgico, donde la aleación comienza a desgarrar (fusión localizada).

El área entre las dos curvas da todos los parámetros de trabajo posibles para la extrusión de la aleación y, en particular, provee de la información acerca de la velocidad de extrusión máxima posible y su correspondiente temperatura de salida. Cabe aclarar que estas condiciones óptimas se refieren solamente a la velocidad de extrusión y no a las propiedades físico-metalúrgicas del producto.

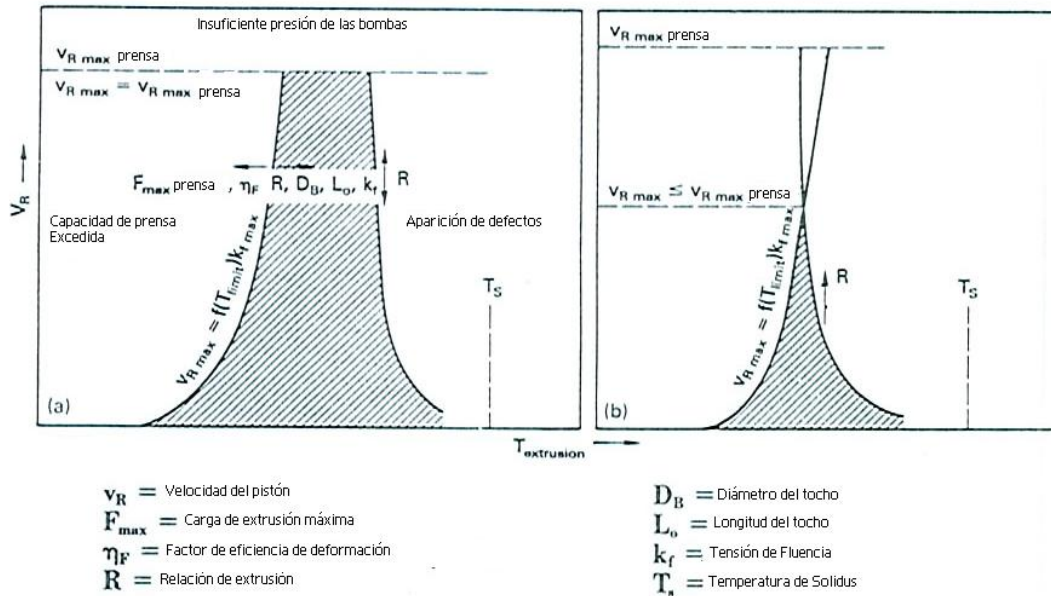




**Figura 8. Diagrama limitante general.**

Existen dos tipos de diagramas de trabajo básicos (Figura 9). El primero presenta un amplio rango de operación, el cual resulta típico para aleaciones fáciles de extrudir, incluidas 1050, 6063, Aleaciones de cobre y Latones (Figura 9.a). El segundo es encontrado con las aleaciones difíciles de extrudir y muestra un rango de trabajo estrecho debajo de la máxima velocidad de la prensa (Figura 9.b). En ambos casos la curva limitada a partir de la carga de extrusión es favorablemente desplazada hacia la izquierda a medida que aumenta la capacidad de la prensa o mejora la eficiencia de la deformación.

Por otro lado, el rango de trabajo se estrecha si la sección requiere mayor carga, por el aumento de la relación de extrusión, el diámetro del tocho, la longitud del tocho o la tensión de fluencia, entre otros. Estos parámetros deben modificarse para aumentar la velocidad de extrusión. Para esto pueden utilizarse algunos métodos metalúrgicos, incluidos el tratamiento térmico de la aleación para disminuir la tensión de fluencia.



**Figura 9. Diferentes tipos de comportamientos mostrados en un diagrama limitante**

Una optimización sistemática de los parámetros de extrusión se puede simplificar si se conoce la ubicación y la magnitud del rango de trabajo, es decir la forma del diagrama limitante- Estas pueden describirse matemáticamente y de la intersección obtener una solución. Esta solución puede ser usada para estudiar las influencias de los diferentes parámetros de las prensas sobre la velocidad de extrusión máxima. Los diagramas limitantes pueden determinarse usando resultados experimentales obtenidos para aleaciones de aluminio, y esto puede representarse adecuadamente por una función exponencial:

$$V_{RA} = a^* \cdot e^{-b \cdot T^2} \quad (5)$$

$V_{RA}$  = velocidad del pistón (Subíndice A significa Aleación).

Donde  $a^*$  y  $b^*$  son constantes experimentales, y  $T$  la temperatura de salida referida a una temperatura de referencia.

La curva de carga de extrusión es obtenida a partir de teorías elementales, como se verá más adelante, y la máxima velocidad posible del pistón para una dada capacidad de prensa es dada como una función del material y los parámetros de extrusión por:

$$V_{RP} = \left[ \frac{F_{MAX}}{k_{f0} \cdot \left(\frac{6\phi}{D_0}\right)^{m^*} \cdot e^{-d^* \cdot T^2} \left( A_0 \cdot \phi \cdot \frac{1}{\eta_f} + \pi \cdot D_0 \cdot L_0 \cdot \mu_F \right)} \right]^{\frac{1}{m^*}} \quad (6)$$

$V_{RP}$  = Velocidad del pistón (subíndice P significa carga)

Esta ecuación describe la dependencia de la velocidad de extrusión alcanzable sobre todos los factores que influyen la carga. El punto de intersección de la curva limitante por carga y la curva limitante a partir de la aparición de defectos nos da la máxima velocidad de extrusión, igualando  $V_{RP}$  y  $V_{RA}$ :

$$V_{RMAX} = \left[ \frac{F_{MAX} \cdot a^{*f^*}}{k_{f0} \cdot \left(\frac{6\phi}{D_0}\right)^{m^*} \cdot \left( A_0 \cdot \phi \cdot \frac{1}{\eta_f} + \pi \cdot D_0 \cdot L_0 \cdot \mu_F \right)} \right]^{\frac{1}{m^* + f^*}} \quad (7)$$

La máxima velocidad de extrusión se define totalmente cuando están especificados los parámetros de extrusión y se conocen las constantes. Luego de que las constantes han sido obtenidas experimentalmente a partir de datos de producción, pueden estudiarse la influencia de los parámetros de extrusión sobre la máxima velocidad de salida. Por ejemplo, un aumento relativamente pequeño en la capacidad de la prensa conduce a un aumento de la velocidad de extrusión máxima.

### 3.7. *Requerimientos de carga y energía en extrusión*

#### 3.7.1. Estudio de los métodos de cálculo

Los métodos para calcular las cargas y las tensiones que ocurren durante la extrusión son un importante instrumento para los ingenieros de producción para determinar la facilidad con la cual cierto producto puede ser

extrudido, y, para el fabricante de herramientas, fabricante de prensas y diseñadores de planta, en el diseño y el trazado de nuevas plantas.

Se han desarrollado varios métodos para calcular la carga de deformación a partir de la investigación sistemática de la extrusión. Estos difieren unos de otros en las suposiciones hechas, la complejidad del análisis, las bases teóricas y el grado de aproximación de las soluciones. La solución obtenida por un análisis elemental ha sido de mucha utilidad en la práctica, debido a su simplicidad. Este método resulta como base para métodos más complejos.

### 3.7.2. Análisis elemental

El punto de inicio de este enfoque es la influencia del material, de la relación de extrusión, la temperatura y la fricción entre el tocho y el recipiente, sobre la magnitud del trabajo de deformación.

Si se considerara distribución de deformaciones y energía de deformación no uniforme en el recipiente, para obtener el trabajo total de deformación sería necesaria una considerable cantidad de cálculo. Por lo tanto, se parte de la suposición de que el tocho se deforma homogéneamente con secciones planas, manteniéndose en esta condición durante todo el proceso. Para caracterizar el estado tridimensional de tensiones –con tensiones principales  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ – que se desarrolla en cada elemento de volumen bajo la carga del pistón aplicada se usa el criterio de fluencia de Tresca.

El trabajo de deformación ideal despreciando la fricción puede calcularse como:

$$dW_{id} = F.dL \quad (8)$$

F: fuerza aplicada

$W_{id}$ : Trabajo de deformación ideal

L: distancia.

Para carga uniaxial:

$$F = A \cdot \sigma_f \quad (9)$$

A: Área sobre la que se aplica la carga F

Que puede ser extendido a:

$$F = \frac{V}{L} \cdot \sigma_f \quad (10)$$

V: volumen que ocupa el material

Obteniendo:

$$dW_{id} = V \cdot \sigma_f \frac{dL}{L} \quad (11)$$

Por lo tanto:

$$W_{id} = V \cdot \sigma_f \int_{L_1}^{L_0} \frac{dL}{L} \quad \text{Donde} \quad \int_{L_1}^{L_0} \frac{dL}{L} = \ln \frac{L_1}{L_0} = \varphi \quad (12)$$

El volumen permanece constante, por lo tanto:

$$A_{TOCHO} \cdot L_0 = A_1 \cdot L_1 \quad (13)$$

$$\ln \frac{L_1}{L_0} = \varphi = \ln \frac{A_{TOCHO}}{A_1} \quad (14)$$

A<sub>1</sub>: Área transversal del producto extrudido

Entonces:

$$W_{id} = V \cdot \sigma_f \cdot \varphi \quad (15)$$

$$F_{id} = \frac{W_{id}}{L} = A_{TOCHO} \cdot \sigma_f \cdot \varphi \quad (16)$$

### 3.7.3. Calculo del trabajo de deformación y de la carga de extrusión.

Para extrusión sin fricción, la carga de extrusión ideal se calcula a partir del trabajo ideal de deformación. Sin embargo, además del trabajo de deformación homogéneo, se requiere un trabajo adicional  $W_s$  para superar la deformación por corte y fricción en la matriz, también como el trabajo  $W_f$  necesario para vencer la fricción entre el tocho y el recipiente, o para deformar el material cercano a la superficie del tocho si ocurre pegado (sticking) por fricción:

$$W_T = W_{id} + W_s + W_f \quad (17)$$

$W_s$  es difícil de determinar teóricamente, entonces se define la eficiencia a la deformación ( $\eta_f$ ) como una relación entre el trabajo ideal y el trabajo con la componente adicional  $W_s$ :

$$\eta_f = \frac{W_{id}}{W_{id} + W_s} \quad (18)$$

La cual puede medirse y permite tener en cuenta el trabajo redundante. Se obtiene la siguiente expresión de (15) y (18):

$$W_{id} + W_s = \frac{W_{id}}{\eta_f} = V \cdot \varphi \cdot \frac{\sigma_f}{\eta_f} \quad (19)$$

La relación  $\frac{\sigma_f}{\eta_f}$  es conocida como resistencia a la deformación  $k_w$ . Este difiere de la tensión de fluencia, que es una constante del material, puesto que esto incluye las pérdidas internas por corte que dependen de la geometría de deformación y la fricción en la matriz. El trabajo adicional que debe entregarse para superar la fricción entre la superficie del tocho y el recipiente es:

$$W_F = F_F \cdot L = \pi \cdot D_0 \cdot L^2 \cdot \mu_F \cdot \sigma_f \quad (20)$$

$\mu_F$  : Coeficiente de fricción entre el tocho y el recipiente.

$D_0$ : Diámetro del recipiente (equivalente al del tocho expandido)

La expresión para el trabajo total es:

$$W_T = V \cdot \varphi \cdot k_w + \pi \cdot D_0 \cdot L^2 \cdot \mu_F \cdot \sigma_f \quad (21)$$

Y la carga total se calcula como:

$$F_T = A_0 \cdot \varphi \cdot \sigma_f + \pi \cdot D_0 \cdot L \cdot \mu_F \cdot \sigma_f \quad (22)$$

$A_0$ : Área del tocho expandido.

La ecuación anterior <sup>[3]</sup> es idéntica a la ecuación dada por otros autores <sup>[4]</sup>. Estos han utilizado diferentes enfoques, especialmente para la fricción en la pared del recipiente – por ejemplo, usando una ecuación exponencial o cuando ocurre adhesión por fricción, remplazan  $\mu_F \cdot \sigma_f$  por  $\tau$ .

#### 4. Desarrollo

La primera etapa consistió de la capacitación necesaria para realizar este trabajo, identificando los parámetros críticos del proceso de prensado (presión, temperatura, relación de extrusión, factores de forma, etc.). Determinamos las ecuaciones del modelo descrito en el punto anterior en función de las tres variables más importantes que son: temperatura, del tocho y de salida del perfil, presión y velocidad de salida, las cuales se relacionan entre sí. Con la etapa anterior cumplida, se inició la etapa de ajuste del mismo. En principio el proyecto requería una base de datos de los primeros 50 perfiles del ranking de fabricación, lo que no se pudo completar, contando con una base de datos de 37 perfiles. El ranking de fabricación ordena los perfiles

según las toneladas producidas mensualmente. Los primeros 50 perfiles representan alrededor del 80 % de la producción de la unidad de negocios de extrusión.

Luego se procedió al cálculo de la variación de la temperatura durante la extrusión, en segundo lugar el cálculo de la presión necesaria y por último la velocidad máxima de salida. El ajuste consistió en el relevamiento de la velocidad de salida actual, para las condiciones determinadas de temperatura, largo de tocho y prensa.

Con la premisa de poder determinar condiciones de mayores velocidades de salida según el modelo, se propusieron condiciones de temperatura, largo de tocho y prensa para las cuales sería posible obtener un material de calidad aceptable. De esta manera, las futuras pruebas a realizarse verificarían la eficiencia y posibilitarían un mejor ajuste del mismo.

#### **4.1 Selección del modelo.**

##### *4.1.1 Cálculo de la temperatura de salida:*

Considerando tres hipótesis:

- 1 - Casi todo el trabajo de deformación es convertido en calor:

$$\Delta T_1 = \bullet_f \cdot \phi / \rho \cdot C_p \quad (23)$$

Para el cálculo de la tensión de flujo, teniendo en cuenta la funcionalidad de la misma con los parámetros de proceso, se utilizó el modelo de Zener <sup>[5]</sup>. Éste relaciona la tensión en función de la relación de extrusión, la velocidad de deformación, la temperatura, y constantes propias de cada aleación.

La ecuación:

$$\sigma = 1/\alpha \cdot \ln [(Z/A)^{1/n} + (1 + (Z/A)^{2/n})^{1/2}] \quad (24)$$



Donde  $Z = \varepsilon \exp(\Delta H/R.T)$  (25)

Siendo:

$\alpha$ ,  $n$ ,  $\Delta H$  y  $A$  parámetros del modelo dependientes del tipo de aleación extraídos de literatura<sup>[5]</sup>.

$T$  = temperatura del tocho

$R$  = constante universal de los gases

Siendo  $\varepsilon$  la velocidad de deformación media calculada<sup>[3]</sup> como

$$\varepsilon = 6 \cdot V_R \cdot \varphi / D_0 \quad (26)$$

$V_R$  = velocidad del pistón (m/min.)

$D_0$  = Diámetro del tocho expandido

- 2- Aumento de temperatura en la superficie del tocho causada por fricción en la pared del recipiente, haciendo un balance de calor con una capa de superficie dada del tocho, pero asumiendo deformación adiabática.

$$\Delta T_2 = (\bullet_f / 4 \cdot \rho \cdot C_p) \cdot (V_a \cdot L_0 / a \cdot R)^{1/2} \quad (27)$$

- 3- Aumento de temperatura en la superficie de extrusión causado por fricción en el plano de la matriz:

$$\Delta T_3 = (\bullet_f / 4 \cdot \rho \cdot C_p) \cdot (V_a \cdot s / a)^{1/2} \quad (28)$$

$$T_{LIMITE} = T_{ENTRADA} + \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 \quad (29)$$

Era necesario determinar un límite de temperatura conservativo para la aparición de defectos. El criterio para determinarla tuvo en cuenta, la temperatura de solidus (610 – 650°C) y la temperatura de fusión del eutéctico

(aprox. 600 °C). Junto al ingeniero de procesos, se consideró una temperatura límite de 550 °C.

#### 4.1.2. Cálculo de la presión máxima requerida:

Para el cálculo de la carga de extrusión se tuvieron en cuenta: la resistencia a la deformación del material (proporcional a la tensión de fluencia), la fricción entre el recipiente y el tocho, la fricción entre el perfil y el plano de la matriz, y un factor de forma que determina la dificultad para extrudir el perfil.

→ Resistencia a la deformación:  $K_w = \frac{\sigma_f}{\eta_f}$  (30)

Siendo  $\eta_f$ : un factor de eficiencia de la deformación, determinado por el tipo de lubricación y la temperatura. Se tomo un valor promedio extraído de literatura <sup>[3]</sup>.

La resistencia a la deformación  $k_w$ , incluye la tensión de fluencia  $\sigma_f$ , las pérdidas internas durante la deformación, y las pérdidas debidas a la fricción entre el perfil y el plano de la matriz, pero no tiene en cuenta la fricción entre el recipiente y el tocho. Entonces:

$$F_T = F_{\text{Debida a la resistencia del material}} + F_{\text{Fricción}} \quad (31)$$

$$F_T = A_0 \cdot k_w \cdot \phi + F_{\text{Fricción}} \quad (32)$$

→ Fricción entre el tocho y la pared del recipiente:

$$F_{\text{Fricción}} = \pi \cdot D_0 \cdot L \cdot \mu_F \cdot \sigma_f \quad (33)$$

El factor de fricción fue tomado como un promedio del rango de valores teóricos los cuales están determinados por las condiciones de lubricación en prensa [3].

La fuerza total sin factor de forma se calcula:

$$F_{TSF} = A_0 \cdot k_w \cdot \varphi + \pi \cdot D_0 \cdot L \cdot \mu_F \cdot f \quad (34)$$

El ajuste consistió en determinar un factor de forma que represente la dificultad de extrudir el perfil en función de la forma del mismo. Con la fuerza calculada y el área donde las prensas aplican esa carga según planos, se calculo la presión de prensa máxima necesaria.

#### 4.1.3. Cálculo de la velocidad de salida máxima:

Como se dijo previamente, la velocidad de salida se encuentra limitada, por un lado por la capacidad de la prensa y por el otro la presencia de defectos en el perfil. Esto se expresa en relación con la velocidad del pistón versus la temperatura de extrusión.

Determinamos utilizar las ecuaciones 5 y 6 que relacionan la velocidad de extrusión máxima con la capacidad de la prensa y la aparición de defectos. Calculando la intersección entre ambas, obtuvimos la velocidad del pistón óptima y con esta la velocidad de salida.

$$V_{RMAX} = [ (F_{max} \cdot a^{f*}) / (f \cdot (6 \cdot \varphi / D_0)^{m*} \cdot (A_0 \cdot \varphi \cdot 1 / \eta_f + \pi \cdot D_0 \cdot L_0 \cdot \mu_F)) ]^{1/(m* + f*)} \quad (36)$$

Con  $a^*$ ,  $f^*$ ,  $m^*$  determinadas a partir del ajuste experimental.

La velocidad de salida la calculamos suponiendo deformación plana como:

$$V_a = R \cdot V_{RMAX}^{[3]} \quad (37)$$

#### 4.2. Ajuste del modelo

Como se menciono anteriormente, se realizó un relevamiento de las condiciones actuales de proceso lo que puede observarse en las tablas 3 y 4. La velocidad promedio se calculo midiendo el tiempo que tarda en extrudirse un tocho completo y la longitud de producto obtenido durante ese tiempo. La presión medida es la presión máxima registrada previa al comienzo de la extrusión verdadera del producto (presión de ruptura).

Como se menciono al inicio de este trabajo, cada matriz tiene asignada una prensa como estándar por el área de procesos:

Prensa 31:

MATRIZ	Copia	Fecha	Ranking de fabricación	Diámetro Tocho (pulgadas)	Temperatura del Tocho (°C) medida	Largo del Tocho (m)	Velocidad de salida promedio medida (m/min.)	Presión medida (kg/cm <sup>2</sup> )
P-6216	34	26/01/07	1	9	450	0.575	20	190
M-2356	107	8/01/07	2	9	445	0.55	30	195
P-6037	21	6/01/07	4	9	460	0.55	21	179
P-6205	12	12/02/07	7	9	445	0.75	20	197
P-6055	12	9/02/07	8	9	450	0.7	17	185
P-6229	18	27/03/07	10	9	450	0.65	15	182
P-6036	4	20/01/07	12	9	450	0.525	18	185
P-6066	8	26/03/07	13	9	450	0.7	19	180
M-2357	78	13/03/07	14	9	435	0.65	18	185
P-6201	17	6/02/07	15	9	450	0.575	22	200
P-6906	13	6/02/07	16	9	450	0.725	16	180
P-7621	11	2/03/07	19	9	445	0.65	15	152
P-6059	7	20/02/07	24	9	450	0.65	19	181
P-6235	12	8/03/07	25	9	450	0.675	24	190
P-6204	23	05/02/07	27	9	450	0.7	20	--
P-6908	--	--	29	9	460	0.7	20	--
M-2359	79	15/01/07	31	9	450	0.675	20	195
M-2358	60	6/02/07	32	9	440	0.5	12	182
P-7062	--	--	34	9	450	0.525	20	--
P-6081	--	--	36	9	460	0.7	16	--
M-0667	17	31/01/07	37	9	460	0.55	26	--
P-6939	6	15/03/07	41	9	450	0.675	17	182
P-6041	--	--	44	9	450	0.525	23	--
P-6909	--	--	48	9	455	0.65	18	--

Tabla 3. Relevamiento prensa 31

## Prensa 36:

MATRIZ	Copia	Fecha	Ranking de fabricación	Diámetro Tocho (pulgadas)	Temperatura del Tocho medida (°C)	Largo del Tocho (m)	Velocidad de salida promedio medida (m/min)	Presión medida (kg/cm <sup>2</sup> )
P-6200	37	20/03/07	3	8	460	0.5	20	179
P-5726	44	19/01/07	5	8	455	0.475	31	200
P-6206	19	16/03/07	6	8	445	0.525	28	190
P-6214	17	2/03/07	9	8	450	0.55	20	190
M-2361	104	20/02/07	11	8	440	0.5	24	180
P-6072	12	11/01/07	17	8	460	0.7	16	200
P-7277	8	9/02/07	18	8	450	0.5	26	190
P-6071	9	13/02/07	20	8	460	0.475	30	200
P-6035	13	20/03/07	21	8	460	0.6	19	195
M-2360	78	29/01/07	22	8	465	0.75	22	190
P-5800	77	30/01/07	23	8	460	0.5	28	170
M-0674	101	19/03/07	26	8	450	0.6	26	190
P-6034			28	8	470	0.7	28	---
P-6203	13	1/03/07	30	8	450	0.425	24	190
P-5701			33	8	455	0.65	45	---
P-6207	11	30/01/07	35	8	450	0.575	25	198
P-7151	11	21/02/07	38	8	460	0.55	18	---
P-5298			39	8	450	0.65	24	---
P-6255	8	20/03/07	40	8	460	0.575	22	193
P-6232			42	8	460	0.7	32	---
P-6313			43	8	450	0.5	25	---
M-0843	66	29/01/07	45	8	460	0.65	24	200
P-6074			46	8	450	0.5	20	---
P-6307			47	8	470	0.425	42	---
P-7149	9	16/03/07	49	8	445	0.6	29	193
P-6768			50	8	450	0.7	30	---

Tabla 4. Relevamiento prensa 36

Los casilleros vacíos no pudieron ser relevados.

Del mismo, surgieron los valores de factor de forma necesarios para las condiciones dadas, según:

$$F_i = V_m / V_{cm} \text{ siendo:}$$

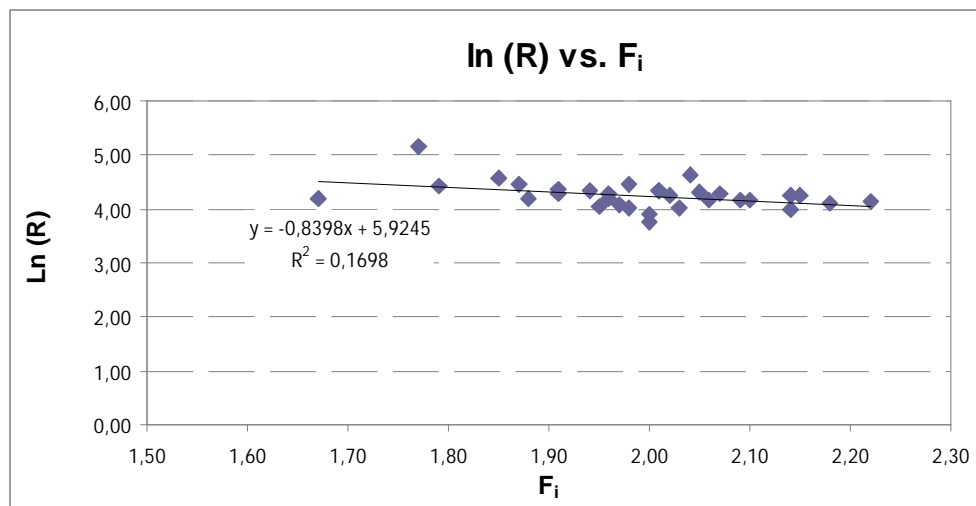
$F_i$ : factor de forma ideal

$V_m$ : valor medido experimentalmente

$V_{cm}$ : valor calculado por el modelo sin factor de forma.

El Factor de forma ideal es calculado suponiendo un 100% de acierto del modelo en las condiciones de velocidad relevadas. Desde este momento, se inició el proceso de correlación de este factor con alguna característica del perfil (por ejemplo peso de un metro de perfil (peso por metro), tipo de perfil, etc.) a extrudir para automatizar el cálculo del mismo, y así hacerlo extensible a todos los perfiles disponibles.

En primer lugar surge de la ecuación teórica elemental que la carga de extrusión debería ser una función lineal con el logaritmo de la relación de extrusión. Sin embargo, si el área transversal del perfil extrudido es muy pequeña, se puede observar un aumento inusual de la presión, debido a que los componentes de fricción por corte y del contacto con las paredes de la matriz, son los predominantes. Con los datos calculados, se obtuvo la relación lineal que se observa en la figura 10.



**Figura 10. Relación de extrusión vs. Factor de forma ideal**

Se observaron errores que superaban el 10% (tabla 5), lo cual, según lo citado en párrafos anteriores, podría deberse a aquellos perfiles de área transversal muy pequeña. Como el objeto es simplificar el cálculo, se decidió probar alguna otra correlación.

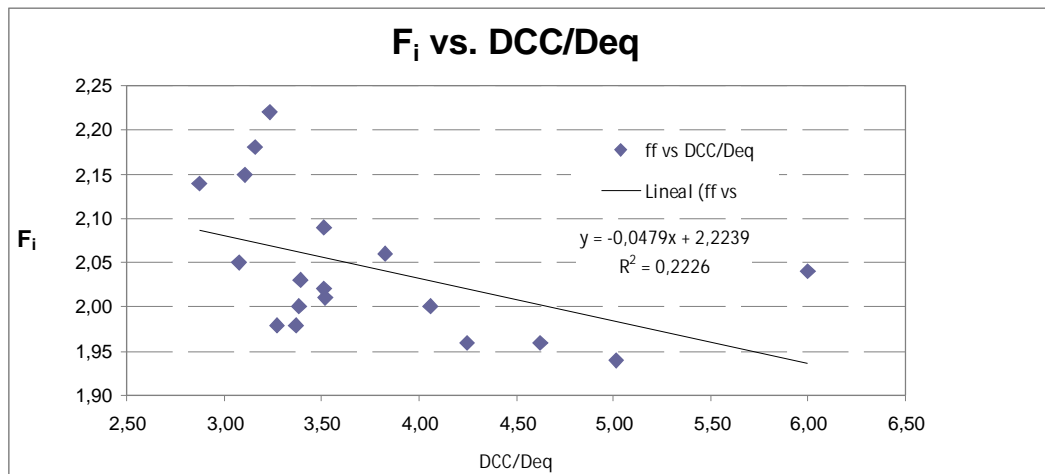
MATRIZ	Rel. De Extrusión	F <sub>i</sub>	Ln (A <sub>1</sub> /A <sub>2</sub> )	F Relación de Extrusión	Error (%)
P-7621	67	1,67	4,20	2,07	23,78
P-5800	174	1,77	5,16	0,70	-60,53
M-2361	84	1,79	4,43	1,85	3,12
P-7149	96	1,85	4,56	1,70	-8,34
P-6206	86	1,87	4,45	1,83	-2,35
M-2357	65	1,88	4,18	2,08	10,80
P-6216	78	1,91	4,36	1,92	0,45
M-0674	72	1,91	4,27	2,00	4,86
M-2356	76	1,94	4,33	1,95	0,31
P-6939	57	1,95	4,05	2,19	12,22
P-6037	65	1,96	4,18	2,08	6,32
P-7277	73	1,96	4,29	1,98	1,23
M-2358	60	1,97	4,09	2,16	9,48
P-6201	87	1,98	4,47	1,80	-8,88
P-6059	55	1,98	4,01	2,21	11,78
P-6906	49	2,00	3,89	2,29	14,62
P-6214	43	2,00	3,76	2,37	18,62
P-6200	76	2,01	4,33	1,95	-2,95
P-6207	76	2,01	4,33	1,95	-3,19
M-2360	70	2,02	4,25	2,02	0,24
P-6055	56	2,03	4,02	2,20	8,59
P-5726	103	2,04	4,63	1,61	-21,04
P-6229	74	2,05	4,31	1,97	-3,92
P-6235	64	2,06	4,16	2,10	1,84
P-6203	71	2,07	4,27	2,01	-3,04
P-6036	65	2,09	4,18	2,09	-0,11
M-2359	64	2,10	4,15	2,11	0,32
P-6205	71	2,14	4,26	2,02	-5,80
M-0843	55	2,14	4,00	2,22	3,78
P-6071	70	2,15	4,24	2,03	-5,63
P-6035	61	2,18	4,11	2,14	-1,69
P-6072	63	2,22	4,15	2,11	-5,01

**Tabla 5. Ajuste del modelo para el cálculo del coeficiente con la relación de extrusión para ambas prensas.**

Los valores marcados con rojo, son aquellos que presentan error mayor al 10%, considerando ese límite como aceptable.

Algunos autores <sup>[3]</sup> relacionan la carga de extrusión y el diámetro del círculo que circunscribe al perfil. Esta propuesta surge de la observación que un perfil complejo resulta en mayores presiones de extrusión que una barra maciza de igual área transversal. De este modo, con los datos extraídos de planos (Ver anexo), diámetro de círculo circunscripto (DCC) y área del perfil, se calculó ese valor de factor de forma, y se lo relaciono con el Factor de forma

ideal ( $F_i$ ) calculado anteriormente a partir de los datos relevados ( $V_m / V_{cm}$ ).  
Obteniendo la siguiente correlación lineal (Figura 11):



**Figura 11. Factor deforma ideal vs DCC/Deq**

Esta correlación presentó un valor de coeficiente de regresión lineal ( $R^2$ ) superior al anterior y se obtuvieron los siguientes errores (tabla 6).

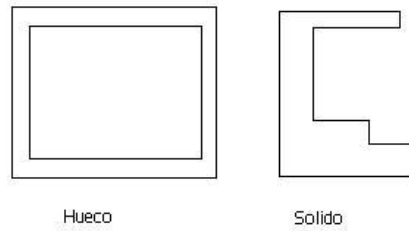


Matriz	F <sub>i</sub>	DCC	Diámetro equivalente	F <sub>Diámetro</sub>	Error
P-6205	2,14	40	13,92	2,08	-2,97
P-6229	2,05	59	19,19	2,06	0,48
P-6071	2,15	78	25,09	2,06	-4,33
P-6206	1,87	29	9,24	2,05	9,86
P-6035	2,18	85	26,88	2,05	-5,85
P-6072	2,22	85	26,30	2,05	-7,80
P-6201	1,98	58	17,70	2,04	3,18
P-6216	1,91	62	18,68	2,04	6,78
P-6059	1,98	75	22,26	2,04	2,80
P-6906	2,00	80	23,62	2,03	1,69
P-6055	2,03	75	22,12	2,03	0,17
P-6036	2,09	72	20,50	2,02	-3,18
M-2360	2,02	44	12,52	2,02	0,16
P-6200	2,01	86	24,44	2,02	0,65
M-2357	1,88	54	14,45	2,00	6,64
P-6235	2,06	79	20,63	2,00	-3,05
P-6214	2,00	92	22,66	1,98	-1,10
P-6037	1,96	123	28,93	1,96	0,11
P-7277	1,96	80	17,30	1,93	-1,47
M-2361	1,79	80	16,08	1,90	6,26
M-2356	1,94	95	18,95	1,90	-2,11
P-5726	2,04	124	20,69	1,82	-10,91
P-5800	1,77	69	11,23	1,81	1,98
P-7621	1,67	179	28,64	1,80	7,56

**Tabla 6. Ajuste del modelo para el cálculo del coeficiente con la relación (DCC/D<sub>equivalente</sub>) para ambas prensas.**

Presentando errores hasta el 10%, lo que sería aceptable, aunque contando con sólo 25 perfiles de los 50. La falta de datos y la necesidad de personalizar el ajuste a las condiciones reales, nos aliento a proponer una nueva forma de ajuste, observándose variaciones por tipo de perfil ( sólido o hueco) y según un valor calculado según bibliografía.

En Aluar, se clasifican los perfiles en dos tipos: Sólidos, aquellos que su area transversal no presenta superficies internas libres y huecos, aquellos que si lo presentan (Figura 12).



**Figura 12. Tipo de perfiles**

$F_{\text{perímetro}} = \text{perímetro} / (1000 \times p/m)$ , siendo  $p/m$  el peso de un metro de perfil extrudido y el perímetro el perímetro del perfil, ambos extraídos de planos (ver anexo).

Definiendo el valor  $F_t$  como  $F_{\text{perímetro}} \times F_a$  ( $F_a$ : factor de ajuste necesario observado). De este modo se relevaron los siguientes valores de ajuste Tablas 7 y 8:

**Prensa 31**

Tipo de Perfil	$F_{\text{perímetro}}$	$F_a$
Hueco	< 0,3	9,5
	0,3-0,37	5,8
	0,37-0,45	4,8
	0,45-0,5	4,45
	0,5-0,55	3,93
	0,55-0,65	3,3
	>0,65	2,7
Sólido	< 0,4	5
	0,4-0,5	5,5
	0,5-0,6	3,5
	0,6-0,65	3
	>0,65	2,75

**Tabla 7. Ajuste prensa 31**

## Prensa 36

Tipo de Perfil	F <sub>perímetro</sub>	F <sub>a</sub>
Hueco	< 0,3	9,5
	0,3-0,37	5,8
	0,37-0,45	5,3
	0,45-0,5	4,35
	0,5-0,55	3,9
	0,55-0,6	3,4
	>0,6	3
Sólido	< 0,4	5
	0,4-0,5	5,5
	0,5-0,55	3,55
	0,55-0,6	3,3
	0,6-0,65	3
	>0,65	2,7

Tabla 8. Ajuste prensa 36

El ajuste obtenido se muestra en la Tabla 9, el cual resultó en un error de aproximadamente el 5 %.

Matriz	F <sub>t</sub>	F <sub>i</sub>	Error (%)
P-6035	2,18	2,24	2,75
P-6071	2,15	2,13	-0,93
P-6205	2,14	2,09	-2,34
P-6036	2,09	2,08	-0,48
P-6235	2,06	2,03	-1,46
P-6229	2,05	2,03	-0,98
P-5726	2,04	2,01	-1,47
P-6055	2,03	2,15	5,91
M-2360	2,02	2,04	0,99
P-6200	2,01	2,01	0,00
P-6906	2,00	2,00	0,00
P-6214	2,00	2,03	1,50
P-6201	1,98	2,02	2,02
P-6059	1,98	2,15	8,59
P-6037	1,96	2,13	8,67
P-7277	1,96	1,96	0,00
M-2356	1,94	1,94	0,00
P-6216	1,91	2,03	6,28
M-2357	1,88	1,92	2,13
P-6206	1,87	1,86	-0,53
M-2361	1,79	1,77	-1,12
P-5800	1,77	1,89	6,78
P-7621	1,67	1,78	6,59

**Tabla 9. Ajuste final del modelo**

Como puede observarse, los errores son los menores a los de todas las correlaciones planteadas. De este modo, se procedió con el ajuste utilizando el criterio anterior, obteniendo los siguientes valores de velocidad, presión y temperatura calculados por el modelo para las condiciones de ajuste según el relevamiento (tablas 10 y 11).

## Prensa 31:

MATRIZ	Copia	Fecha	Ranking de fabricación	Diámetro Tocho (pulgadas)	Temperatura del Tocho (°C)	Largo del Tocho (m)	Velocidad de salida promedio medida  (m/min)	Presión Calculada por el modelo	Presión medida (kg/cm <sup>2</sup> )	% Error
P-6216	34	26/01/07	1	9	450	0.575	20	182	190	4.4
M-2356	107	8/01/07	2	9	445	0.55	30	193	195	1.0
P-6037	21	6/01/07	4	9	460	0.55	21	184	179	-2.7
P-6205	12	12/02/07	7	9	445	0.75	20	204	197	-3.4
P-6055	12	9/02/07	8	9	450	0.7	17	188	185	-1.6
P-6229	18	27/03/07	10	9	450	0.65	15	181	182	0.6
P-6036	4	20/01/07	12	9	450	0.525	18	177	185	4.5
P-6066	8	26/03/07	13	9	450	0.7	19	165	180	9.1
M-2357	78	13/03/07	14	9	435	0.65	18	189	185	-2.1
P-6201	17	6/02/07	15	9	450	0.575	22	188	200	6.4
P-6906	13	6/02/07	16	9	450	0.725	16	178	180	1.1
P-7621	11	2/03/07	19	9	445	0.65	15	162	152	-6.2
P-6059	7	20/02/07	24	9	450	0.65	19	189	181	-4.2
P-6235	12	8/03/07	25	9	450	0.675	24	195	190	-2.6
P-6204	23	05/02/07	27	9	450	0.7	20	161	--	--
P-6908	--	--	29	9	460	0.7	20	176	--	--
M-2359	79	15/01/07	31	9	450	0.675	20	192	195	1.6
M-2358	60	6/02/07	32	9	440	0.5	12	181	182	0.6
P-7062	--	--	34	9	450	0.525	20	129	--	--
P-6081	--	--	36	9	460	0.7	16	158	--	--
M-0667	17	31/01/07	37	9	460	0.55	26	184	--	--
P-6939	6	15/03/07	41	9	450	0.675	17	175	182	4.0
P-6041	--	--	44	9	450	0.525	23	180	--	--
P-6909	--	--	48	9	455	0.65	18	191	--	--

Tabla 10. Resultados del ajuste final prensa 31

## Prensa 36

MATRIZ	Copia	Fecha	Ranking de fabricación	Diámetro Tocho (pulgadas)	Temperatura del Tocho (°C)	Largo del Tocho (m)	Velocidad de salida promedio medida (m/min)	Presión Calculada por el modelo	Presión medida (kg/cm <sup>2</sup> )	% Error
P-6200	37	20/03/07	3	8	460	0.5	20	180	179	-0.6
P-5726	44	19/01/07	5	8	455	0.475	31	192	200	4.2
P-6206	19	16/03/07	6	8	445	0.525	28	189	190	0.5
P-6214	17	2/03/07	9	8	450	0.55	20	185	190	2.7
M-2361	104	20/02/07	11	8	440	0.5	24	173	180	4.0
P-6072	12	11/01/07	17	8	460	0.7	16	200	200	0.0
P-7277	8	9/02/07	18	8	450	0.5	26	190	190	0.0
P-6071	9	13/02/07	20	8	460	0.475	30	193	200	3.6
P-6035	13	20/03/07	21	8	460	0.6	19	200	195	-2.5
M-2360	78	29/01/07	22	8	465	0.75	22	191	190	-0.5
P-5800	77	30/01/07	23	8	460	0.5	28	181	170	-6.1
M-0674	101	19/03/07	26	8	450	0.6	26	184	190	3.3
P-6034			28	8	470	0.7	28	201	---	---
P-6203	13	1/03/07	30	8	450	0.425	24	203	190	-6.4
P-5701			33	8	455	0.65	45	202	---	---
P-6207	11	30/01/07	35	8	450	0.575	25	196	198	1
P-7151	11	21/02/07	38	8	460	0.55	18	175	---	---
P-5298			39	8	450	0.65	24	196	---	---
P-6255	8	20/03/07	40	8	460	0.575	22	187	193	3.2
P-6232			42	8	460	0.7	32	197	---	---
P-6313			43	8	450	0.5	25	195	---	---
M-0843	66	29/01/07	45	8	460	0.65	24	189	200	5.8
P-6074			46	8	450	0.5	20	185	---	---
P-6307			47	8	470	0.425	42	200	---	---
P-7149	9	16/03/07	49	8	445	0.6	29	192	193	0.5
P-6768			50	8	450	0.7	30	183	---	---

Tabla 11. Resultados del ajuste prensa 36

#### 4.3. Valores calculados por el modelo:

Luego de realizar el ajuste, el modelo recalcula las velocidades máximas posibles y con ellas las temperaturas y presiones requeridas. De este modo, se modificaron las condiciones de la siguiente manera (tablas 12 y 13):

Prensa 31:

MATRIZ	Ranking de fabricación	Diámetro Tocho (pulgadas)	Temperatura del Tocho (°C)	Largo del Tocho (m)	Velocidad de salida promedio calculada por el modelo (m/min)	Presión calculada por el modelo (kg/cm <sup>2</sup> )
P-6216	1	9	460	0.575	35	194
M-2356	2	9	445	0.55	33	195
P-6037	4	9	460	0.55	32	197
P-6205	7	9	460	0.75	33	203
P-6055	8	9	460	0.7	28	193
P-6229	10	9	460	0.65	34	195
P-6036	12	9	450	0.525	31	192
P-6066	13	9	450	0.7	26	178
M-2357	14	9	445	0.65	30	193
P-6201	15	9	450	0.575	37	204
P-6906	16	9	450	0.725	25	191
P-7621	19	9	445	0.65	30	180
P-6059	24	9	460	0.65	28	191
P-6235	25	9	460	0.675	31	192
P-6204	27	9	450	0.7	22	164
P-6908	29	9	460	0.7	31	188
M-2359	31	9	460	0.675	31	194
M-2358	32	9	450	0.5	29	197
P-7062	34	9	450	0.525	20	129
P-6081	36	9	460	0.7	22	167
M-0667	37	9	460	0.55	30	189
P-6939	41	9	450	0.675	27	188
P-6041	44	9	450	0.525	23	180
P-6909	48	9	465	0.65	33	199

Tabla 12. Condiciones óptimas calculadas por el modelo para la prensa 31

Gráficamente para la presión (figura 13), temperatura (figura 14) y velocidad (figura 15):

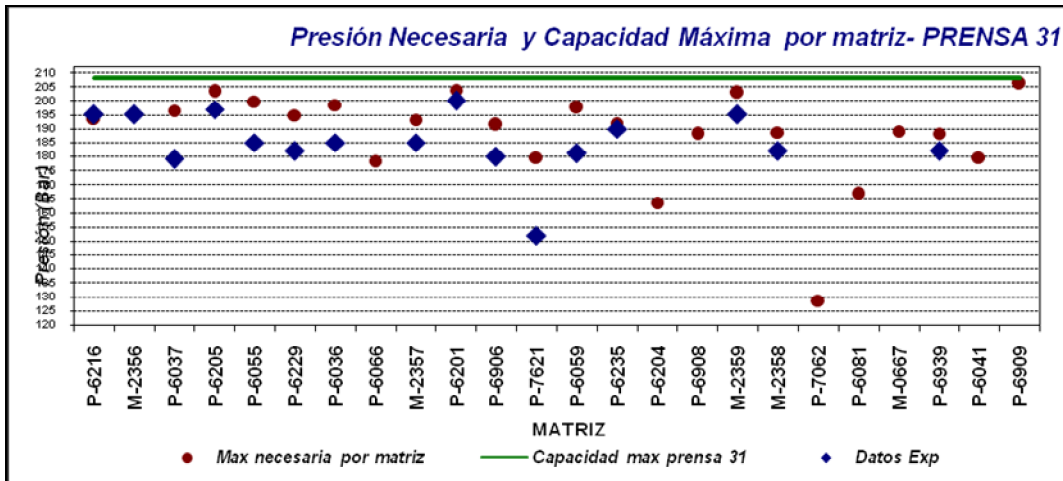


Gráfico 13. Presión calculada por el modelo para prensa 31.

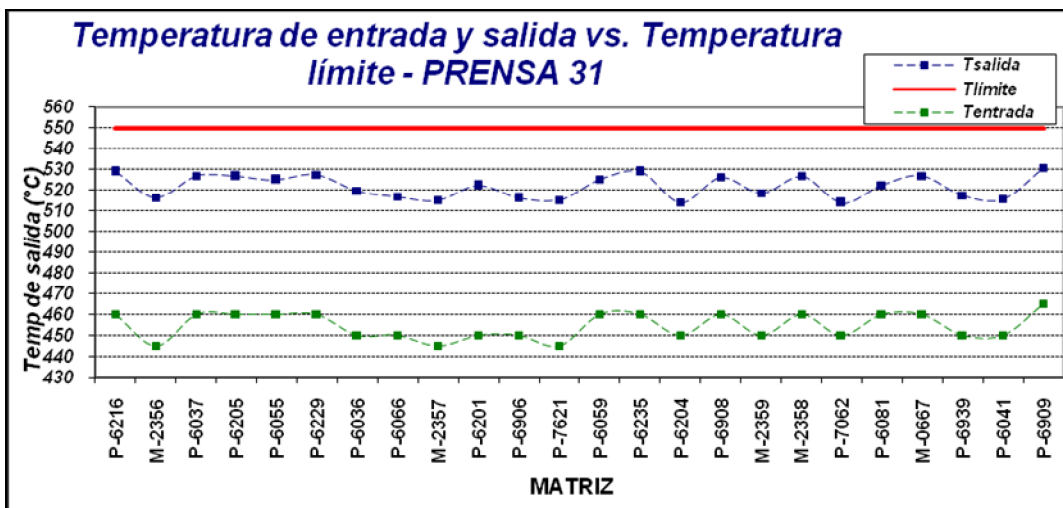
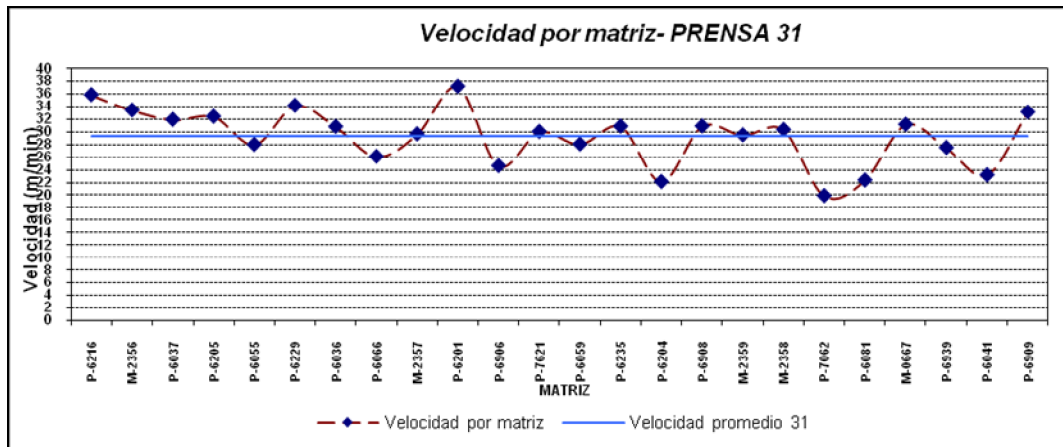


Gráfico 14. Temperatura calculada por el modelo para prensa 31.





**Gráfico 15. Velocidad calculada por el modelo para prensa 31.**

Prensa 36:

<b>MATRIZ</b>	<b>Ranking de fabricación</b>	<b>Diámetro Tocho (pulgadas)</b>	<b>Temperatura del Tocho (°C)</b>	<b>Largo del Tocho (m)</b>	<b>Velocidad de salida promedio calculada por el</b>	<b>Presión calculada por el modelo (kg/cm<sup>2</sup>)</b>
<i>P-6200</i>	3	8	460	0.5	31	191
<i>P-5726</i>	5	8	455	0.475	37	202
<i>P-6206</i>	6	8	445	0.525	32	193
<i>P-6214</i>	9	8	450	0.55	20	185
<i>M-2361</i>	11	8	440	0.5	31	186
<i>P-6072</i>	17	8	460	0.7	28	201
<i>P-7277</i>	18	8	450	0.5	29	193
<i>P-6071</i>	20	8	460	0.475	29	198
<i>P-6035</i>	21	8	460	0.6	27	201
<i>M-2360</i>	22	8	465	0.75	28	198
<i>P-5800</i>	23	8	460	0.5	55	201
<i>M-0674</i>	26	8	450	0.6	28	188
<i>P-6034</i>	28	8	470	0.7	28	201
<i>P-6203</i>	30	8	450	0.425	30	198
<i>P-5701</i>	33	8	455	0.65	45	202
<i>P-6207</i>	35	8	450	0.575	29	204
<i>P-7151</i>	38	8	460	0.55	28	187
<i>P-5298</i>	39	8	450	0.65	24	196
<i>P-6255</i>	40	8	460	0.575	24	192
<i>P-6232</i>	42	8	460	0.7	32	197
<i>P-6313</i>	43	8	450	0.5	29	200
<i>M-0843</i>	45	8	460	0.65	24	189
<i>P-6074</i>	46	8	450	0.5	27	194
<i>P-6307</i>	47	8	470	0.425	42	200
<i>P-7149</i>	49	8	445	0.6	34	197
<i>P-6768</i>	50	8	450	0.7	30	190

**Tabla 13. Condiciones óptimas calculadas por el modelo para la prensa 36**

Gráficamente para la presión (figura 16), temperatura (figura 17) y velocidad (figura 18):

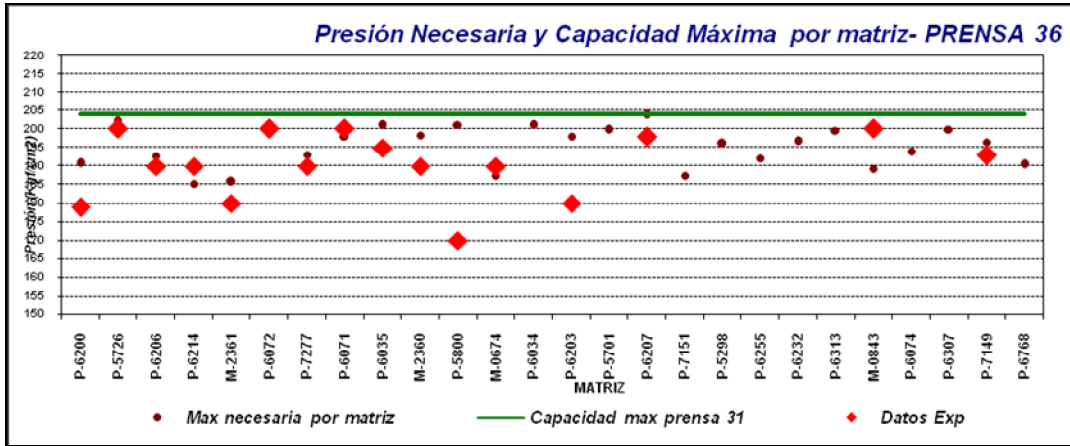


Figura 16. Presión calculada por el modelo para prensa 36.

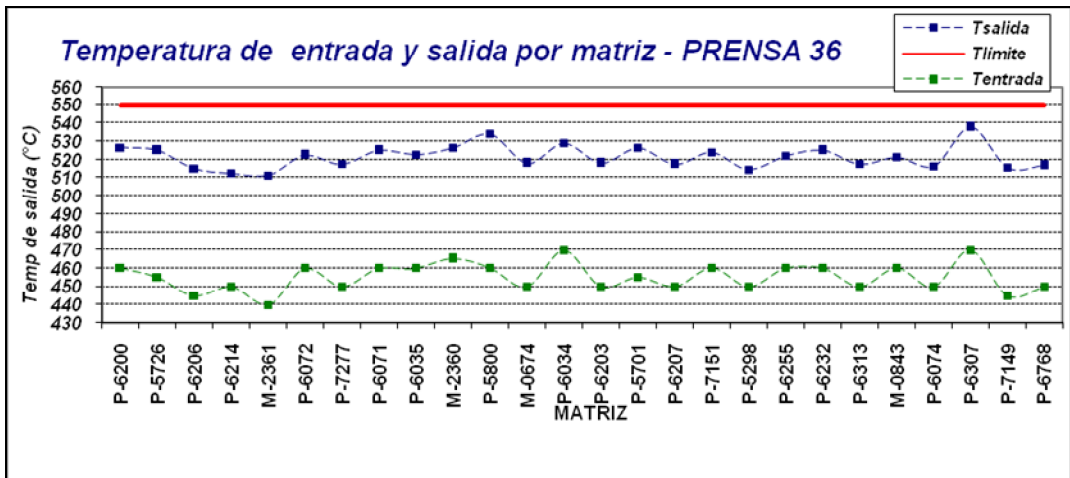


Figura 17. Temperatura calculada por el modelo para prensa 36.

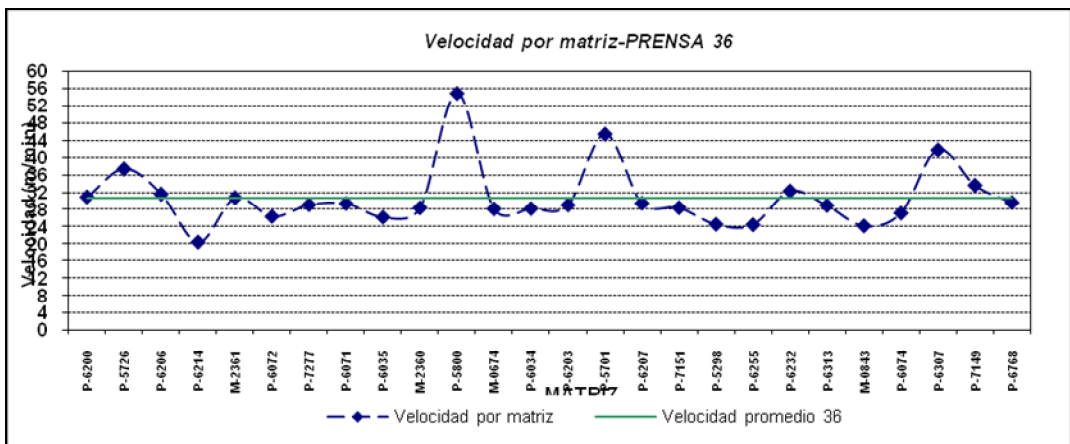


Figura 18. Velocidad calculada por el modelo para prensa 36.

## 5. Conclusiones:

La pasantía de verano me permitió tener una primera experiencia con el ambiente laboral. Durante la realización del proyecto, no solo me forme en la parte técnica, profundizando en el proceso de extrusión de aluminio, sino también en lo actitudinal que no se ve reflejado en este texto.

Al comenzar la pasantía, se presumía que el proyecto podía resultar ambicioso para la duración de la misma esto resultó en parte así, aunque se alcanzó un avance importante complementado por el seguimiento durante los meses posteriores. Resultó sumamente desafiante el objetivo de iniciar el desarrollo de un modelo nuevo que relacione las variables de proceso más importantes.

Como conclusión de este trabajo cabe destacar que:

- Según predicciones del modelo, las velocidades de extrusión podrían elevarse, lo que optimizaría el rendimiento de las prensas.
  
- El error del modelo, como se observó durante el desarrollo, se encuentra por debajo del 5 %, ya sea por debajo del valor real (signo +), o por encima (signo -), prácticamente en la mayoría de las matrices que se comprobaron. Este resultado es mas que aceptable para el estado de avance del modelo, teniendo en cuenta que resulta en un punto de partida para futuras mejoras y aplicaciones.

## 6. Trabajos futuros

El trabajo realizado en este proyecto final sin duda constituye un punto de partida a futuros desarrollos en la empresa. El reajuste del mismo involucra tener en cuenta todas las variables obviadas durante el desarrollo del mismo.

El modelo desarrollado abarca la extrusión de perfiles en aleación 6063, verificado para 37 de los 50 perfiles del ranking de fabricación tomando las condiciones de materia prima (tochos) constantes. Los factores metalúrgicos que no son tenidos en cuenta por el modelo y afectan la extrusión son por ejemplo:

- ∅ *Aleaciones de la familia 6XXX*: Contenido de Fe,  $Mg_2Si$  y exceso de silicio.
- ∅ *Homogeneizado y velocidad de enfriamiento desde la temperatura de homogeneizado*: Globulización de precipitados de  $AlFeMgSi$  y tamaño de los precipitados de  $Mg_2Si$ , para cualquier aleación, incluida la 6063.
- ∅ *Pre calentamiento*: es función del estado metalúrgico del tocho antes del mismo, como consecuencia del punto anterior, pudiendo afectar el resultado tanto del prensado como de las propiedades mecánicas finales.
- ∅ *Disolución* durante el prensado del  $Mg_2Si$  remanente si se trabaja por debajo de la Temperatura de solvus en el pre calentamiento, según la aleación que se preense.
- ∅ *Variaciones* en presiones de alivio de las prensas, ya que determinan la fuerza máxima que es capaz de aplicar cada prensa.
- ∅ *Complejidad de las matrices*.

Ante todo esto, seguramente resultaría necesario un reajuste si se desea ampliar el rango de aplicación del modelo, para otros perfiles, otras aleaciones y otros diseños de matrices no comprobadas.

## 7. Nomenclatura

•  $f$ : tensión de fluencia del material

$\phi$ :  $\ln\left(\frac{A_0}{A_1}\right)$  logaritmo natural de la relación de extrusión

$\rho$ : Densidad ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$C_p$ : Capacidad calorífica ( $\text{J} / \text{Kg} \cdot ^\circ\text{K}$ )

$V_a$ : velocidad de salida del perfil ( $\text{m}/\text{min}.$ )

$L_0$ : longitud del tocho expandido ( $\text{m}$ )

$a$ : difusividad térmica ( $\text{m}^2/\text{min}.$ )

$R$ :  $A_0/A_1$ = relación de extrusión.

$s$ : longitud del plano de la matriz ( $\text{m}$ )

$V_{RA}$ : velocidad del pistón (subíndice A significa Aleación)

$V_{RP}$ : Velocidad del pistón (subíndice P significa carga)

$F$ : fuerza aplicada

$W_{id}$ : Trabajo de deformación ideal

$L$ : distancia.

$A$ : Área sobre la que se aplica la carga  $F$

$V$ : volumen que ocupa el material

$A_1$ : Área transversal del producto extrudido

$k_w$ : resistencia a la deformación

$\mu_f$ : Coeficiente de fricción entre el tocho y el recipiente.

$D_0$ : Diámetro del recipiente (equivalente al del tocho expandido)

$A_0$ : Área del tocho expandido

$T$ : temperatura del tocho

$R$ : constante universal de los gases

$V_R$ : velocidad del pistón ( $\text{m}/\text{min}.$ )

$D_0$ : Diámetro del tocho expandido

$L_0$ : longitud del tocho expandido ( $\text{m}$ )

$a^*$ ,  $f^*$ ,  $m^*$ : constantes experimentales.

## **8. Bibliografía**

**1 – Metal Handbook. Volume 2. Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials.**

**2 – Stuwe, H.P.: Einige Abschätzungen zum Strangpressen. Metal 22 (1968) p. 1197/1200.**

**3 – Laue, K., Stenger H., Extrusion. Processes, Machinery, Tooling. Capítulos 1, 2, 3 y 4.**

**4- Siebel, E., Fangmeier, E.: Untersuchungen über den Kraftbedarf beim Pressen und Lochen. Mitt.-Kais.-Wilh.-Inst.-Eisenforschg. 13 p 29/43.**

**5- Anderson A. N., Aluminium Company of America. Proceedings: 5 th International Aluminium Extrusion Technology. Volume II . p 43-56**



9. Anexo:

Plano ejemplo de un perfil. Coloreado en amarillo se observan los valores utilizados para los cálculos en el modelo.

