



**POSGRADO EN CIENCIA E INGENIERIA DE MATERIALES**

**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES**

**“DETERMINACION DE PARAMETROS DE  
EXTRUSION DE ALEACIONES ZINALCO”**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS E INGENIERIA DE  
MATERIALES**

P R E S E N T A :

**UBALDO EDUARDO MARQUEZ AMADOR**

DIRECTOR DE TESIS:  
**DR. GABRIEL TORRES VILLASEÑOR**





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente:	Dr. Juan Genescá Llongeras
Secretario:	Dr. Bernardo Fabián Campillo Illanes
Primer Vocal:	Dr. Gabriel Torres Villaseñor
Segundo Vocal:	Dr. Armando Ortiz Prado
Tercer Vocal:	Dr. Arturo Barba Pingarrón
1 <sup>er</sup> . Suplente:	Dr. Alejandro García Hinojosa
2 <sup>do</sup> . Suplente:	Dr. Rafael Schowenaars Franssens

**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**Dr. Gabriel Torres Villaseñor**

## ÍNDICE

PRÓLOGO.....	1
CAPÍTULO 1 - EL ZINALCO.....	3
1.1 - Antecedentes y Propiedades Físicas.....	3
1.2 - Composición y Microestructura del Zinalco.....	4
1.3 - Propiedades Mecánicas del Zinalco.....	6
1.4 - Desarrollo de la Microestructura.....	8
1.5 - Métodos de Procesamiento.....	9
CAPÍTULO 2 - EL PROCESO DE EXTRUSIÓN.....	11
2.1 - Generalidades.....	11
2.2 - Extrusión Directa.....	12
2.3 - Extrusión Indirecta.....	13
2.4 - Diseño del Proceso de Extrusión.....	14
2.5 - El Tocho.....	16
2.6 - Cargas y Flujo del Metal en el Proceso de Extrusión.....	18
2.7 - Extrusión en Caliente y Extrusión en Frío.....	24
CAPÍTULO 3 - DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	26
3.1 - Introducción.....	26
3.2 - Diseño Experimental.....	26
3.3 - Material de Partida .....	28
3.4 - Temperaturas de Procesamiento .....	29
3.5 - Velocidades de Deformación .....	29
3.6 - Equipo de Extrusión .....	30
3.7 - Datos y Relaciones de Extrusión .....	32
3.8 - Lubricantes de Extrusión.....	33

<b>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS EXPERIMENTALES.....</b>	<b>34</b>
<b>4.1 - Curvas de Carga de Extrusión-Longitud del Tocho.....</b>	<b>34</b>
<b>4.2 - Fuerza de Extrusión.....</b>	<b>43</b>
<b>4.3 - Temperaturas y Velocidades de Extrusión.....</b>	<b>50</b>
<b>4.4 - Patrones de Flujo de Extrusión.....</b>	<b>55</b>
<b>4.5 - Microestructuras de la Aleación.....</b>	<b>58</b>
<b>4.6 - Resistencia de los Productos Extruidos.....</b>	<b>66</b>
<b>4.7 - Productos de Extrusión.....</b>	<b>72</b>
<b>CAPÍTULO 5 - DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....</b>	<b>75</b>
<b>CAPÍTULO 6 - CONCLUSIONES.....</b>	<b>78</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>81</b>

## **OBJETIVO**

Optimizar los parámetros de extrusión directa de aleaciones Zinalco, para obtener las menores cargas requeridas y control de la producción, y con esto lograr la mejor calidad de los productos obtenidos mediante el proceso simulado a nivel laboratorio.

## **HIPÓTESIS**

Es posible adecuar el sistema existente a nivel laboratorio que se emplea para procesar plásticos, para extruir aleaciones de zinc.

El efecto en la carga requerida para la extrusión de las variaciones de los principales parámetros de extrusión, que están completamente determinados para el aluminio, resulta similar para las aleaciones Zinalco.

## **PRÓLOGO**

En el presente trabajo se diseñó el proceso de extrusión a nivel de laboratorio, con el fin de verificar la capacidad de deformación plástica que tienen las aleaciones Zinalco. La extrusión es un proceso de conformado que sólo se aplica a los materiales metálicos que tienen una alta capacidad de deformación plástica, que implica forzar al material a que fluya por una cavidad de menor área de sección transversal. Se sabe que las aleaciones de Zn, principalmente, se conforman mediante procesos de fundición, como el de fundición a presión. Es por esto que, se eligió el proceso de extrusión para determinar la capacidad de conformabilidad de las aleaciones Zinalco. Se empleó un equipo de extrusión de plásticos (plastómetro), que se instala en una máquina universal de pruebas mecánicas marca Instron, modelo 1125, para simular el proceso de extrusión de la aleación Zinalco, con el fin de establecer cuales son las condiciones más apropiadas para procesar este material en cuanto a composición química (variación del contenido de Cu), temperatura de extrusión, velocidad de extrusión, condiciones metalúrgicas más apropiadas para su procesamiento (tratamiento térmico previo), relaciones de extrusión y lubricantes que puedan emplearse en el proceso, que permitan realizar la

extrusión con la menor carga posible, obteniendo productos con las mejores características de conformado y acabado superficial. Todo lo anterior, se empleará para obtener las constantes de extrusión, las propiedades mecánicas resultantes y el análisis de las microestructuras obtenidas, generadas por la alta deformación plástica.

Se empleó la máquina Instron, que por ser una máquina de pruebas Universal, tiene una amplia versatilidad y factibilidad de instrumentación, todo lo cual permite que se puedan variar las velocidades de aplicación de carga y graficar, con muy buena precisión, las cargas de extrusión resultantes para la deformación plástica.

El empleo del plastómetro permitió obtener y controlar un rango apropiado de temperaturas, en el que se pueden realizar los altos porcentajes de deformación plástica requeridos en el proceso de extrusión de la aleación Zinalco. Para el plastómetro se diseñaron y construyeron varios dados, con el fin de variar en dimensiones y forma de la cavidad de salida, y así obtener diferentes relaciones de extrusión con el fin de estimar los parámetros de Johnson, empleados para calcular las cargas requeridas en el proceso para una determinada relación de extrusión.

El objetivo de este trabajo es optimizar los parámetros de extrusión directa de aleaciones Zinalco, para obtener las menores cargas requeridas y control de la producción, y con esto lograr la mejor calidad de los productos obtenidos mediante el proceso simulado a nivel laboratorio.

Los resultados de este trabajo permitirán determinar los rangos de las variables del proceso con mayor precisión para tener mejor control en las aplicaciones industriales de éstas aleaciones de Zinc.

## **CAPÍTULO 1 EL ZINALCO**

### **1.1 ANTECEDENTES Y PROPIEDADES FÍSICAS**

El Zinalco es una aleación basada en Zn desarrollada en el IIM-UNAM, que a diferencia de otras aleaciones de Zn, que solo se pueden procesar por fundición, es factible de trabajar mediante los procesos de deformación plástica existentes, como los empleados para conformar aleaciones ferrosas y no ferrosas usadas en Ingeniería, siendo el proceso de extrusión uno de los más apropiados para conformar los productos de Zinalco, en el que se pueden obtener piezas de sección transversal uniforme. Para el proceso de extrusión de Zinalco, no se han establecido completamente las variables que controlan el proceso, tales como temperatura, velocidad de deformación, geometría del dado, relación de extrusión, entre otras. Todos los parámetros anteriores son de gran importancia, ya que la microestructura y a su vez, las propiedades mecánicas de los productos obtenidos dependen de éstos, así como de la energía empleada y la calidad de los productos.

El Zinalco es una aleación que presenta excelentes propiedades mecánicas y buenas propiedades físico-químicas, lo que permite que se procese por muchos métodos diferentes, como son por fundición, por procesos de corte o por procesos de deformación plástica. Sin embargo, en algunos procesos de manufactura, muchos de los parámetros de procesamiento se están definiendo. El proceso de extrusión es uno de los procesos de conformado de productos de sección transversal continua que permite realizar grandes deformaciones, así como procesar grandes cantidades y diferentes formas de producto. En el caso de la extrusión de las aleaciones Zinalco, ésta permite tener una alta productividad con buenos acabados superficiales y excelentes tolerancias dimensionales. Esta aleación sigue en estudio, a pesar de los años que se han invertido en su investigación, debido a que las exigencias del proceso de manufactura son cada vez mayores. Se busca comprender y controlar completamente el fenómeno de deformación plástica, para así predecir y conocer de forma más precisa las características que tendrán los productos terminados. Por lo anterior, es importante identificar los efectos de las variables



del proceso, como son el efecto de la composición química (variación del contenido de Cu), velocidad de extrusión, temperatura de procesamiento, porcentaje de deformación y efecto de lubricación, ya que todo esto tiene un efecto en la carga de deformación, así como en el tipo de microestructura que se obtiene y de la que dependen las propiedades mecánicas del material procesado [1].

La aleación base en estudio, es la eutectoide Zn – Al con cobre, Zn-22%Al-2%Cu (ZINALCO), y en éstas se modificaron los contenidos de cobre. Sus principales propiedades físicas se muestran en la siguiente tabla 1.1 [2].

Tabla 1.1 Propiedades Físicas del Zinalco [2]

<b>Temperatura de Fusión</b>	694 A 754 °K
<b>Densidad</b>	$5.4 \times 10^{-3} \text{ Kgm}^{-3}$
<b>Módulo Elástico</b>	100 GPa
<b>Conductividad Eléctrica</b>	$0.0000059 \text{ ohm cm}^{-1}$
<b>Conductividad Térmica</b>	$125.5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
<b>Coefficiente de expansión térmica (entre 290 y 548°K)</b>	$25 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

## **1.2 COMPOSICION Y MICROESTRUCTURA DEL ZINALCO.**

La microestructura de la aleación ZINALCO, a temperatura ambiente, está compuesta por dos fases, la fase  $\alpha$ , que consiste en aluminio y menos del 1% de zinc disuelto y en la fase  $\beta$ , que básicamente consiste en zinc con menos del 0.5% de aluminio disuelto. En ambas fases, existen pequeñas cantidades de cobre disuelto [2].

Todo lo anterior se puede apreciar en el diagrama de fases de la aleación Zn – Al, Fig. 1.1, en una composición cercana a la eutectoide [3] [4].

En el presente trabajo, se realizaron pruebas de extrusión a diferentes temperaturas, entre el rango de 250 a 300 °C, esto es, alrededor de la temperatura eutectoide, con el fin de encontrar la temperatura apropiada a la que se procesa el Zinalco con la menor carga posible.

Se variaron las composiciones de cobre, entre 0% y 5% con la finalidad de analizar el efecto en las cargas aplicadas durante el proceso de conformado y, por consecuencia, en las propiedades mecánicas.

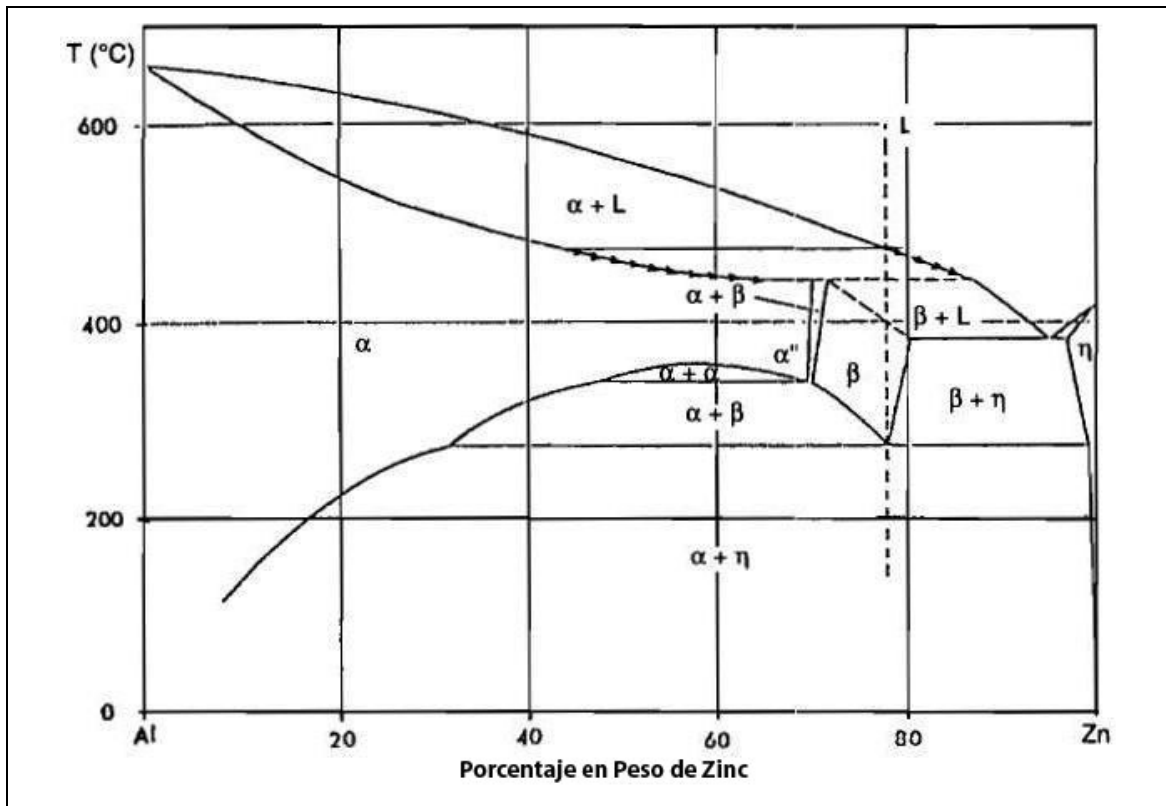


Fig. 1.1. Diagrama de Fases de aleaciones Al-Zn [5]

Las fases que se encuentran presentes en el diagrama mostrado son:

Fase  $\alpha$ . Es una solución sólida rica en aluminio con una estructura FCC.

Fase  $\alpha'$ . Es una solución sólida ordenada rica en aluminio.

Fase  $\eta$ . Es una solución rica en zinc, con una estructura HCP.

Fase  $\beta$ . Es una solución rica en zinc, con una estructura FCC.

Se sabe que las aleaciones Zn – Al pueden ser aleaciones superplásticas, lo que a su vez depende de la microestructura presente.

La aleación Zn – Al, con composición eutectoide, es superplástica por arriba de los 200 °C y frágil a temperatura ambiente. Al ser modificado su contenido de Cu (aproximadamente 2%) se observa un incremento de ductilidad a temperatura ambiente (del 10 al 180%), pero a mayor contenido existe una disminución. Las cantidades de Cu que se manejaron en este trabajo están entre el 0 y el 5 %, para analizar la variación de la ductilidad y analizar sus efectos en el conformado.

Se debe hacer notar que entre las composiciones de 45 a 68% de zinc en el diagrama Zn-Al, se presenta una separación de la fase  $\alpha$  a dos fases de  $\alpha$  y  $\alpha'$ , producto de condiciones termodinámicas inestables, en las que la fase  $\alpha$  solo puede estar en forma de dos fases separadas. Si la aleación se encuentra en esta región inestable del diagrama de fases, se forma una estructura finamente dispersa por todo el sistema que es lo que se conoce como “descomposición espinodal”, que se ve favorecida por un enfriamiento rápido. Esta descomposición se caracteriza por tener una microestructura finamente dispersa.

Se sabe que la extrusión de muchas aleaciones es más fácil si se realiza a altas temperaturas, pero en las aleaciones Zn – Al, se tienen que cuidar los cambios en la microestructura y en las fases presentes, ya que éstos pueden producir una reducción o incremento de las cargas requeridas para el proceso de extrusión.

### **1.3 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ZINALCO**

Las propiedades mecánicas del Zinalco, como la resistencia, varían considerablemente dependiendo de su contenido de cobre, el cual tendrá un importante efecto en la carga requerida para extruirlo [6], variando el contenido de éste de 0 % al 5 %. La aleación se destaca en su comportamiento mecánico, el cual es superior al de algunas aleaciones de Al y, así mismo cuenta con propiedades de resistencia específica similares a las del acero [7] [8]. En las siguientes tablas 1.2 y 1.3 se presentan algunas propiedades mecánicas del Zinalco y de otras aleaciones, así como las propiedades mecánicas que se obtienen del Zinalco al conformarse por diferentes procesos.

TABLA 1.2. Propiedades del Zinalco y de otras aleaciones. Propiedades del Zinalco conformado por diferentes procesos. [2] [9]

PROPIEDADES MECANICAS	ALUMINIO Y SUS ALEACIONES (RECOCIDO)	ACERO DE BAJO PORCENTAJE DE CARBONO Y BAJA ALEACION (RECOCIDO)	ZINALCO
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN (MPa)	170 - 480	300 - 850	270 - 410
DEFORMACIÓN MÁXIMA (%)	10 - 60	10 - 40	5 - 90
RESISTENCIA ESPECÍFICA ( $\sigma/\rho$ ) (MPa/g/cm <sup>3</sup> )	63 - 175	38 - 110	50 - 80

Tabla 1.3. Propiedades del Zinalco conformado por diferentes procesos. [2]

PROPIEDADES MECANICAS	FUNDICIÓN EN ARENA	FUNDICIÓN A PRESIÓN	EXTRUSIÓN	LAMINACIÓN
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN (MPa)	290 - 300	310 - 320	380 - 410	270 - 290
RESISTENCIA A LA CEDENCIA (MPa)	280 - 300	290 - 310	280 - 320	300 - 310
DEFORMACIÓN MÁXIMA (%)	3 - 5	8 - 10	30 - 35	80 - 100
DUREZA (HRB)	50 - 55	60 - 65	40 - 55	25 - 30

La determinación de la temperatura apropiada para la extrusión permitirá que el proceso se pueda realizar a menores cargas, así como evitará dañar al equipo o pondrá en peligro a las personas que laboran con este equipo. Existe un rango de temperatura donde el Zinalco tiene un comportamiento superplástico, que es entre 280 °C y 320 °C [1] [2], y es donde se espera que el material presente menor resistencia para la deformación mediante la extrusión.

La velocidad de deformación influye considerablemente en la resistencia a la deformación que presenta el material. Cuando la deformación se realiza a alta velocidad, el material presenta una mayor resistencia dando como resultado que la carga requerida para la extrusión sea mayor, consecuencia debida a la combinación de la sensibilidad del material a velocidades de deformación altas y al incremento de la fricción entre el material y las herramientas de extrusión [1].

La carga de extrusión depende de la deformación aplicada ( $Re$ ). La forma de evaluar la deformación lograda es con la Relación de Extrusión ( $Re$ ), que es el porcentaje de reducción de área, o en otras palabras es la relación entre el área inicial del tocho a extruir entre el área de la cavidad del dado por la que saldrá el producto. Para muchas aleaciones, la carga de extrusión se incrementa conforme la relación de extrusión aumenta [10] [11].

#### **1.4 DESARROLLO DE LA MICROESTRUCTURA**

Las propiedades del Zinalco dependen de la microestructura presente, la cual está formada por una mezcla de dos fases, una fase  $\alpha$ , rica de aluminio y otra  $\beta$ , rica en zinc. Esta es la estructura bifásica, que se determina en el diagrama de equilibrio Al-Zn y se presenta a temperatura ambiente. Los tratamientos térmicos previos, que pueden hacerse a las aleaciones del Zinalco modifican la cantidad y geometría de las fases. Después de la fundición y la solidificación, cuando a la aleación se calienta a la temperatura por arriba de la eutectoide ( $277^{\circ}\text{C}$ ) y se enfría lentamente, se obtiene como resultado una estructura con zonas de aspecto laminar (similar a la de la perlita en el acero), donde las dos fases se agrupan en forma de láminas finamente alternadas [5]. En muestras que se calientan arriba del eutectoide y se conservan durante largos periodos para después enfriar lentamente (recocido) la estructura se compone de finas partículas esféricas producto de la globulización de las láminas y en algunas zonas a un incremento en la distancia entre ellas. Si se enfría rápidamente desde la misma temperatura produce una estructura de granos finos equiaxiales, lo que puede generar un mecanismo especial de deformación plástica [2] [8].

## **1.5 MÉTODOS DE PROCESAMIENTO**

Algunos de los métodos de procesamiento con los que se pueden conformar al Zinalco son [7]:

- **FUNDICIÓN.** Utilizando los procesos de moldeado en arena, molde permanente, por gravedad o por inyección a baja presión, el Zinalco puede sustituir al hierro gris, aluminio, bronce y latón, requiriendo menor energía debido a la baja temperatura de fusión de la aleación.
- **MAQUINADO.** El Zinalco puede ser maquinado rápida y económicamente gracias a su compleja estructura metalúrgica que permite la formación de una viruta corta y un acabado superficial brillante. El maquinado en torno a temperatura ambiente y con una penetración de la herramienta de 1 mm, produce una viruta corta y frágil y bajo consumo de energía para cortar lo que denota una alta maquinabilidad.
- **EXTRUSIÓN.** La extrusión del Zinalco no requiere instalaciones especiales, pudiéndose utilizar los mismos equipos empleados para extruir aluminio. Su resistencia a la cedencia que resulta de este proceso otorga una excelente estabilidad y rigidez en cualquier configuración arquitectónica o estructural.
- **LAMINACIÓN.** La principal cualidad que presenta la lámina de Zinalco además de su resistencia a la corrosión, es la posibilidad de deformarse utilizando la propiedad de ser superplástico, requiriendo menor energía para la deformación plástica.
- **ACABADOS.** El Zinalco se puede pintar electrostáticamente, cobrizar, niquelar, cromar, anodizar y pavonar, lo que mejora aún más su resistencia a la oxidación y corrosión, y favorece su aspecto estético.

- **SOLDABILIDAD.** El Zinalco es perfectamente soldable con aleaciones a base de zinc que no requieren de una alta tecnología para usarse, ya que su aplicación es semejante a la de soldadura con estaño -plomo. La soldadura se difunde fácilmente en la aleación, dando alta resistencia mecánica a la unión.

Algunas de las aplicaciones que tiene y que podría tener el Zinalco son las siguientes:

- **ARQUITECTURA.** Perfiles extruidos.
- **AUTOPARTES.** Carburadores, bombas y partes para transmisión.
- **CERRAJERIA.** Llaves extruidas e inyectadas, piezas de cerradura, candados.
- **CONSTRUCCIÓN.** Intersecciones de estructuras tridimensionales, techos de lámina.
- **CONTROL DE FLUIDOS.** Válvulas, filtros, reguladores.
- **INSTALACIONES ELÉCTRICAS.** Condulets, cajas de interruptores, soportes para cables.

## **CAPÍTULO 2      EL PROCESO DE EXTRUSIÓN**

### **2.1 GENERALIDADES**

El proceso de extrusión es un proceso de deformación plástica de un tocho de material metálico previamente calentado, el cual es forzado, aplicando esfuerzos de compresión, para que fluya a través de un dado metálico o de cerámico, que cuenta con una cavidad de sección transversal más pequeña que el área del material original.

El proceso de extrusión se utiliza para producir secciones sólidas como barras y perfiles, a partir de un tocho sólido empleando dados rectos o cónicos. Para ciertas aleaciones, también pueden producirse tubos y secciones huecas empleando dados tipo puente o con el uso de mandriles. Pueden producirse tubos sin costura y secciones huecas empleando tochos con perforaciones o utilizando el sistema de prensas perforadoras o por el sistema de mandril.

La amplia aplicación del proceso de extrusión se debe a las excelentes características de los productos obtenidos, como son:

1. La extrusión es un proceso de deformación plástica continua que permite obtener grandes volúmenes de producción debido a que al reducir la sección transversal se incrementa la sección longitudinal.
2. Se obtienen productos de sección transversal uniforme, de formas complejas y difíciles de obtener mediante otros procesos de conformado. Existen limitantes en cuanto al tamaño de los productos, ya que deben ser menores a los cilindros de las prensas que lo extruyen.
3. La precisión dimensional es muy buena, sobretodo si se realiza a bajas temperaturas, los productos obtenidos son de excelente acabado superficial.

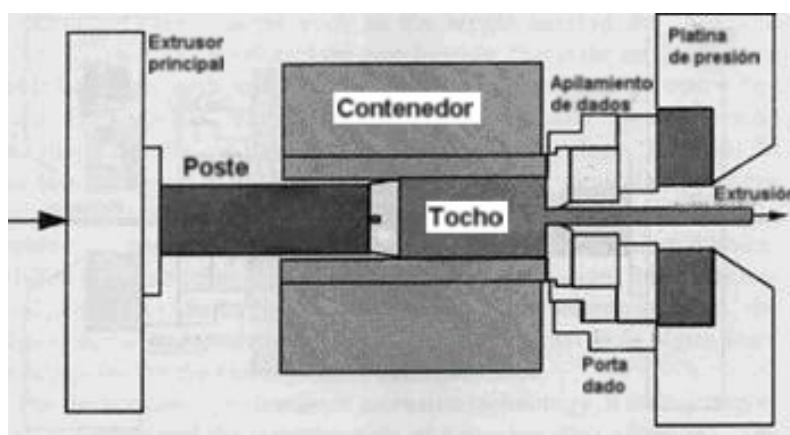
Existen dos principales métodos de extrusión que son directa e inversa.



## **2.2 EXTRUSIÓN DIRECTA**

En la extrusión directa el tocho precalentado es colocado en el cilindro de la prensa llamado cámara de extrusión. En esta sección el material es forzado a pasar a través del dado por medio de un pistón. La dirección del flujo del metal es la misma que la del movimiento del pistón. Durante este proceso el tocho se desliza sobre las paredes de la cámara, requiriendo un incremento en la presión sobre el pistón para vencer la fricción entre la superficie del tocho y la cámara. El efecto de los altos esfuerzos de compresión entre el pistón, cámara y dado en el tocho, reducen la posibilidad de agrietamiento en el material, ésta es una de las razones importantes por las que se emplea la extrusión para manufacturar materiales que son difíciles de deformar, como aceros inoxidables y aleaciones base níquel [11] [12] [13].

No toda la longitud del tocho es extruída. Un porcentaje del tocho comprimido, llamado “descarte”, no se extruye y permanece en un extremo del pistón al final del ciclo de extrusión. Esta parte es expulsada de la prensa durante la etapa muerta del ciclo de extrusión y reciclada posteriormente. A continuación el perfil extruido es transferido a la prensa de estirado para un proceso posterior. En la Fig 2.1 se presentan los principales componentes del equipo de extrusión directa durante el proceso. Y en la Fig. 2.2 se aprecia la fotografía de un perfil extruido de aluminio.



*Fig. 2.1. Extrusión Directa, se muestran los principales componentes.[14]*



Fig. 2.2. Equipo de extrusión y producto extruido. Cortesía: Aluminios CONESA.

### **2.3 EXTRUSIÓN INDIRECTA O INVERSA**

En la extrusión indirecta o inversa, el dado localizado al extremo frontal del pistón perforado, se mueve de manera relativa con respecto a la cámara. El dado es empujado a través de la cámara o la cámara es empujada sobre el dado. No hay movimiento relativo entre el tocho y la cámara contenedora. Por lo tanto, una ventaja del proceso de extrusión inversa es que no hay fricción durante el proceso, entre el tocho y la cámara. El flujo del metal es más uniforme durante la extrusión inversa que en la directa. Esto, generalmente, se relaciona a una sección transversal más uniforme del producto, a lo largo de toda su longitud. También, se produce una sección de descarte, como en el proceso de extrusión directa, la cual es manejada de la misma forma. El perfil extruido también se transfiere a una prensa de estirado para un proceso de enderezado final. Todos los componentes de un equipo de extrusión inversa se pueden apreciar en la Fig. 2.3

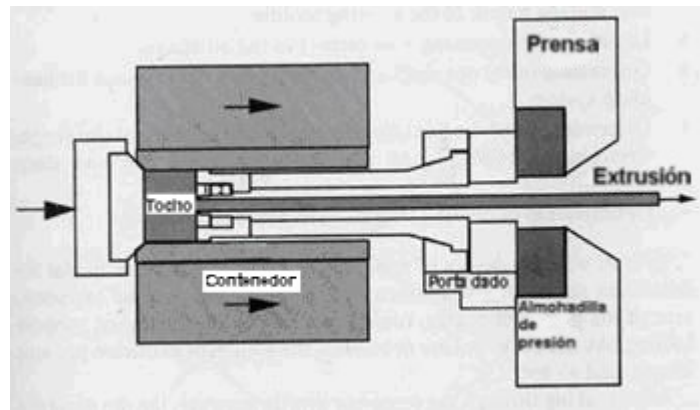


Fig.2.3. Extrusión Inversa. Se muestran los principales componentes del equipo.[14]

## **2.4 DISEÑO DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN**

Realmente, el proceso de extrusión empieza con el diseño del proceso, lo cual lleva al diseño basado en el producto y su empleo, que son los que determinan muchos de los parámetros de producción. El tipo de maquinabilidad, acabado y medio ambiente de trabajo llevarán a la elección de la aleación que deberá ser extruída. La función del perfil determinará el diseño de su forma y, por lo tanto, el diseño de la forma del dado. Una vez que esto se ha definido, el proceso de extrusión inicia con el tocho del material del cual los perfiles serán extruidos. Antes de la extrusión, al tocho se le debe disminuir su resistencia mediante un calentamiento. El tocho caliente es colocado en la prensa de extrusión y por medio del pistón se empuja con un disco que a su vez empuja al material a través de la apertura de tamaño preciso, conocido como dado, que tiene la forma deseada a producir [10]. En la Fig. 2.4 se pueden apreciar todos los elementos de una prensa hidráulica de extrusión durante el proceso.

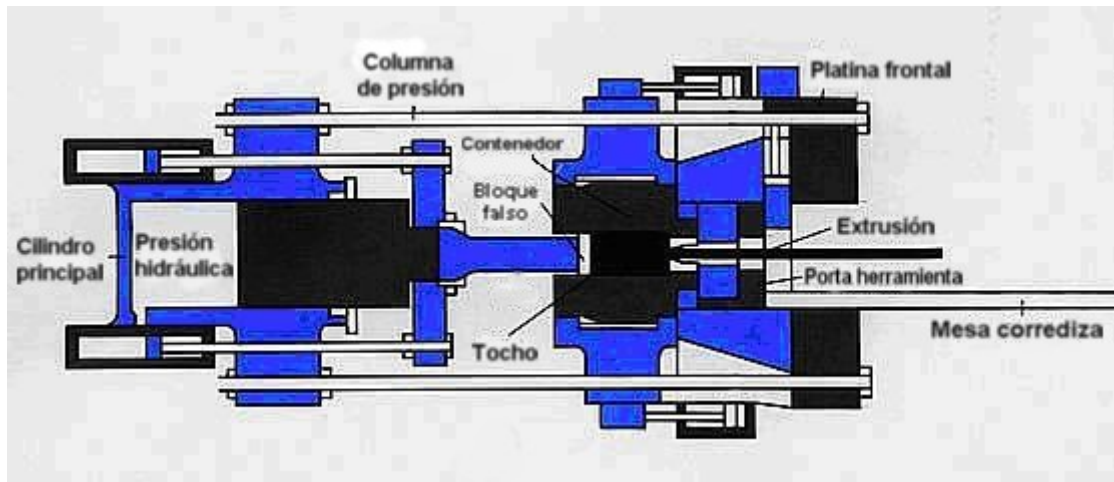


Fig. 2.4. Representación esquemática de una prensa de extrusión horizontal. La extrusión es de izquierda a derecha.[14]

Como se mencionó, en el proceso de extrusión directa, el dado permanece estacionario y el pistón presiona al material a pasar a través del dado. En el proceso de extrusión inversa, frecuentemente, el dado está contenido en la cavidad del pistón, y el tocho permanece estacionario en un extremo, forzando al material a que fluya dentro del pistón adquiriendo la forma del dado [10] [11] [12] [13].

La extrusión de metales genera perfiles de una amplia variedad de formas útiles y de geometrías muy complejas. En la Fig. 2.5 se aprecia un perfil de aluminio al inicio y durante la extrusión.



Fig. 2.5. Imagen izquierda, al inicio de la extrusión. Imagen derecha, producto continuo extruido. Cortesía: Aluminios CONESA.

## 2.5 EL TOCHO

En el proceso de extrusión, el tocho es el material de partida en forma cilíndrica, puede ser sólido o de forma hueca, y de la misma longitud que la longitud de la cámara de la prensa. Generalmente, producido por fundición, pero puede formarse por un proceso de deformación o polvos compactados y frecuentemente cortado a la longitud de la cámara.

Los materiales que son procesados son muchos, destacando el aluminio, el cual es aleado para mejorar sus propiedades y así se facilite el proceso de extrusión y se obtenga un mayor número de productos. La longitud del tocho varía de acuerdo a diversos factores, entre ellos la longitud deseada del perfil final, la relación de extrusión ( $Re$ ), la longitud del desplazamiento del pistón y los requerimientos de la prensa de extrusión. Las longitudes estándar pueden ir de 660 a 1830 mm. El diámetro externo puede variar de 76 a 838 mm, Los diámetros más comunes son de 155 a 228 mm. En la Fig. 2.6 se muestran los pasos desde el calentamiento del tocho, extrusión y estirado hasta el tratamiento térmico del producto.



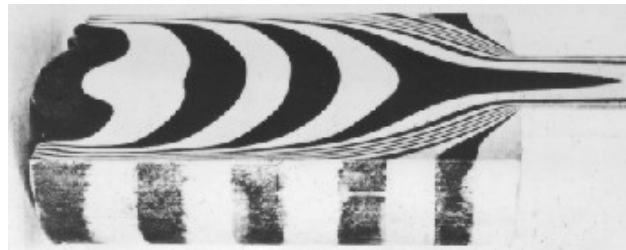
Fig. 2.6. Se muestran los pasos básicos para realizar la extrusión de perfiles de aluminio. Cortesía: Aluminios CONESA.

El proceso de extrusión se realiza una vez que se elige la forma final del perfil deseado, se elige la aleación apropiada y el dado se ha preparado. Entonces el tocho y el dado son calentados. Durante la extrusión, el material está sólido, pero una vez que se calienta en el horno disminuye su resistencia [12]. La temperatura de calentamiento depende del tipo de aleación.

El proceso de extrusión da inicio cuando el pistón empieza a aplicar la presión al tocho dentro de la cámara. Las prensas hidráulicas se diseñan para aplicar presiones que varían desde 100 a 15,000 tons. Estas capacidades de presión de las prensas determinan que tan grandes son las piezas extruídas. El tamaño

de la mayor sección transversal se circunscribe al diámetro del círculo más grande del pistón.

Una vez que la presión es aplicada, el tocho se comprime contra el dado, disminuyendo la longitud y aumentando el diámetro hasta que queda limitado por el contacto con las paredes de la cámara [15]. Entonces, la presión se incrementa, y el material empieza a fluir a través del dado, saliendo en el otro extremo del orificio con la forma del perfil deseado [12] [16]. Aproximadamente, 10% del tocho permanece en la cámara. La extrusión es detenida, se corta el perfil en la zona próxima al dado y el material sobrante es removido y reciclado. Después de salir del dado el producto deseado, puede ser tratado térmicamente o tratado mecánicamente.



*Fig. 2.7. El material es forzado a salir de la cámara a través del dado, el centro del tocho fluye más rápidamente que la periferia, como se ilustra en las bandas negras de esta fotografía. La periferia, que permanece como residuo, es reciclada posteriormente. Cortesía: Aluminios CONESA.*

Las velocidades de extrusión varían dependiendo de la aleación usada y la forma del dado. Si se requiere extruir una aleación de alta dureza en una forma compleja, ésta puede emerger de la prensa tan lentamente como 0.5 m/min; una aleación de baja dureza que se extruye en una forma simple puede extruirse a una velocidad de 30 metros por minuto o más rápido. En general se prefieren velocidades mayores para el aluminio, magnesio y cobre y las velocidades menores para los aceros [11].

Dependiendo del tamaño del tocho y la abertura del dado con una corrida de la prensa, se puede producir un perfil extruido tan largo como 60 m.

El perfil extruido se deposita en un carrusel que se aleja de la prensa. El material extruido es enfriado, dependiendo de la aleación, después de emerger del dado, en forma natural o a través del uso de aire forzado o con agua. Para las aleaciones de aluminio, esto es un paso crítico para asegurar las propiedades metalúrgicas después del tratamiento de envejecimiento.

ESTIRADO. Se puede emplear un proceso de estirado o enderezado, después de que se haya realizado el enfriamiento para corregir cualquier alabeo que pudo haber ocurrido durante la extrusión. También, el estirado puede servir para generar en el material un porcentaje de trabajo en frío en los productos que posteriormente se pueden cortar a la longitud deseada (Fig. 2.1).

## **2.6 CARGAS Y FLUJO DEL METAL EN EL PROCESO DE EXTRUSIÓN**

Para realizar la extrusión, las principales variables que influyen en la fuerza requerida son; el tipo de extrusión (directa o inversa), la relación de extrusión ( $Re$ ), la temperatura de deformación, la velocidad de deformación y las condiciones de fricción del material con el dado y la cámara [17].

En la Fig. 2.8 se grafica la presión de extrusión contra el recorrido del pistón para extrusión directa o inversa. La presión de extrusión es la fuerza de extrusión dividida entre la sección transversal del tocho. La rápida elevación de la presión durante el trayecto inicial del pistón es debida a la compresión inicial del tocho para llenar la cámara de extrusión. En la extrusión directa el metal empieza a fluir a través del dado a un valor máximo de presión y luego cae bruscamente. Conforme el tocho se extruye a través del dado, la presión requerida para mantener un flujo continuo de material disminuye con la reducción de la longitud del tocho en la cámara. Para la extrusión inversa, no existe movimiento relativo entre el material y las paredes de la cámara, por lo tanto, la presión de extrusión es aproximadamente constante con respecto al movimiento del pistón y representa el esfuerzo requerido para deformar al metal a través del dado.

El proceso de extrusión inversa parece ser un proceso muy atractivo, pero tiene limitantes en cuanto a los tamaños logrados del producto, por lo que el más empleado es el proceso de extrusión directa [6] [18] [19].

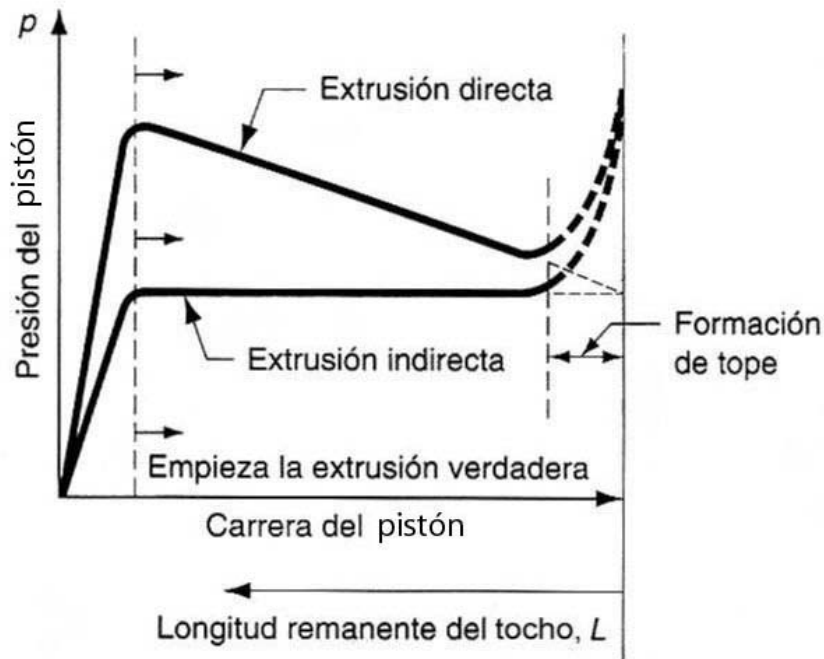


Fig. 2.8. Presión de extrusión directa vs. Presión de extrusión indirecta.[18]

En la extrusión directa, el producto emerge del dado en la dirección del movimiento del émbolo o pistón. Si el dado es recto, existe una zona de material que permanece estático llamado "material muerto", el cual genera una zona de fricción continua (ver Fig. 2.9 y 2.10). Esto es una ventaja en la extrusión en caliente, donde existen problemas de oxidación, por lo que el material está saliendo en forma constante del dado sin oxidar. En la extrusión en frío, sin lubricación, se emplean dados cónicos para generar un buen acabado superficial y disminuir la energía requerida para el proceso [13] [20]. En la Fig. 2.11 se observan diferentes patrones de flujo de extrusión, en los materiales en los que se presenta, el nivel de fricción existente y los posibles defectos que pueden generarse al presentarse el tipo de patrón de flujo señalado.



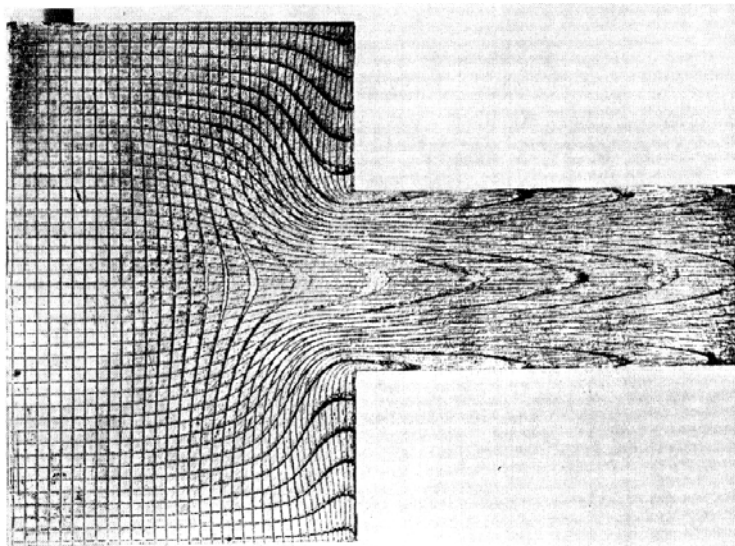


Fig. 2.9. Patrón de Flujo del proceso de extrusión de una aleación ferrosa.[19]

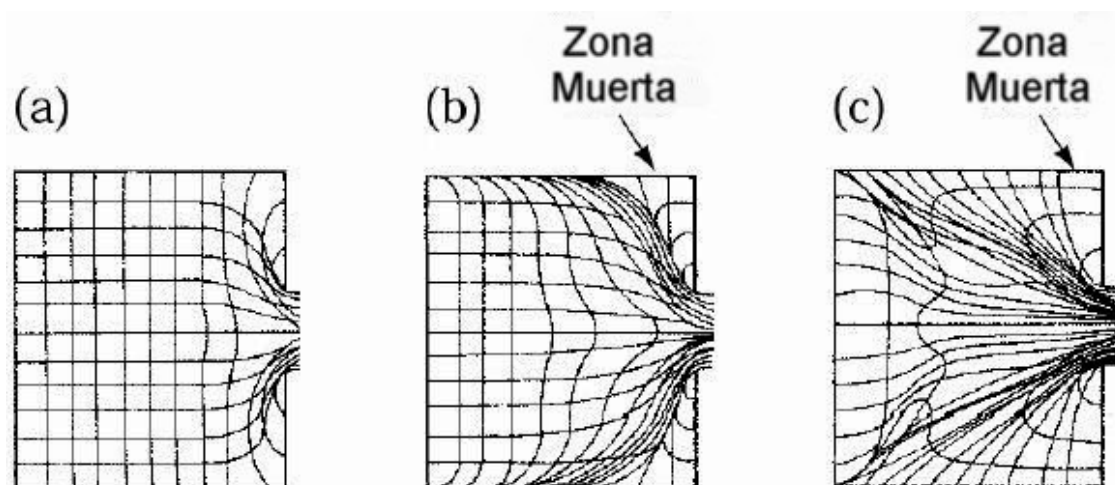


Fig. 2.10. Patrones de flujo.[13]

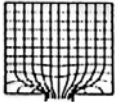
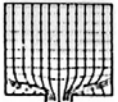
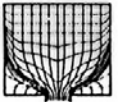

<b>Tipo de flujo</b>				
	S	A	B	C
<b>Tipo de material</b>	Homogéneo	Homogéneo	Homogéneo	No homogéneo
<b>Material de ejemplo</b>	Teórico	Pb, Al, Fe Con lubricación	Cu, Al, Al aleaciones	Mg, α- y β-latón
<b>Fricción</b>	Nada	Baja	Alta	Alta
<b>Defectos</b>	Nada	Nada	Defectos Sub-superficiales	Defectos de extrusión

Fig. 2.11. Patrones de Flujo del proceso de extrusión.[14]

Mediante la extrusión en caliente o en frío se pueden generar una amplia variedad de partes sólidas, huecas y semihuecas.

En la extrusión en caliente, se requieren menores presiones para el proceso y es posible generar una microestructura de grano fino debido a la recristalización. En la extrusión en caliente no existe incremento en la resistencia media del material por el endurecimiento, pero si por la velocidad de deformación.

La presión puede obtenerse a partir de un valor de esfuerzo medio de flujo por el factor de extrusión  $Q_e$ . La experiencia ha demostrado que el factor de extrusión depende fuertemente de la relación de extrusión ( $Re$ ).

Empleando la ecuación de Johnson, el factor de extrusión puede estimarse por la relación 2.1 [18].

$$Q_e = a + b \ln Re \quad \dots\dots\dots(2.1)$$

Donde  $Re$  es la relación de extrusión, que en la práctica comercial va aproximadamente de 10 a 100, aún cuando pueden ser mayores (400) en aplicaciones especiales, o menores para materiales menos dúctiles, aunque por lo general deben ser de 4, como mínimo, para hacer que el material fluya en forma plástica por toda la pieza.

En la práctica comercial los productos extruidos tienen menos de 7.5 m de longitud, por la dificultad de manejar tramos más grandes, los cuales pueden ser de hasta 30 m. Los productos obtenidos pueden variar en geometría y así obtener algunas muy complejas. La mayoría son formas que se circunscriben en un círculo de 0.25 m, en el aluminio el círculo puede llegar hasta de 1 m, lo que implica grandes presiones de extrusión.

En el proceso de extrusión donde no existe lubricación se debe aplicar presión para vencer también la resistencia a la fricción. El equipo que se emplea para este tipo de extrusión debe ser capaz de aplicar la presión para vencer la resistencia a la deformación y también la presión para vencer la resistencia de la fricción. Los coeficientes de fricción para la extrusión son difíciles de obtener, resultando valores muy altos, pero se puede considerar el valor máximo en el que el material está unido a la pared. Como se considera que el material está unido a la pared, se requiere una presión adicional para cortar el material, y ésta presión se debe sumar a la presión calculada para deformar.

Considerando que el material se está cortando, la fuerza requerida es la estimada en la relación 2.2 [18].

$$F_f = \tau \pi D l \dots\dots\dots(2.2)$$

Donde:

$\tau$  = Resistencia al corte

D = Diámetro del tocho

l = Longitud del tocho

En el pistón, la presión total deberá ser igual a la suma de la carga para deformar y la carga para cortar al material [18]. Estimada en la ecuación 2.3

$$P_e = \sigma(Q_e + 2l/D) \dots\dots\dots (2.3)$$

Donde  $\sigma = C \dot{\epsilon}^m \dots\dots\dots (2.4)$

Donde C= Coeficiente de la resistencia

m= Exponente de la sensibilidad a la velocidad de deformación

$\dot{\epsilon}$  = Rapidez de deformación [s<sup>-1</sup>]

En la extrusión en caliente, el efecto de la rapidez de deformación es muy importante. Lo recomendado es hacer un análisis para estimar la rapidez de deformación media, en la cual se obtiene un esfuerzo medio.

El valor de rapidez de deformación media se puede estimar por la relación 2.5 [10]:

$$\dot{\epsilon} = (6vD_0^2 \tan \alpha \ln Re) / (D_0^3 - D^3) \dots\dots\dots (2.5)$$

donde  $\alpha$  es el ángulo medio del cono de la extrusión, que para muchos materiales puede ser tomado como 45° debido a la zona de material muerto o se toma la mitad del ángulo del cono cuando se usa un buen lubricante y v es la velocidad de aplicación de presión del pistón.

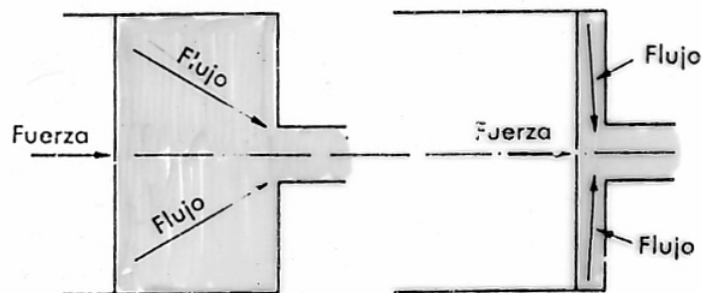


Fig. 2.12. Flujo del material en la etapa final del proceso de extrusión, razón por la cual se incrementa la presión de extrusión en la última etapa del proceso cuando se extruye el descarte.[3]

En la extrusión es importante el patrón de las líneas de flujo del metal, debido a su influencia sobre la calidad superficial y las propiedades mecánicas del producto final. El material fluye en sentido longitudinal, por lo que los productos tienen una estructura de grano alargada. Una práctica común es cortar el tocho a lo largo, para marcar una red de cuadros. Se ponen las dos mitades en la cámara juntas y se extruyen. Posteriormente, se separan los productos y se ve el patrón de extrusión (ver Fig. 2.7 y 2.9). En las figuras 2.10 y 2.11 se muestran patrones de líneas de flujo característicos obtenidas mediante esta técnica en extrusión directa con dados rectos. En estos patrones de flujo se aprecia la magnitud de fricción existente entre el material y la cámara. Se pueden apreciar las zonas de metal muerto, donde el metal en las esquinas esencialmente es estacionario.

Con las formas de las líneas de flujo del metal se puede estimar la cantidad de fricción y la posible presencia de defectos superficiales, como se aprecia en la Fig. 2.11.

## **2.7 EXTRUSIÓN EN CALIENTE Y EXTRUSIÓN EN FRÍO**

**EXTRUSIÓN EN CALIENTE.** Como ya se mencionó, para los metales que no cuentan con la ductilidad suficiente a temperatura ambiente, la extrusión se hace a temperatura elevada, para reducir las fuerzas requeridas. El incremento de temperatura genera condiciones especiales, por ejemplo, puede producir desgaste en los dados y volver problemático el enfriamiento del tocho en la cámara, lo que causa alta deformación no uniforme. Como el tocho está caliente se forma sobre él una capa de óxido, esta película puede ser abrasiva y afectar el patrón de líneas de flujo del material, perjudicando el acabado superficial [17]. Fig. 2.11.

EXTRUSIÓN EN FRÍO. Se aplica a materiales que tienen muy buena capacidad de deformación plástica a temperatura ambiente y tiene grandes ventajas tecnológicas y comerciales sobre la extrusión en caliente, tales como:

- Control sobre las propiedades mecánicas.
- Control sobre las tolerancias dimensionales.
- Excelente acabado superficial, lo que reduce pasos de manufactura posteriores.

## **CAPÍTULO 3    DESARROLLO EXPERIMENTAL**

### **3.1 INTRODUCCIÓN**

El proceso de extrusión es un proceso de conformado de producción intermitente, diseñado para grandes volúmenes, en el que es importante tener controladas todas las variables, pero sobre todo las cargas que se demandan en el proceso. Se sabe que este proceso se aplica principalmente en aleaciones del aluminio a temperaturas promedio de 400 a 550°C, mientras que para aleaciones de Zinalco las temperaturas de procesamiento se encuentran entre 240 a 300°C, lo que puede representar un ahorro sustancial en la energía empleada en el procesamiento. Como ya se mencionó, las cargas de extrusión dependen de muchos parámetros de procesamiento, lo que complica el control simultáneo de todos ellos. Entre los más importantes se encuentran la temperatura a la cual se procesa el material, la velocidad de deformación, la composición química de la aleación a procesar, las condiciones metalúrgicas en las que se encuentra el material inicial de partida, el lubricante empleado y el diseño de los dados. En este capítulo se mencionan los rangos de variación de las variables involucradas.

### **3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL**

Diversas muestras de la aleación Al-Zn-Cu, con 2% de Cu se extruyeron entre el rango de temperaturas de 250 a 300 °C, a una misma velocidad y cantidad de deformación, para determinar la temperatura en la que se requiere menor carga y así poder realizar los cambios de las otras variables y analizar su efecto en la carga requerida en el proceso de extrusión. Una vez que se obtuvo la temperatura a la que se extruye con menor carga se modificó la velocidad de aplicación de carga entre el rango de velocidades disponibles en el equipo de pruebas, teniendo presente la limitante de máxima carga que puede aplicarse en el equipo que es de 3 Tons., antes de generar una falla en el pistón. Posteriormente se modificaron las cantidades de deformación (relación de extrusión), diseñando y construyendo 4 distintos dados, deformando a las aleaciones con los contenidos de Cu disponibles

(0, 1, 2 y 5%Cu) a una misma temperatura y velocidad de deformación, para evaluar el efecto del porcentaje de deformación y del contenido de Cu sobre la carga.

Otra variable que se analizó es el efecto del tipo de microestructura obtenida de 3 condiciones metalúrgicas. Primero de la microestructura obtenida del proceso de colada, de la microestructura obtenida del proceso de recocido y por último la obtenida del proceso de calentamiento de homogenización y enfriamiento rápido, para una misma composición (2%Cu) procesada a las diferentes velocidades de deformación disponibles.

Con este diseño experimental se evaluará las cargas requeridas para realizar el proceso, a los diferentes porcentajes de deformación y con los distintos contenidos de Cu, para la misma temperatura inicialmente obtenida y establecer, si existe, una tendencia en la carga requerida en el proceso a diferentes porcentajes de deformación y contenido de Cu, con el fin de estimar las cargas requeridas a mayores porcentajes de deformación que pueden llevarse a cabo en procesos industriales.

Las condiciones metalúrgicas (estructura de colada, de recocido, y de calentamiento y enfriamiento rápido) de estas aleaciones son importantes para la cantidad de deformación plástica que puede realizarse, por lo que para un mismo contenido de Cu se determinó el comportamiento de las cargas de extrusión a diferentes temperaturas y a diferentes velocidades de carga.

Para la aleación con 2% Cu se determinó el tipo de patrón de flujo generado durante el proceso de extrusión y caracterizarlo.

Por último, se evaluaron las propiedades mecánicas del material procesado para los distintos contenidos de Cu y porcentaje de deformación realizados. Todo lo anterior caracterizando la microestructura resultante.



### **3.3 MATERIAL**

El material de partida es una aleación Zinalco la cual se varió la composición del contenido de Cu, desde 0%, 1%, 2% y 5%.

Todas las muestras del material de partida, con la composición química elegida, se fundieron a una temperatura de 520°C y se procedió a ser vaciada en un molde de cerámica en forma cilíndrica, previamente calentado a una temperatura de 200°C. Una vez que solidifica el material, se rompe el molde y se extraen las piezas, las cuales fueron cortadas en secciones de 9.2 mm de diámetro y de 35 mm de largo, dimensiones inferiores a las del diámetro interior de la cámara del plastómetro, el cual se empleó para la experimentación del proceso de extrusión.

Las condiciones metalúrgicas del material a extruir fueron las generadas por la solidificación del material en el molde cerámico, así como las producidas por un recocido a 300 °C durante 40 horas y enfriamiento lento, otras fueron calentadas a 300 °C durante 40 horas y enfriadas bruscamente; esto con el fin de analizar el efecto de los tratamientos sobre la microestructura y por ende, sobre las condiciones y resultados de extrusión. El tratamiento de recocido se efectuó con el propósito de remover la estructura dendrítica de colada y se sabe que entre el tiempo de 20 a 40 horas se logran los mayores valores de deformación plástica, debido al refinamiento del grano presente adicional a la estructura laminar, producto de la reacción eutectoide. Las muestras enfriadas bruscamente de estas temperaturas de recocido conservan las estructura fina sin la presencia de la estructura laminar que reduce la capacidad de deformación [21].

### **3.4 TEMPERATURAS DE PROCESAMIENTO**

La resistencia de todos los materiales procesados por deformación plástica a alta temperatura depende fuertemente de la velocidad de deformación y de la temperatura a la cual se procesa. Para establecer cuales son las temperaturas más apropiadas de procesamiento, el material a extruir fue calentado fuera del plastómetro en un rango de 280 a 320 °C y dentro del plastómetro se mantenía a temperaturas desde 240 °C hasta 300 °C, en este rango se encuentran las temperaturas de superplasticidad de estas aleaciones. El calentamiento en el plastómetro se realizó mediante resistencias eléctricas que rodeaban a la camisa, y el control se realizó con termopares que permiten un control de temperaturas en un rango de  $\pm 3$  °C.

Se realizaron extrusiones de la misma aleación a temperaturas desde 240, 250, 260, 270, 280, 290 y 300°C, para encontrar la temperatura o rango de temperaturas de extrusión apropiadas, esto es, las temperaturas a la que se procesa con la menor carga posible. Se realizaron experimentos a diversas velocidades de extrusión y empleando un lubricante que disminuya la fricción, con el fin de obtener la temperatura de extrusión en la que se obtiene la menor carga y mejor acabado superficial de las piezas extruidas. El lubricante empleado fue un compuesto de silicones resistente a temperaturas mayores a 100 °C, aplicado inicialmente en el material a extruir.

### **3.5 VELOCIDADES DE DEFORMACIÓN**

La velocidad de deformación o de procesamiento, es la velocidad con la cual se aplican las fuerzas de compresión, mediante el pistón, sobre el cilindro inicial y contra el dado. Como se mencionó, la velocidad de aplicación de carga determina la resistencia que presenta el material a deformarse, que como se sabe, a mayor velocidad de procesamiento el material presentará mayor resistencia a la deformación [12][17]. La deformación se realizó a temperaturas a las cuales el proceso se considera trabajo en caliente por lo cual existe una importante sensibilidad a la velocidad de deformación.

A mayor velocidad de deformación, los esfuerzos se elevan, lo que en muchas aleaciones significa que el proceso de recristalización no puede mantenerse al mismo ritmo que el endurecimiento por deformación, lo que puede estimarse en la relación 2.4.

El control de la velocidad de aplicación de carga, que se realiza mediante el pistón modificado del plastómetro, se realizó con el control de desplazamiento del cabezal de la máquina de pruebas universal Instron modelo 1125. La variación de la velocidad se realizó desde un rango de 1 a 100 mm/min, tomando los rangos de desplazamiento disponibles de la máquina de 1, 2, 5, 10, 15, 20, 40, 50 y 100 mm/min, para analizar el efecto de la velocidad de aplicación de deformación sobre los valores de carga máxima de extrusión obtenidos.

### **3.6 EQUIPO DE EXTRUSIÓN**

El equipo de extrusión empleado es un plastómetro el cual cuenta con una cámara de extrusión en la que se puede variar la temperatura desde 200 °C hasta 300 °C, en incrementos de 10°C. En el extremo de la cámara se cuenta con un portadados, el cual se integra a la cámara mediante un conector de dado, cuenta con la posibilidad de intercambiar los dados con facilidad. Todo lo anterior se puede apreciar en la Fig. 3.1.

En el extremo opuesto, el pistón se adapta al cabezal de la máquina universal de pruebas electromecánica, marca Instron, modelo 1125, para aplicar las distintas cargas requeridas en el proceso de extrusión. El sistema de calefacción, el cual consiste de cinturones de resistencias eléctricas, se encuentra adaptado directamente a la cámara de extrusión y el control de la temperatura es independiente a la máquina de pruebas, permitiendo precisiones de  $\pm 3$  °C.

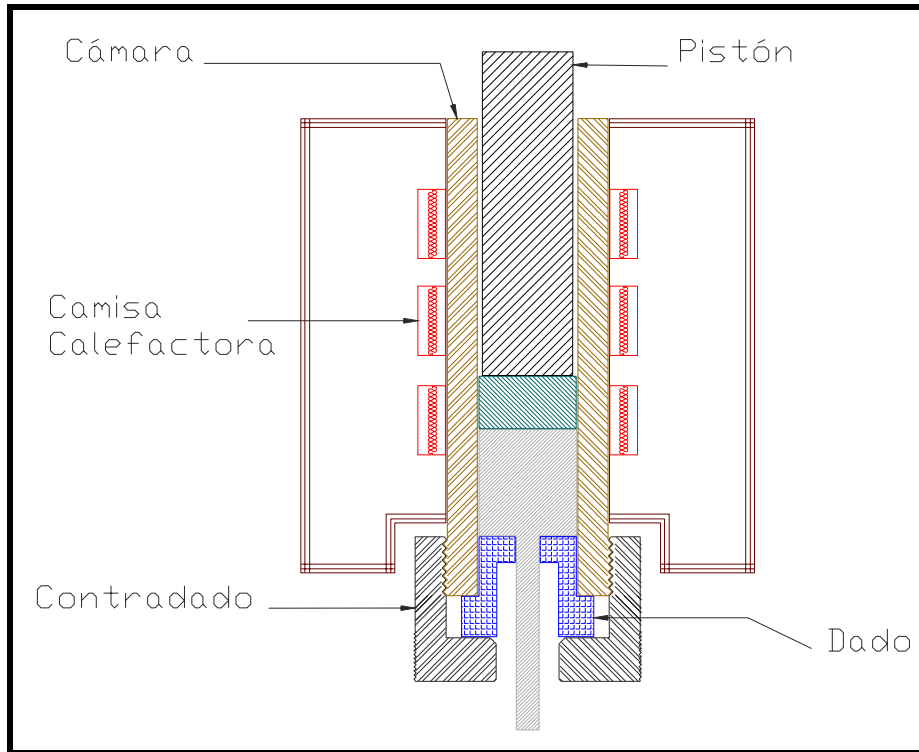


Fig. 3.1. Arreglo del equipo de extrusión.

En la Fig. 3.2 se puede apreciar el arreglo del pistón, cilindro y dado, así como la posición que guardaba el material extruido durante el proceso.

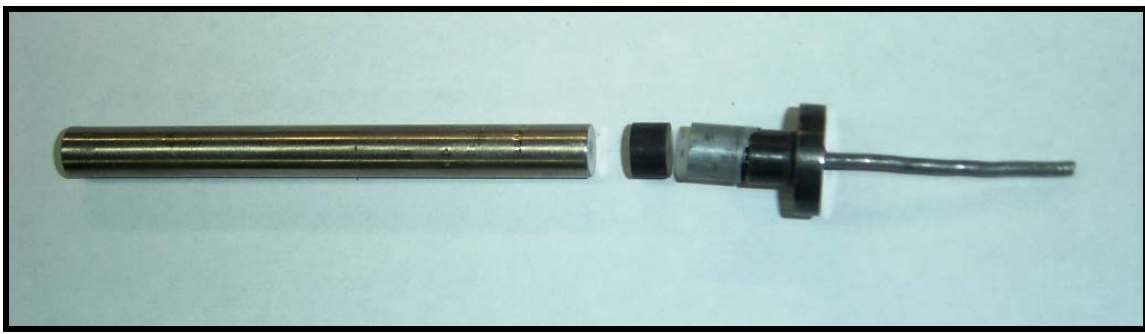


Fig. 3.2. Arreglo Pistón-Dado-Material extruido.

### **3.7 DADOS Y RELACIONES DE EXTRUSIÓN**

Los dados son la herramienta fundamental en el proceso de extrusión. Para asegurar una alta producción a bajo costo, deberán cumplir las siguientes características: a) deberán asegurar al usuario que el producto es de la forma y precisión deseada, no requiriendo, o disminuyendo, la necesidad de un proceso posterior de enderezado o acabado, b) deberán permitir una alta productividad, lo cual se traducirá en altas velocidades de salida y grandes longitudes sin que presente un desgaste severo, para que tenga una mayor vida y c) el costo inicial debe ser bajo [22].

Los dados de extrusión se fabricaron de acero para herramientas AISI H11 (0.35%C; 5%Cr; 0.40%V; 1.5%Mo), se maquinaron a distintas relaciones de extrusión (9.4, 10.7, 24.7), y posteriormente fueron austenizados a 1010 °C, templados en aceite y revenidos a 550 °C hasta lograr una dureza 52 HRc. Todos los dados se diseñaron como dados de ángulo recto, con la misma longitud de contacto para no variar las relaciones por el efecto de la fricción.

Se diseñaron y fabricaron diferentes relaciones de extrusión, con la finalidad de ver el efecto sobre las cargas máximas de extrusión requeridas, y así obtener los valores de las constantes de Johnson para extrusión directa como una de las formas de estimar la presión máxima de extrusión para otras distintas relaciones de extrusión, dada una temperatura y composición química del Zinalco [13]. En la Fig. 3.3 se puede apreciar los dados empleados, que se diseñaron y se fabricaron, para que contaran con diferentes diámetros de la cavidad para que resulten en distintas relaciones de extrusión.

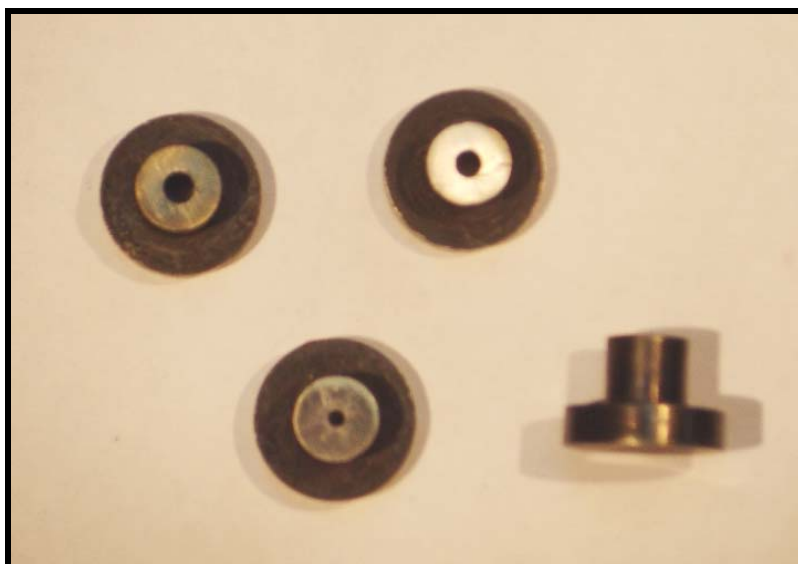


Fig. 3.3. Dados empleados con diferentes relaciones de extrusión.

### **3.8 LUBRICANTES DE EXTRUSIÓN**

En la extrusión cuando se usan ángulos del dado menores a  $90^\circ$  se incrementa el área de la interfaz material-dado. Por consiguiente, también la fricción se incrementa, y a mayor fricción mayor fuerza requiere el pistón [14]. Por otro lado, existe fricción entre la cámara y el material durante las primeras etapas de aplicación de carga, ésta incrementa, también, la fuerza requerida en el pistón. Por último, el material extruído sufre una fricción adicional por el contacto contra el dado, después de que haya sido deformado, y éste también incrementa la fuerza requerida para extruir. Para disminuir todos los efectos anteriores, se propone emplear un lubricante a base de silicón que solo tendrá efecto al inicio del proceso de deformación, es decir, cuando el material sale del dado, el efecto se verá disminuido con la salida constante del material ya que también el lubricante es expulsado de la cámara y del dado. Un efecto adicional del lubricante, que se evaluará, es el de analizar su influencia sobre el acabado superficial del producto extruído.

## **CAPÍTULO 4      RESULTADOS EXPERIMENTALES**

### **4.1 CURVAS DE CARGA DE EXTRUSION – LONGITUD DEL TOCHO**

Como se mencionó, la experimentación fue realizada en un equipo que simula el proceso de extrusión directa, el cual se instaló en una máquina electromecánica de pruebas mecánicas. El elemento sensor de las fuerzas de extrusión es la celda de carga de la máquina de pruebas universal, que tiene una capacidad de lectura de hasta 15 toneladas, pero el pistón del plastómetro no puede aplicar cargas mayores a 3 toneladas ya que por su relación longitud/diámetro éste puede fallar por pandeo. La lectura de la disminución de longitud del tocho se realizó a través del sensor de desplazamiento del cabezal, ya que al ir aplicando la carga el material sale por el dado y permite el desplazamiento del pistón.

Con estas gráficas se puede detectar la carga máxima requerida para que el material inicie la extrusión y conforme el material es extruido, y reduce su longitud, la carga tiende a disminuir debido a la disminución de fricción entre cámara, dado y material. La curva típica de lo mencionado anteriormente se presenta para los dos tipos de extrusión en la Fig. 2.8. [1] [12] [17].

En la tabla 4.1 se encuentran las dimensiones de las cavidades de los dados empleados y la relación de extrusión resultante. En todos los casos se consideró la misma área inicial de sección transversal del tocho cuyo diámetro es de 9.45 mm.

*Tabla 4.1. Dimensión de dados empleados y relación de extrusión.*

<b><i>Dado</i></b>	<b><i>Diámetro cavidad [mm]</i></b>	<b><i>Relación de extrusión</i></b>
I	3.07	9.4
II	2.88	10.7
III	1.90	24.7

En la figura 4.1 se observa la secuencia de las diferentes etapas del proceso de extrusión, y en la figura 4.2 se presenta la gráfica carga de extrusión-longitud resultante del proceso y una muestra del producto extruido.

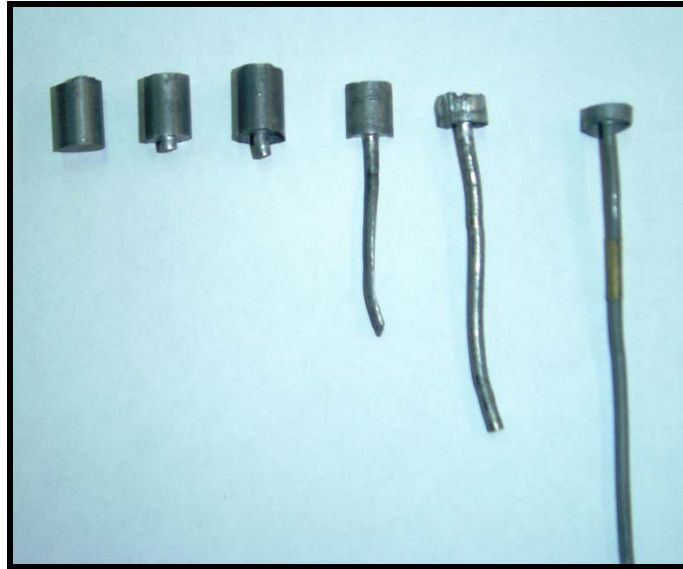


Figura 4.1. Secuencia de pasos de extrusión.

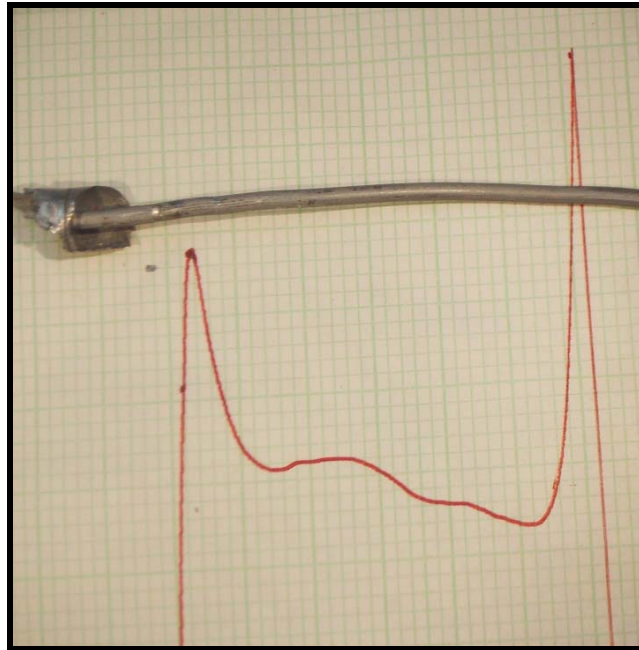


Figura 4.2. Carga de extrusión-Longitud, y material extruido.

Las figuras desde 4.3 a la 4.14 corresponden a las diferentes aleaciones y dados empleados, presentándose sólo la gráfica de carga promedio de tres o más muestras. Todos se extruyeron con la misma velocidad de aplicación de carga, con la finalidad de comparar el efecto de la relación de extrusión y el de la variación del contenido de cobre.



En las gráficas se puede apreciar un cambio en la fuerza aplicada que ocurre alrededor de los 2000 [N] que corresponde a la deformación presentada por el material consistente en un abarrilamiento, donde el diámetro del tocho aumenta hasta lograr el diámetro de la cámara. Posteriormente, la fuerza crece en forma lineal con respecto a la longitud del tocho, hasta lograr el valor de fuerza máxima requerido para que el material inicie el flujo a través del dado. Una vez que el material sale por el dado, en la mayoría de las gráficas, se aprecia que la fuerza requerida para seguir deformando disminuye en forma lineal con respecto a la longitud, en otros casos la fuerza se mantiene casi constante por la fricción presente entre el material y el dado. Una vez que la mayoría del material es extruido la fuerza tiende a incrementarse porque el flujo del material tiende a ser perpendicular al eje de aplicación de carga como se aprecia en la Fig. 2.12.

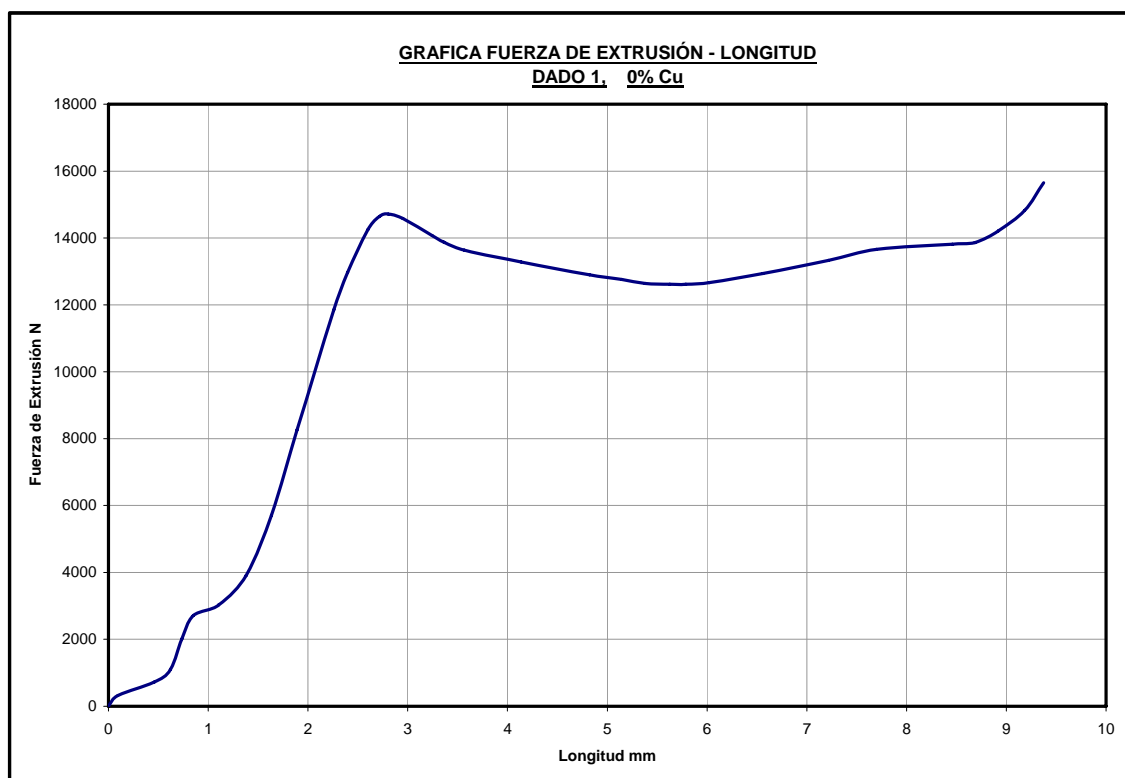


Fig. 4.3. Aleaciones Zinalco 0% Cu, Dado 1.

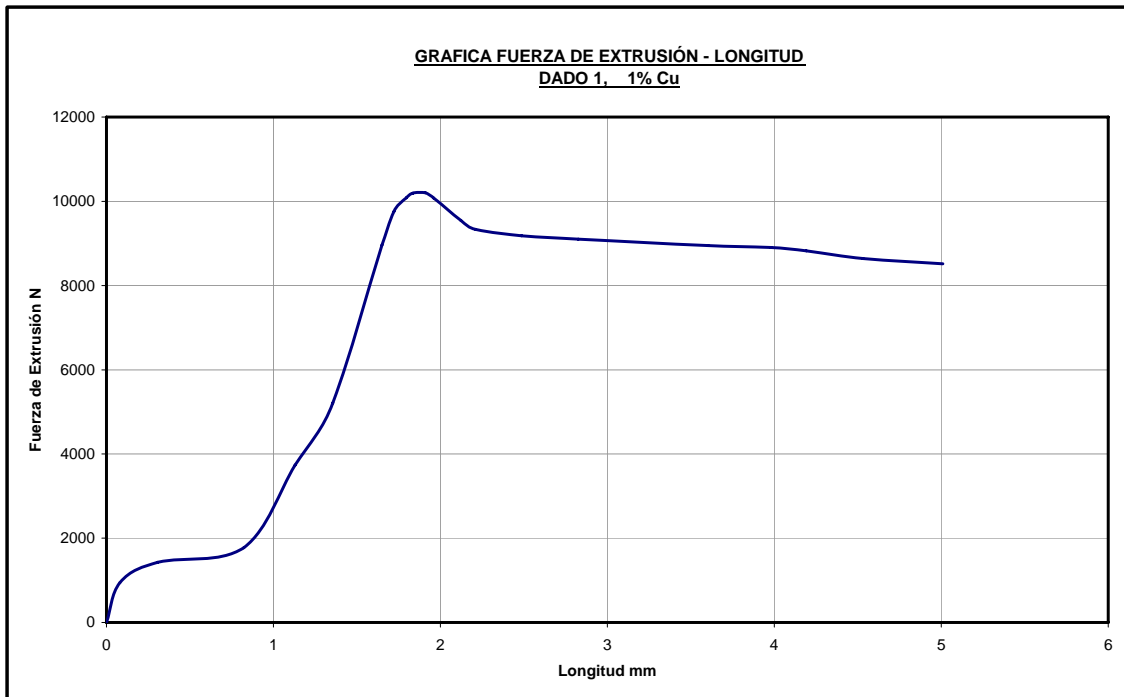


Fig. 4.4. Aleaciones Zinalco 1% Cu, Dado I.

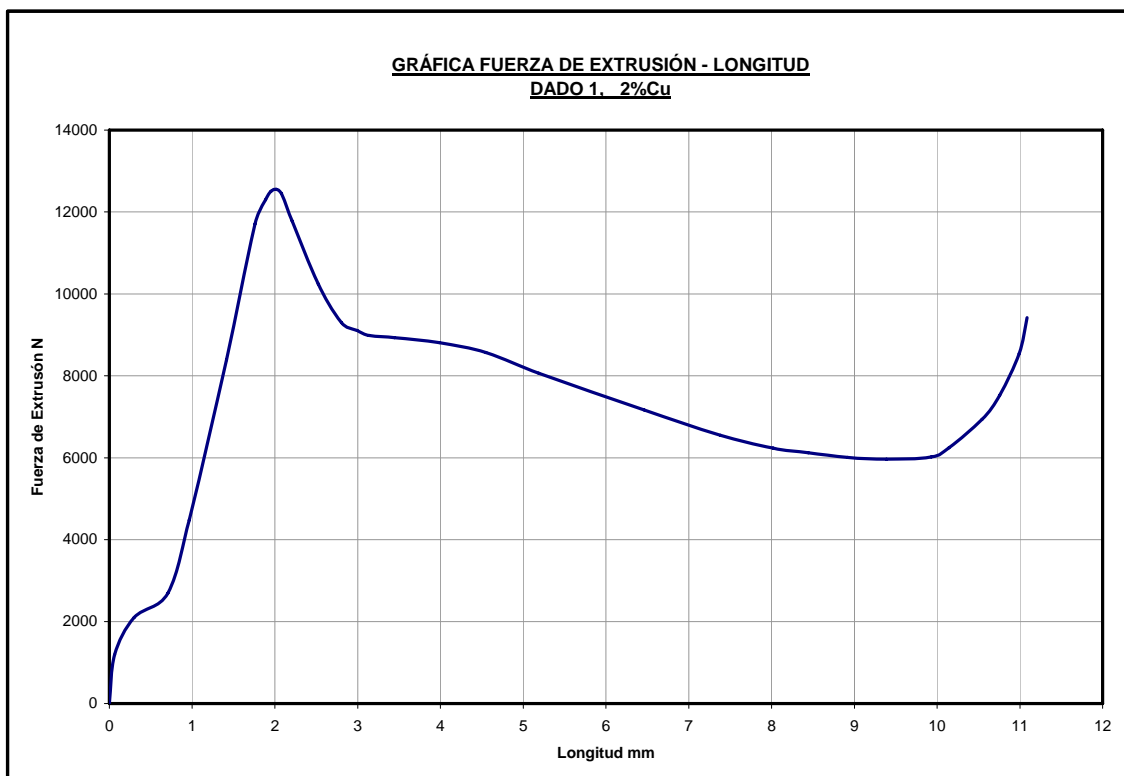


Fig. 4.5. Aleaciones Zinalco 2% Cu, Dado I.

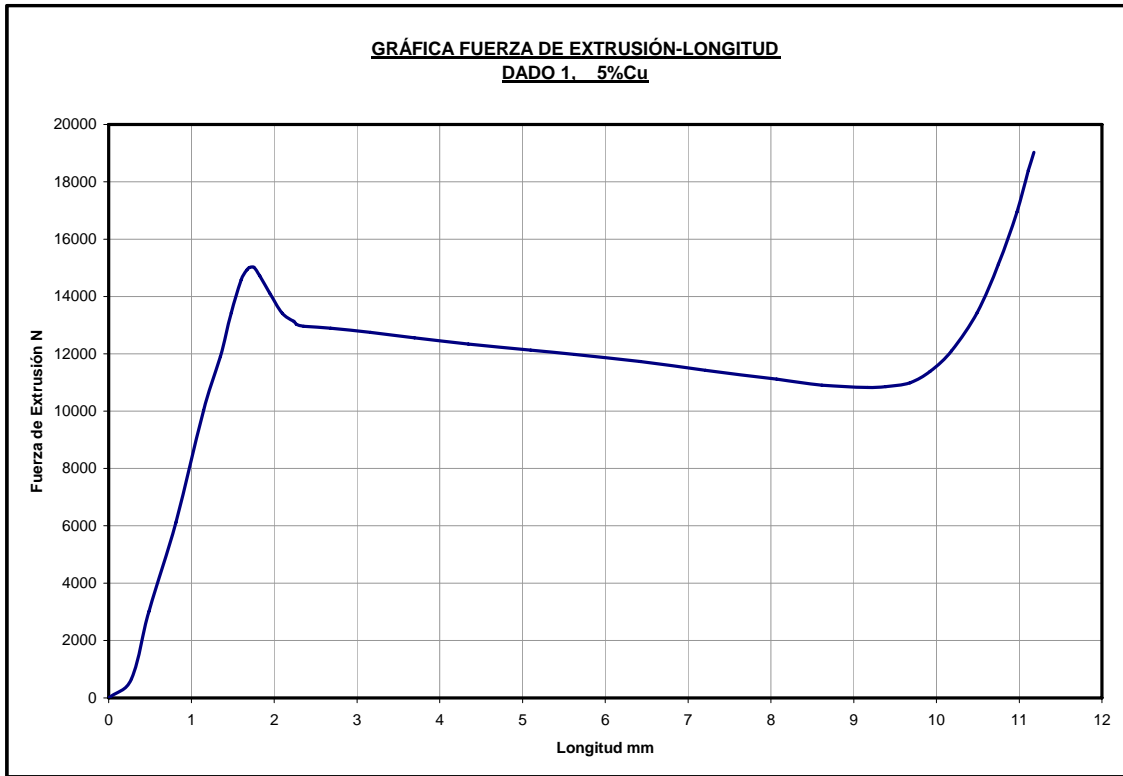


Fig. 4.6. Aleaciones Zinalco 5% Cu, Dado I.

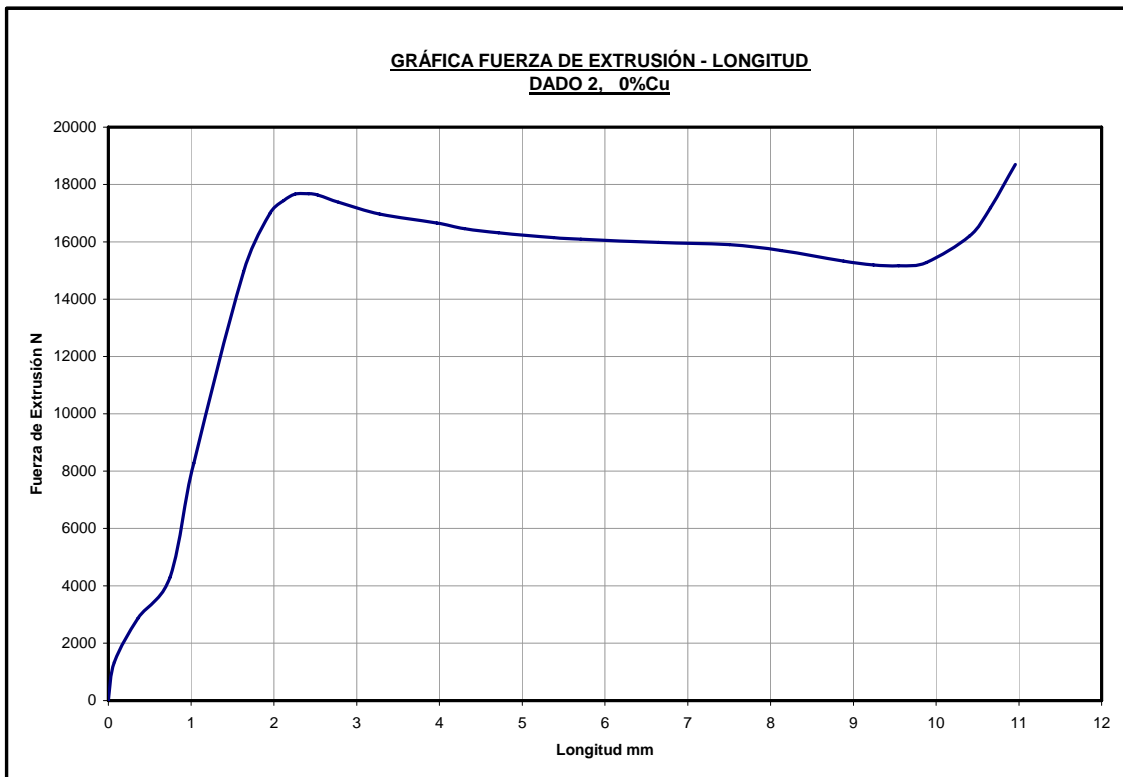


Fig. 4.7. Aleaciones Zinalco 0% Cu, Dado II.

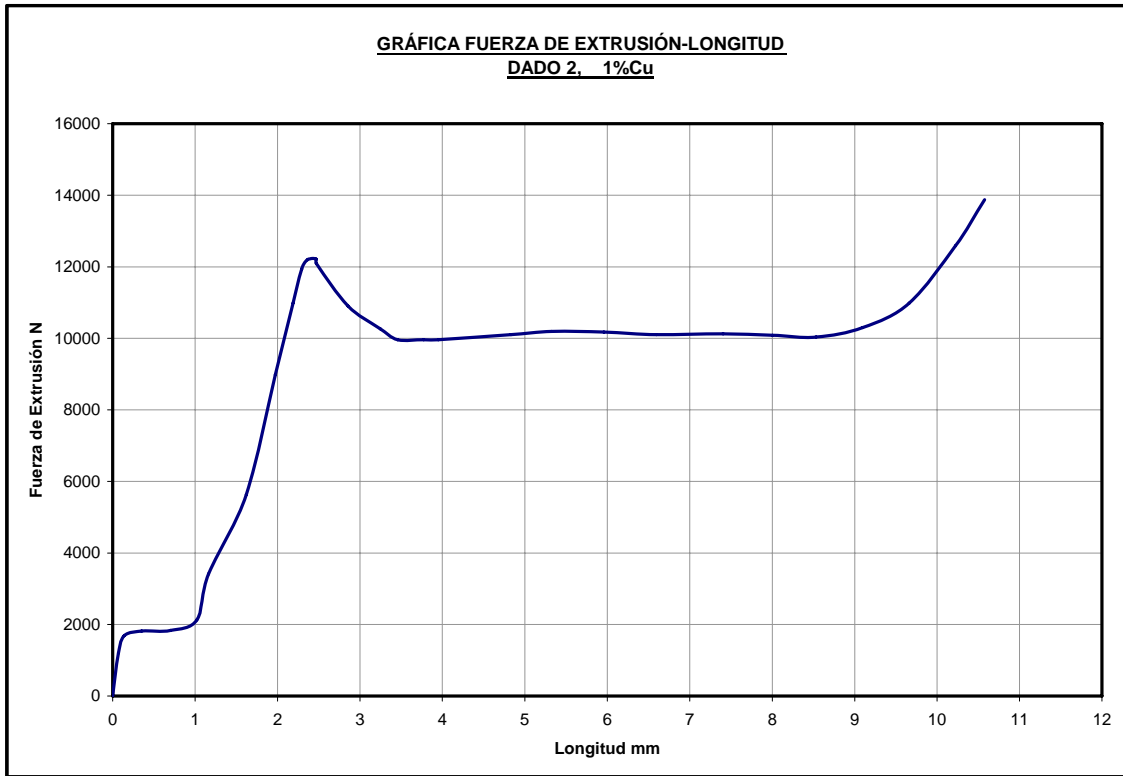


Fig. 4.8. Aleaciones Zinalco 1% Cu, Dado II.

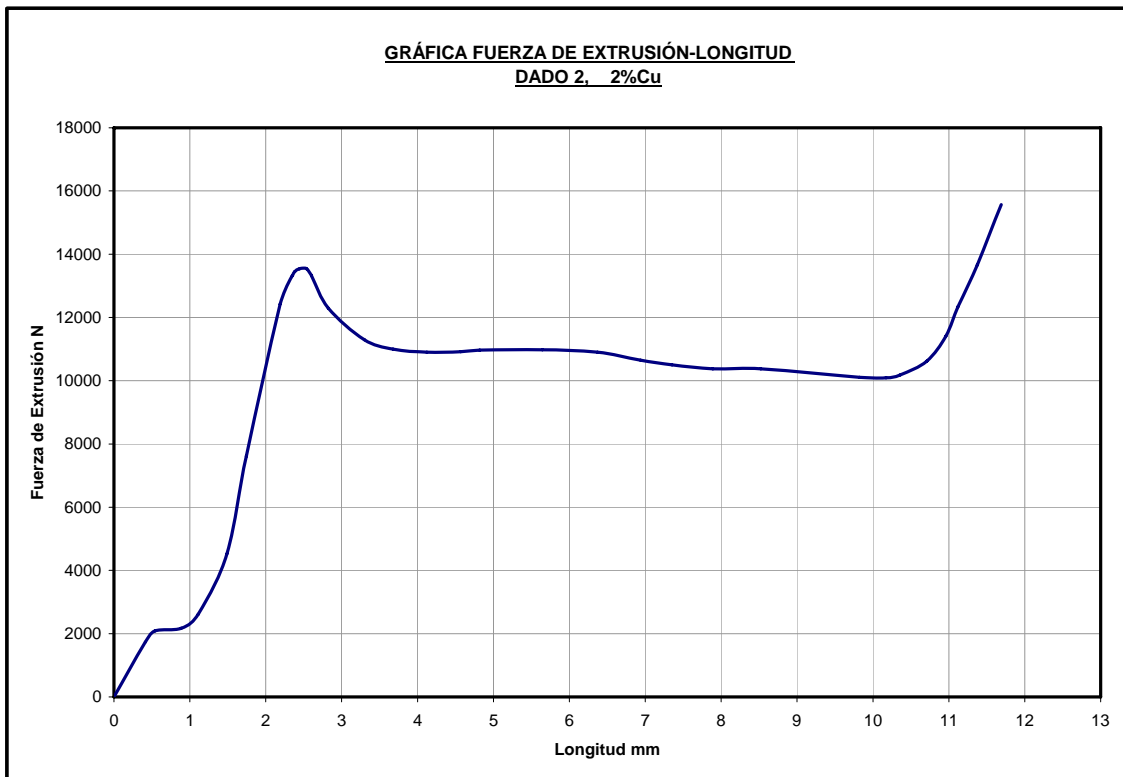


Fig. 4.9. Aleaciones Zinalco 2% Cu, Dado II.

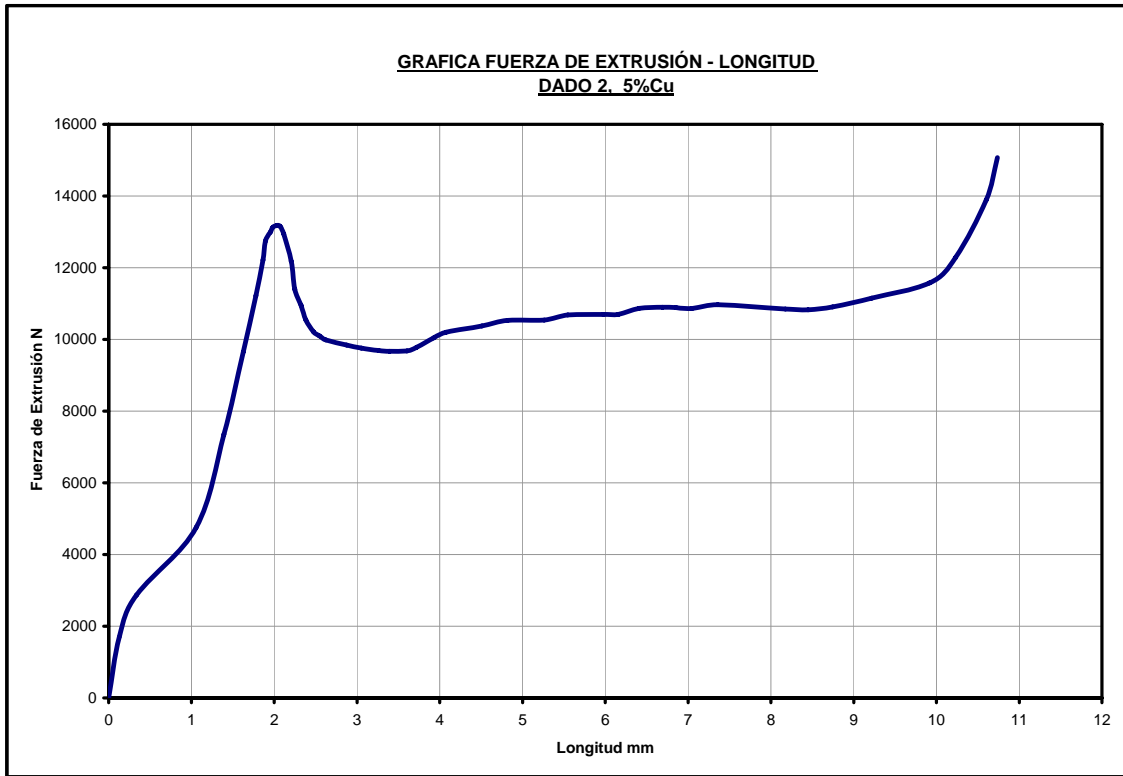


Fig. 4.10. Aleaciones Zinalco 5% Cu, Dado II.

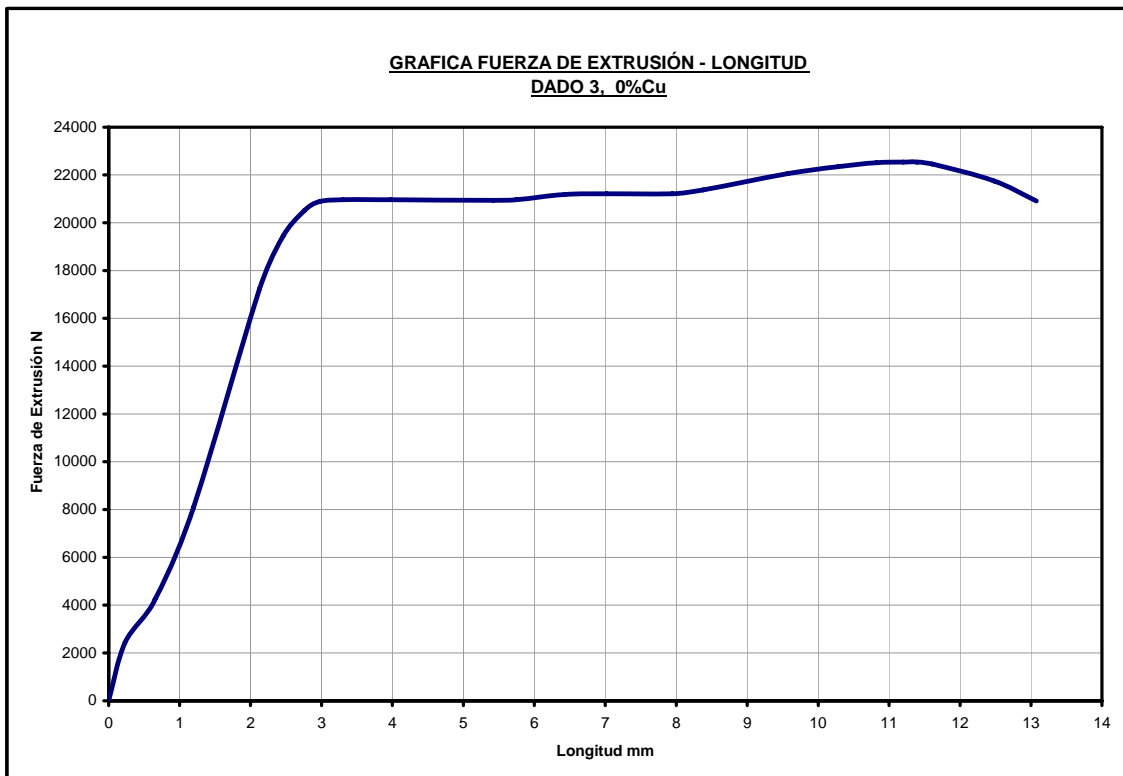


Fig. 4.11. Aleaciones Zinalco 0% Cu, Dado III.

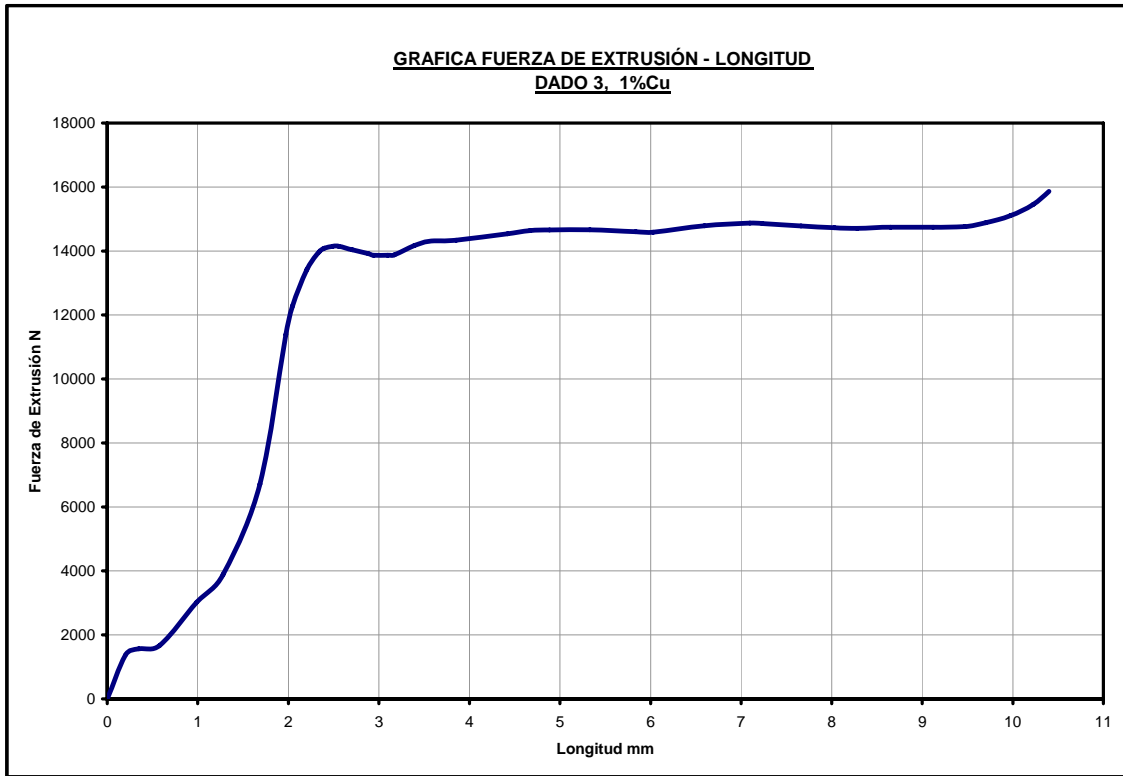


Fig. 4.12. Aleaciones Zinalco 1% Cu, Dado III.

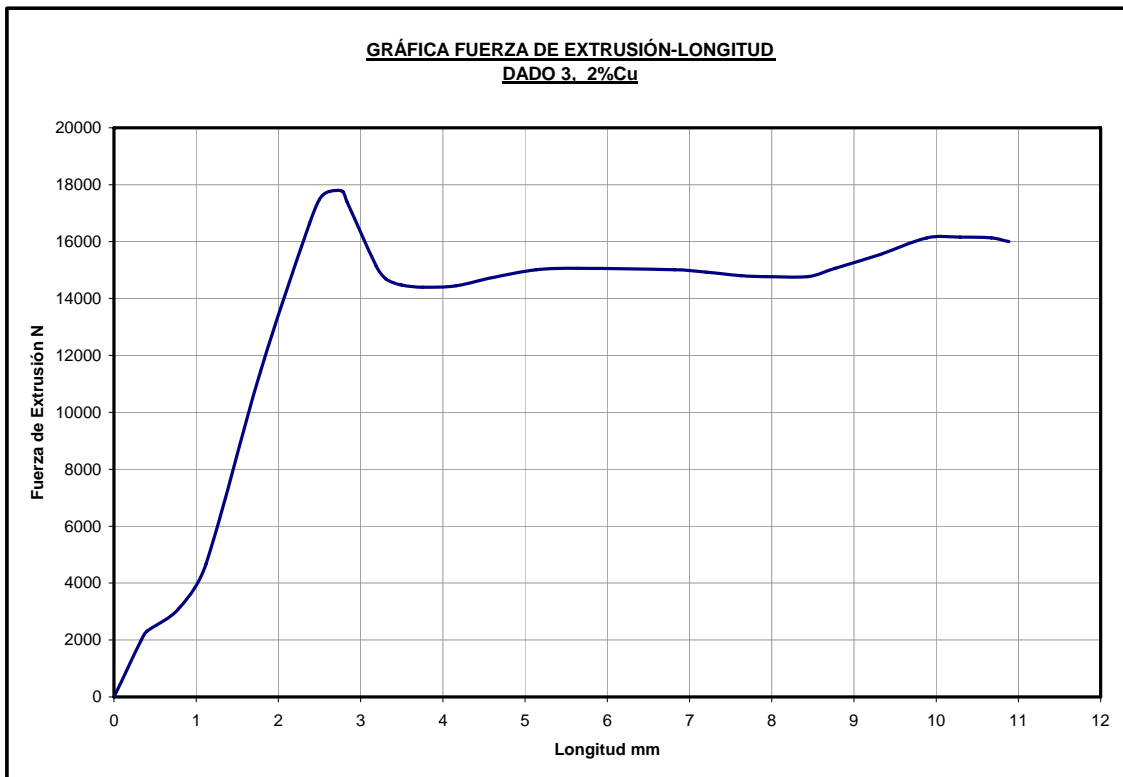


Fig. 4.13. Aleaciones Zinalco 2% Cu, Dado III.

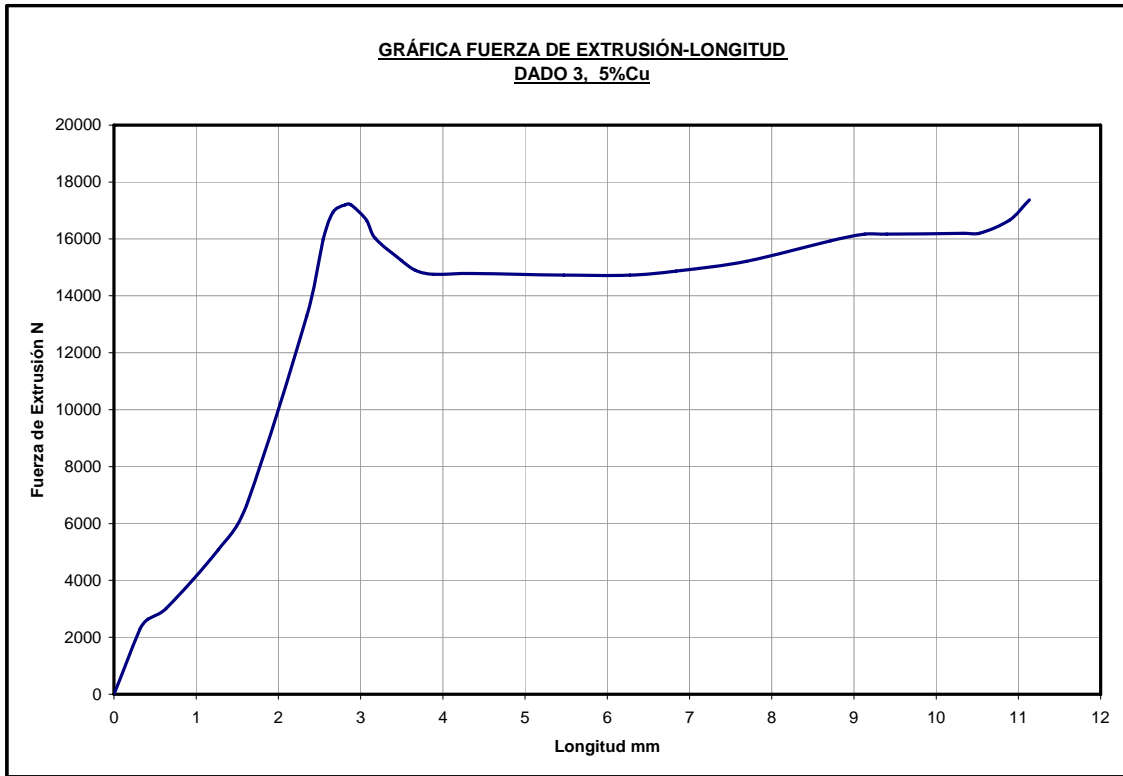


Fig. 4.14. Aleaciones Zinalco 5% Cu, Dado III.

## 4.2 FUERZA DE EXTRUSION

La fuerza requerida en el proceso de extrusión, como ya se mencionó, depende de la resistencia de la aleación conformada, lo que a su vez, depende de la temperatura del proceso, la relación de extrusión, la fricción entre las superficies y la velocidad de extrusión.

Una forma de estimar la fuerza de extrusión es por medio de la siguiente fórmula 4.1 [13]:

$$F = A_0 k \ln\left(\frac{A_0}{A_f}\right) \dots\dots\dots (4.1)$$

Donde k = Constante de extrusión [MPa].

La tabla 4.2 es un resumen de los valores promedio de las fuerzas empleadas para el proceso con respecto a la relación de extrusión y contenido de cobre, con la finalidad de estimar los valores de la constante de extrusión para los distintos contenidos de cobre.

Tabla 4.2. Resumen de los valores de carga, presión y relación de extrusión para los diferentes dados y composiciones químicas.

%Cu	LN [R]	0%		1%		2%		5%	
		Fuerza [N]	Presión [MPa]	Fuerza [N]	Presión [MPa]	Fuerza [N]	Presión [MPa]	Fuerza [N]	Presión [MPa]
<b>Dado 1</b>	2.1	13832.1	197.2	10529.4	150.1	12066.3	172.0	14943.9	213.1
<b>Dado 2</b>	2.4	16938.6	241.5	12033.6	171.6	11870.1	169.2	13276.2	189.3
<b>Dado 3</b>	3.2	20764.5	296.1	14191.8	202.3	16186.5	230.8	16350.0	233.1

En las figuras 4.15 a la 4.18, se grafica la presión de extrusión contra el logaritmo de la relación de extrusión para las distintas aleaciones en las que se varía el porcentaje de cobre. En las gráficas se obtiene la línea de tendencia en la que la ecuación de ésta línea es un valor estimado de k que corresponde a la pendiente de las líneas. Se grafica la presión contra el logaritmo de la relación de extrusión, que tiene la misma tendencia lineal en todos los casos.



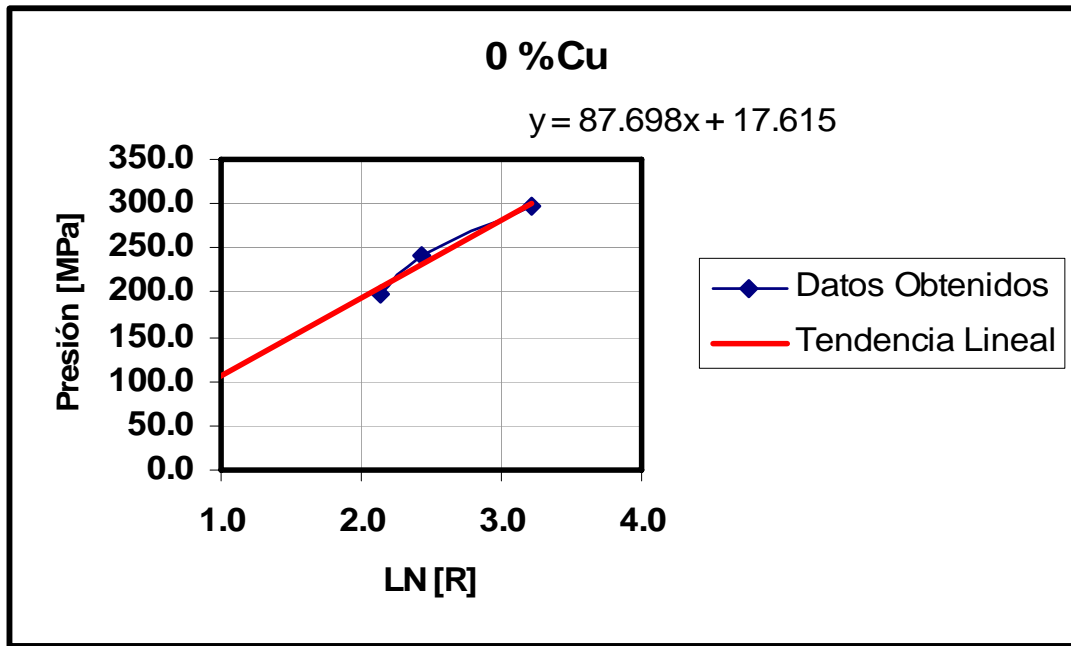


Fig. 4.15. Presión de extrusión-Logaritmo de la Relación de extrusión para 0%Cu.

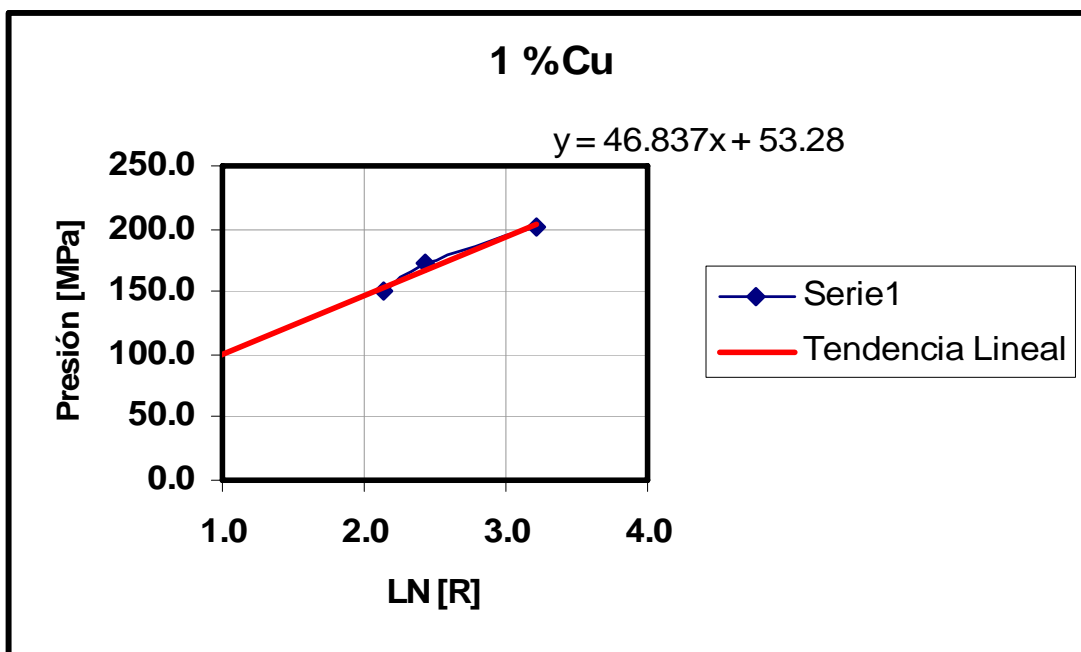


Fig. 4.16. Presión de extrusión-Logaritmo de la Relación de extrusión para 1%Cu.

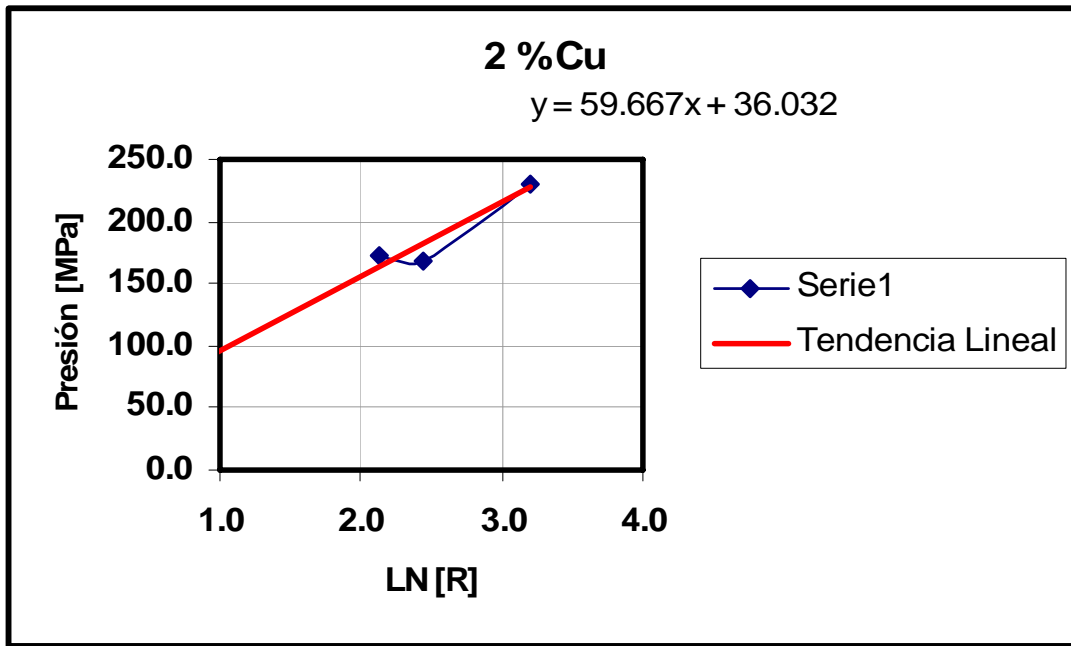


Fig. 4.17. Presión de extrusión-Logaritmo de la Relación de extrusión para 2%Cu.

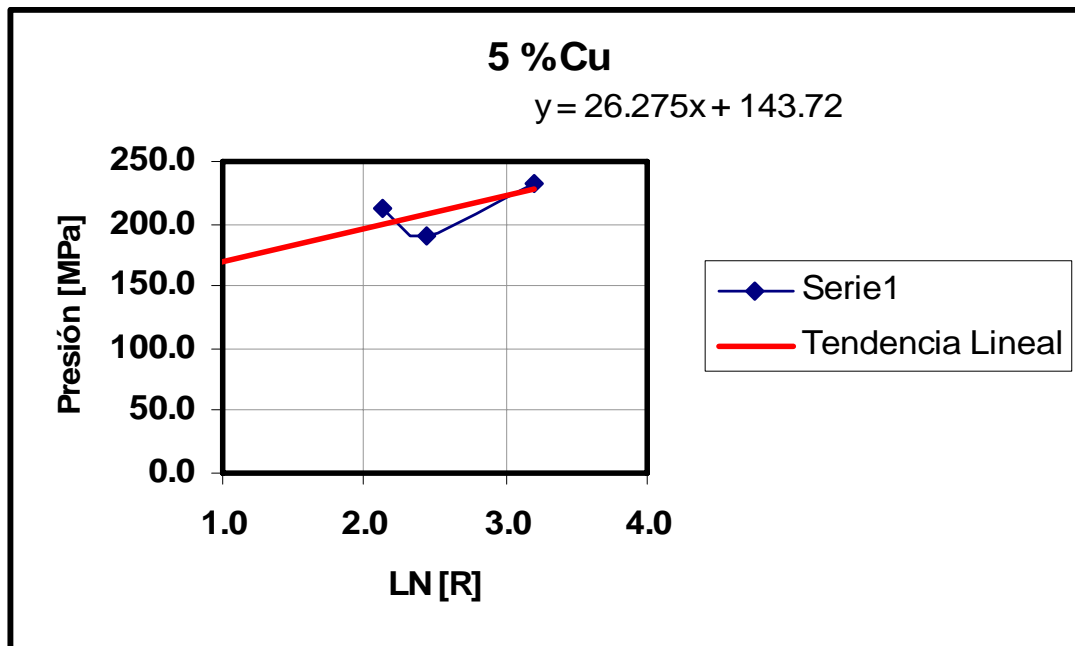


Fig. 4.18. Presión de extrusión-Logaritmo de la Relación de extrusión para 5%Cu.

Los valores de k se presentan a continuación para las distintas aleaciones.

Tabla 4.3. Valores de la constante de extrusión obtenida para los distintos tipos de aleación.

<b>Tipo de Aleación</b>	<b>K [MPa]</b>
0% Cu	87.69
1% Cu	46.83
2% Cu	59.66
5% Cu	26.27

En la tabla 4.4 se muestran todos los resultados de carga para la extrusión de las diferentes aleaciones y condiciones de operación en las que principalmente se variaron temperatura de procesamiento, velocidad de aplicación de carga y coeficiente de fricción.

**Tabla 4.4. Condiciones de Extrusión para las diferentes aleaciones.**

No.	%Cu	DADO	FUERZA MAX (kg)	TEMPERATURA (°C)	VEL. CABEZAL (mm/min)	(TRATAMIENTO) (C/L ó S/L)
1	0	1	660	275	1	C/L
2	0	1	600	275	1	C/L
3	0	1	540	275	1	S/L
4	0	1	630	275	1	S/L
5	0	1	650	275	1	S/L
6	0	1	690	275	1	S/L
7	0	1	660	275	1	S/L
8	0	1	820	275	2	S/L
9	0	1	1500	280	1	C/L
10	0	1	1300	280	1	C/L
11	0	1	1430	280	1	C/L
12	0	1	760	275	1	C/L
13	0	1	580	275	1	S/L
14	0	1	780	275	2	S/L
15	0	1	780	275	2	S/L
16	0	2	1800	280	1	C/L
17	0	2	1700	280	1	C/L
18	0	2	1680	280	1	C/L
19	0	3	2150	280	1	C/L
20	0	3	2125	280	1	C/L
21	0	3	2075	280	1	C/L
22	1	3	1510	280	1	C/L
23	1	3	1440	280	1	C/L
24	1	3	1390	280	1	C/L
25	1	1	1040	280	1	C/L
26	1	1	1040	280	1	C/L
27	1	1	1140	280	1	C/L
28	1	2	1220	280	1	C/L
29	1	2	1240	280	1	C/L
30	1	2	1220	280	1	C/L
31	2	1	1 610	250	1	C/L
32	2	1	1 580	250	1	C/L
33	2	1	1 600	250	1	C/L
34	2	1	910	275	1	C/L
35	2	1	1 140	265	1	C/L
36	2	1	1 100	275	1	C/L
37	2	1	1 580	250	1	C/L
38	2	1	1 120	300	1	C/L

No.	%Cu	DADO	FUERZA MAX (kg)	TEMPERATURA (°C)	VEL. CABEZAL (mm/min)	(TRATAMIENTO) (C/L ó S/L)
39	2	1	810	300	1	C/L
40	2	1	1490	285	1	S/L
41	2	1	1210	350	1	C/L
42	2	2	420	275	1	S/L
43	2	2	340	275	1	S/L
44	2	2	360	280	1	C/L
45	2	2	380	280	1	C/L
46	2	2	400	280	1	C/L
47	0	2	400	280	1	C/L
48	2	2	320	280	2	C/L
49	2	2	340	280	2	C/L
50	2	2	520	280	5	C/L
51	2	2	360	280	1	C/L
52	2	2	1250	280	1	C/L
53	2	2	1170	280	1	C/L
54	2	2	1 520	230	1	C/L
55	2	2	1 770	250	1	C/L
56	2	2	1 540	280	1	C/L
57	2	2	1 860	250	1	C/L
58	2	2	1 380	280	1	C/L
59	2	1	1 960	230	1	C/L
60	2	1	1 740	240	1	C/L
61	2	1	1 500	260	1	C/L
62	2	1	1 760	270	1	C/L
63	2	1	1 330	280	1	C/L
64	2	1	2 020	250	2	C/L
65	2	1	2 040	260	2	C/L
66	2	1	1 160	280	2	C/L
67	2	1	1 320	280	2	C/L
68	2	1	1 460	280	5	C/L
69	2	1	1 740	280	10	C/L
70	2	1	2 040	240	1	C/L recocido 40 h
71	2	1	1 440	260	1	C/L recocido 40 h
72	2	1	1 500	280	1	C/L recocido 40 h
73	2	1	1 370	280	2	C/L s/recocer
74	2	1	1 740	280	5	C/L s/recocer
75	2	1	2 040	280	50	C/L s/recocer
76	2	1	2 060	280	15	C/L s/recocer
77	2	2	1 020	280	2	C/L
78	2	2	1 240	280	5	C/L
79	2	2	1 950	280	10	C/L
80	2	2	2 675	280	10	C/L
81	2	2	3 000	280	15	C/L
82	2	2	3 025	280	20	C/L
83	2	1	1 730	240	1	C/L recocido
84	2	1	1 630	260	1	C/L recocido
85	2	1	1 620	280	1	C/L recocido
86	2	1	1570	280	1	C/L
87	2	1	830	280	1	C/L

<b>No.</b>	<b>%Cu</b>	<b>DADO</b>	<b>FUERZA MAX (kg)</b>	<b>TEMPERATURA (°C)</b>	<b>VEL. CABEZAL (mm/min)</b>	<b>(TRATAMIENTO) (C/L ó S/L)</b>
88	2	1	2 550	280	20	C/L
89	2	1	2 750	280	20	C/L
90	2	1	2 875	280	25	C/L
91	2	1	2 800	280	40	C/L
92	2	1	2 200	280	20	C/L recocido
93	2	1	2 900	280	50	C/L recocido
94	2	1	2 000	280	5	C/L recocido
95	2	1	3 100	280	40	C/L recocido
96	2	1	2 950	280	10	C/L recocido
97	2	1	1 750	280	2	C/L recocido
98	2	1	1240	280	1	C/L s/recocer
99	2	1	1280	280	1	C/L s/recocer
100	2	1	2 700	280	25	C/L s/recocer
101	2	1	2 900	280	40	C/L s/recocer
102	2	1	2 600	280	50	C/L s/recocer
103	2	1	1 380	280	2	C/L recocido
104	2	1	2 500	280	10	C/L recocido
105	2	1	2 800	280	20	C/L recocido
106	2	1	2 350	280	16	C/L recocido
107	2	1	1 000	280	10	C/L templado
108	2	1	1250	280	20	C/L templado
109	2	1	1 500	280	50	C/L templado
110	2	1	2500	280	100	C/L templado
111	2	1	1 625	280	15	C/L recocido
112	2	1	750	280	10	C/L templado
113	2	3	1420	280	1	C/L
114	2	3	1730	280	1	C/L
115	2	3	1800	280	1	C/L
116	2	4	2450	280	1	C
117	2	4	2550	280	1	C
118	5	1	2000	280	1	C/L
119	5	1	1530	280	1	C/L
120	5	1	1600	280	1	C/L
121	5	1	1440	280	1	C/L
122	5	2	1340	280	1	C/L
123	5	2	1450	280	1	C/L
124	5	2	1270	280	1	C/L
125	5	3	1650	280	1	C/L
126	5	3	1600	280	1	C/L
127	5	3	1750	280	1	C/L

### **4.3 TEMPERATURAS Y VELOCIDADES DE EXTRUSION**

Como se ha mencionado, una de las principales variables a determinar fue la temperatura de extrusión, por lo que se realizaron pruebas a temperaturas que van desde 230 hasta 350°C en aleaciones con el mismo porcentaje de cobre, esto es, para la aleación Zinalco 2%Cu con estructura de colada y para una misma relación de extrusión, que es la aleación y las condiciones de mayor interés. Con el propósito de obtener el rango de temperaturas donde las fuerzas para extruir sean la mas bajas y aplicarlo en las otras aleaciones y en las distintas relaciones de extrusión. En la Fig. 4.19 se puede apreciar como la carga de extrusión va disminuyendo conforme la temperatura se incrementa, encontrándose las menores cargas de extrusión en temperaturas de 275 y 300°C. En la curva de tendencia, los menores valores de carga se encuentran por arriba de 300°C, valor que sobrepasa los rangos controlados por el plastómetro empleado en la experimentación.

Para aleaciones de Zinalco que se han sometido a un tratamiento térmico de recocido, o de enfriamiento rápido, el comportamiento es muy similar a las aleaciones sin tratamiento (estructura de colada), obteniéndose las menores cargas entre las temperaturas de 270 y 280°C

Por todo lo anterior, se consideró a la temperatura de 280°C como la temperatura a la cual se encuentran los menores valores de carga y a ésta se realizaron las posteriores experimentaciones donde se varía el contenido de cobre, relaciones de extrusión y velocidad de aplicación de carga.

### Estructura de Colada

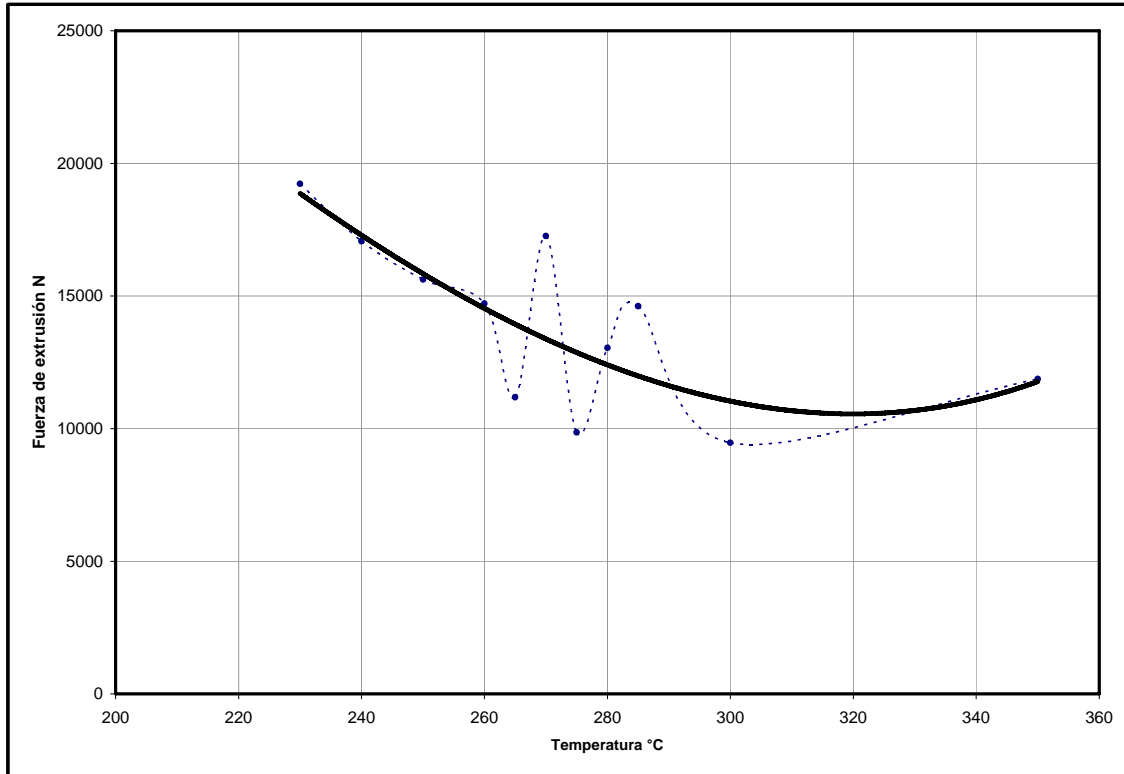


Fig. 4.19. Fuerza de extrusión – Temperatura de extrusión para la aleación 2%Cu  
Dado I. Estructura de colada.

### Material Recocido

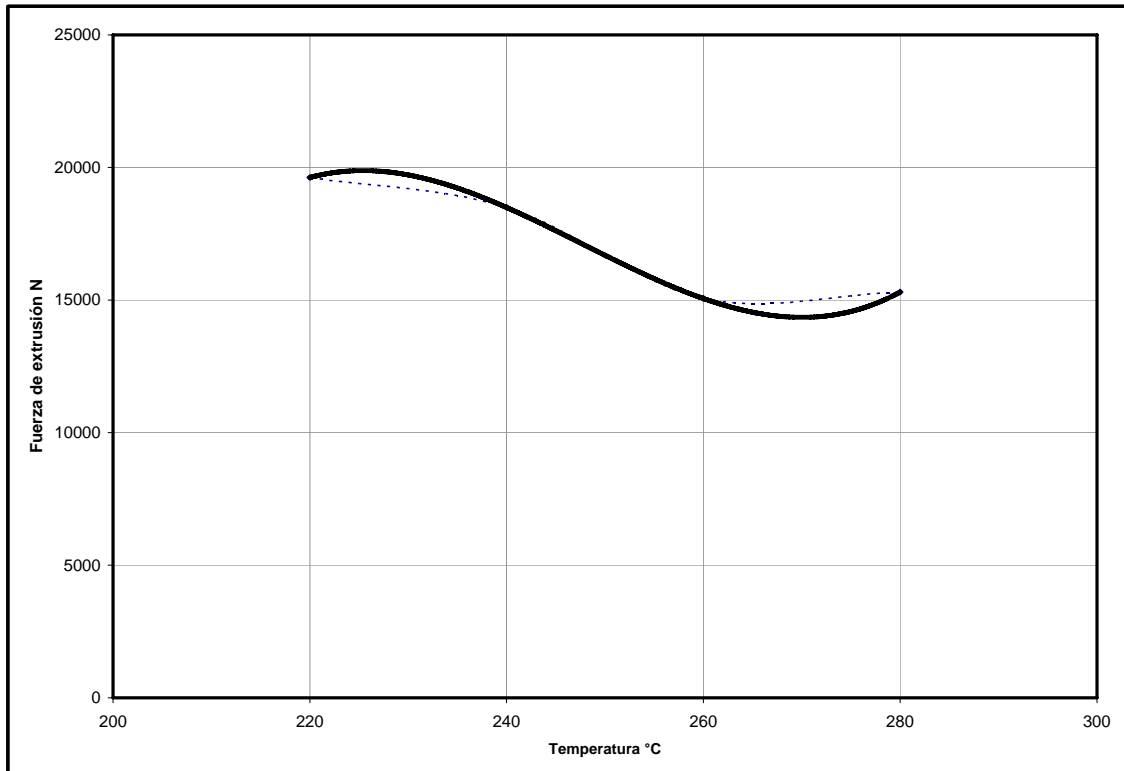


Fig. 4.20. Fuerza de extrusión – Temperatura de extrusión para la aleación 2%Cu  
Dado I. Material recocido.



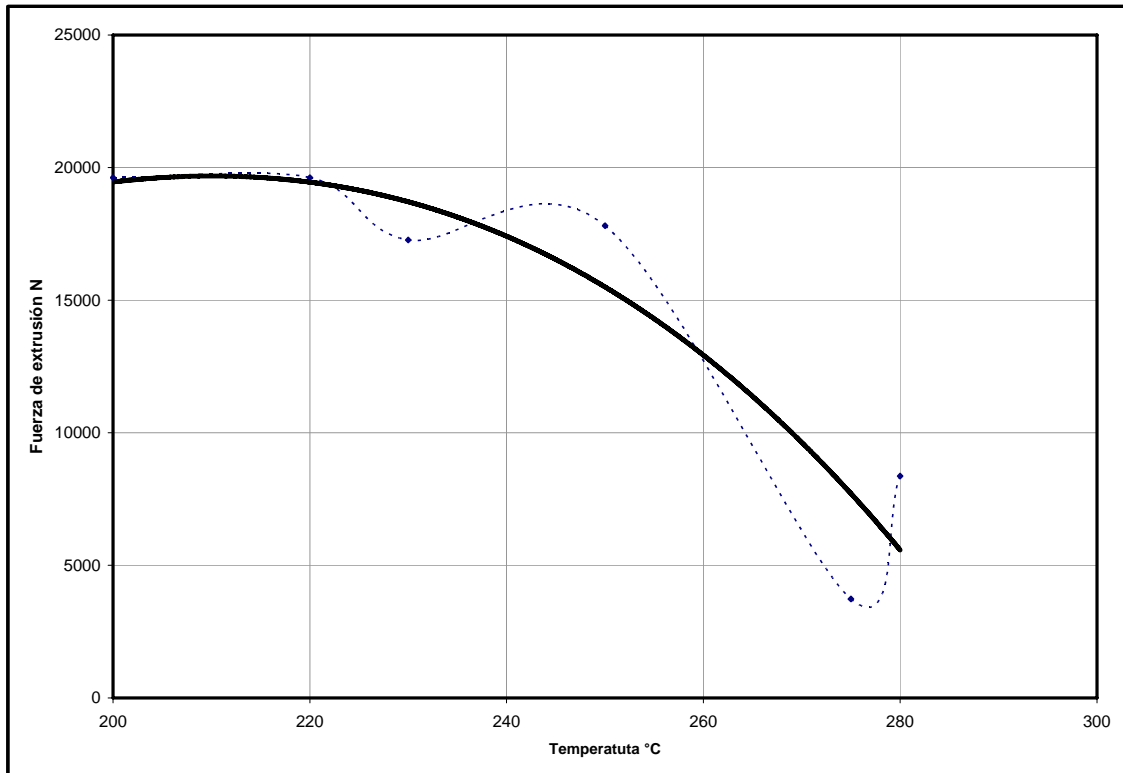
**Material enfriado rápidamente**

Fig. 4.21. Fuerza de extrusión – Temperatura de extrusión para la aleación 2%Cu  
Dado II. Material enfriado rápidamente

Al igual que la temperatura de extrusión, la velocidad de conformado es una variable importante para determinar las cargas de extrusión y, de antemano se sabe que para la gran mayoría de aleaciones, a mayor velocidad de deformación mayor carga para deformar. Lo anterior se puede apreciar en las figuras 4.22, 4.23 y 4.24, a medida que aumenta la velocidad de aplicación de carga se incrementa la carga requerida para iniciar la extrusión, obteniéndose los valores máximos, tal como se esperaba, a velocidades superiores de 40 mm/min para las aleaciones con estructura de colada, recocida o enfriada rápidamente. Existe una disminución a velocidades superiores, presentándose el problema de que las cargas resultantes superan las 3 toneladas que es la carga límite que pueden aplicar los pistones antes de que se presente el problema de pandeo.

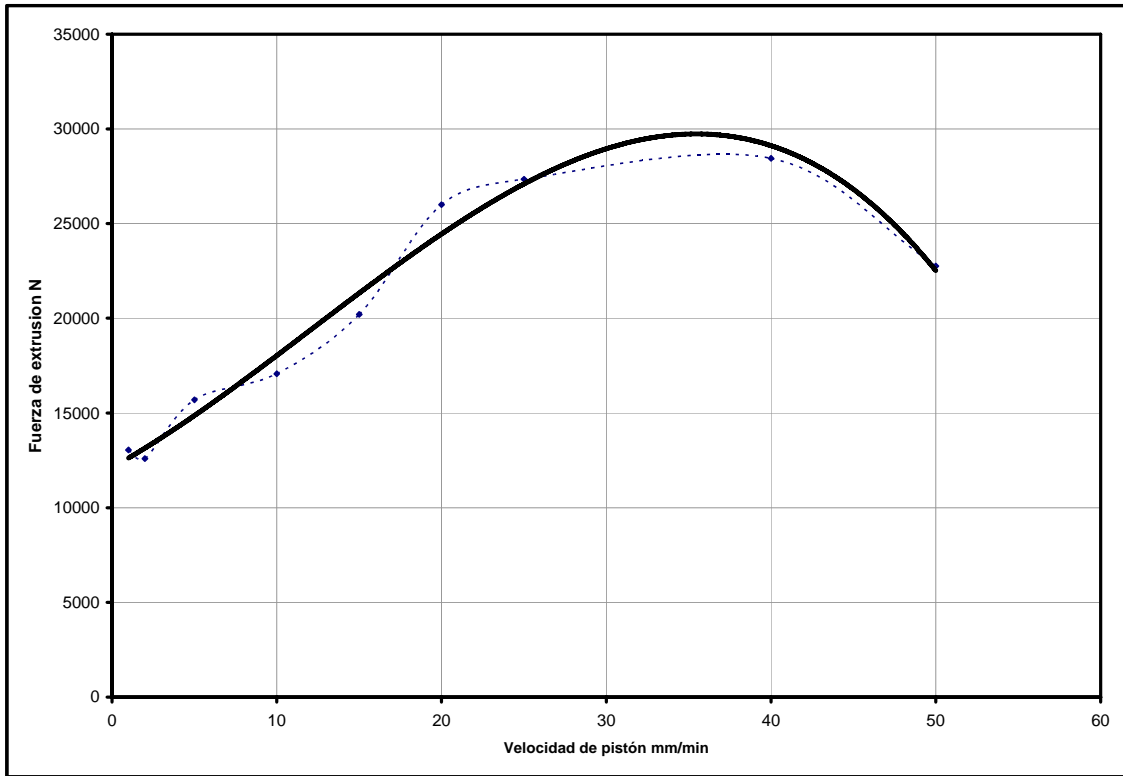


Fig. 4.22. Fuerza de extrusión - Velocidad de pistón para la aleación 2%Cu Dado I. Sin recocido.

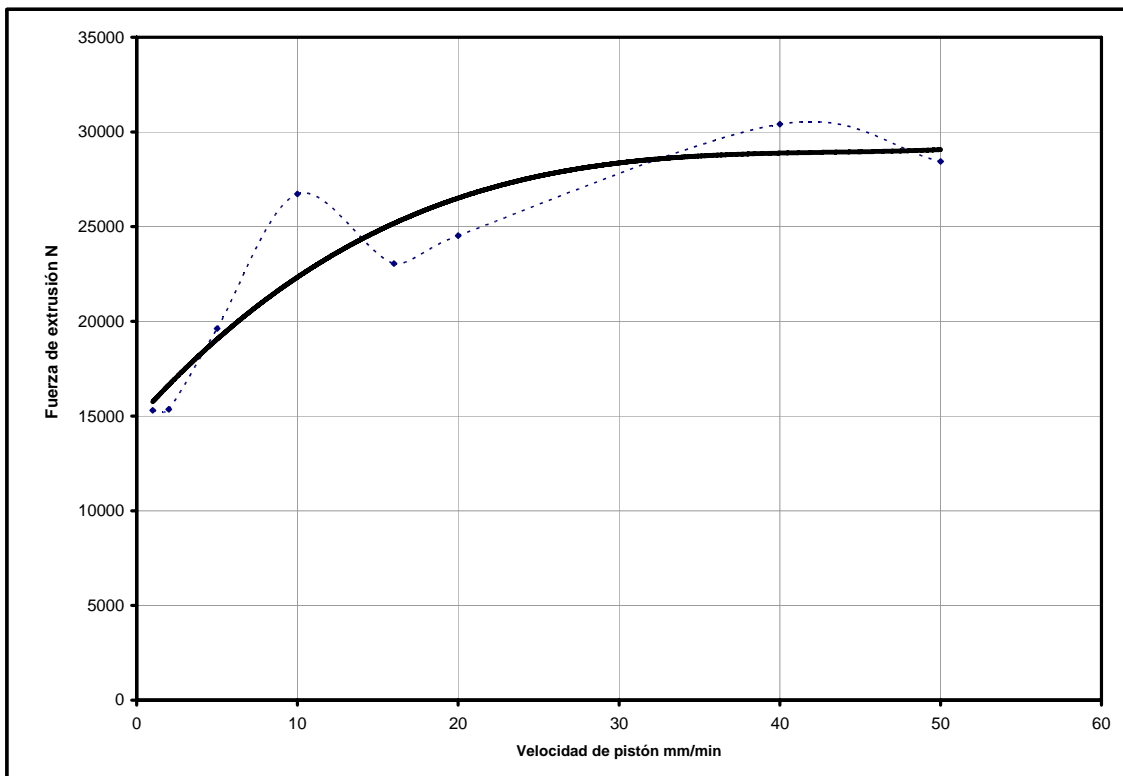


Fig. 4.23. Fuerza de extrusión - Velocidad de pistón para la aleación 2%Cu Dado I. Material recocido.

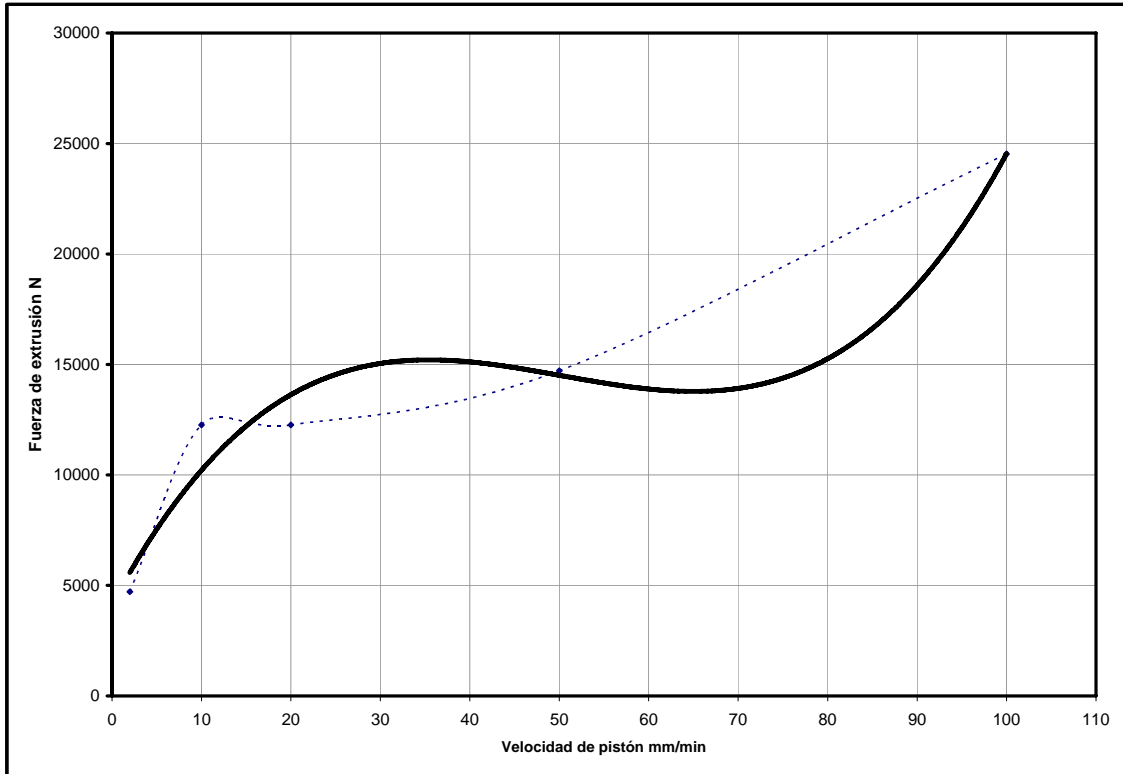


Fig. 4.24. Fuerza de extrusión - Velocidad de pistón para la aleación 2%Cu Dado I. Material enfriado rápidamente

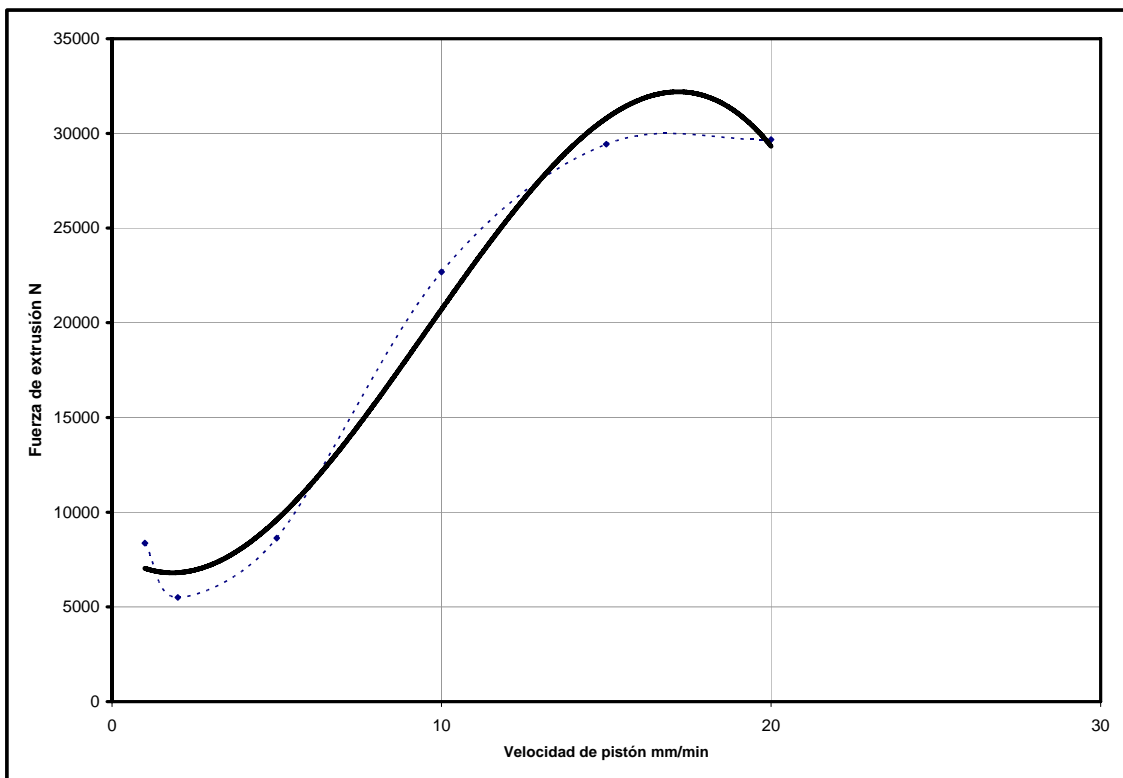
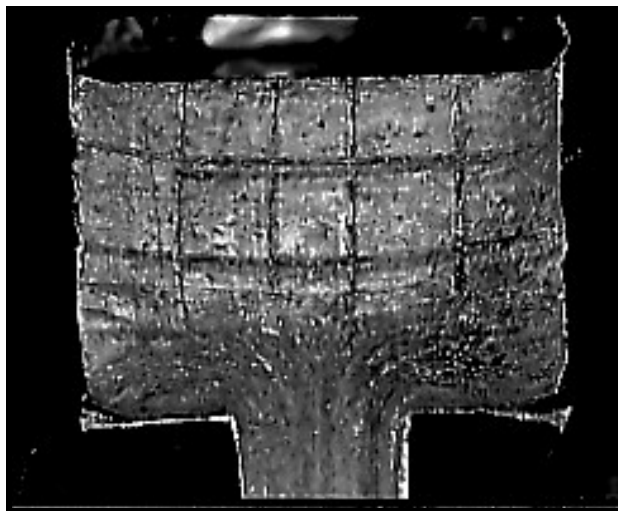


Fig. 4.25. Fuerza de extrusión - Velocidad de pistón para la aleación 2%Cu Dado II. Sin recocido.

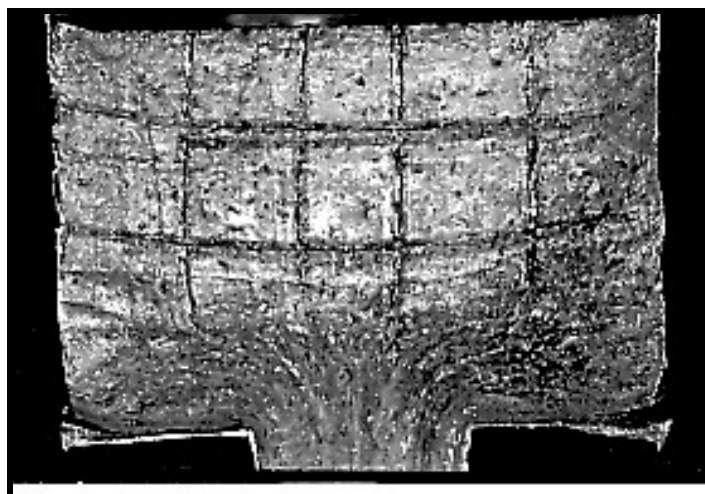
#### **4.4 PATRONES DE FLUJO DE EXTRUSIÓN**

Una evidencia de la fricción presente en el proceso de extrusión, como ya se mencionó, es obtener el patrón de las líneas de flujo del metal en la extrusión, éste tiene una importante influencia sobre la calidad y las propiedades mecánicas del producto final [17] [22] [23]. El material deberá fluir en sentido longitudinal a través del dado, por lo que los productos extruidos siempre presentan una estructura de grano alargada a lo largo de la pieza. Un método sencillo para obtener el patrón de las líneas de flujo es cortar longitudinalmente el tocho, realizar un mallado uniforme en una de sus caras, colocar un material que evite la posible soldadura entre las dos mitades (grafito), colocar las dos mitades dentro de la cámara y proceder a extruir. Posteriormente, se separan las dos mitades y se analizan los patrones de las líneas de flujo y se evalúa la cantidad de material estático o zonas del metal muerto [13] [24]. Comparando el patrón de las líneas de flujo se puede establecer el nivel de fricción presente entre la cámara y el material.

En los patrones obtenidos, observados en las figuras 4.26 a 4.29 se puede apreciar que en las esquinas entre la cámara y el dado existen pequeñas zonas donde el metal permaneció estacionario y líneas perpendiculares flexionadas entre la cámara y el material, lo que indica la presencia de una deformación homogénea con alta fricción superficial, lo que puede producir defectos superficiales en el producto como se observó en algunos casos. Fig. 4.42.



*Fig. 4.26. Zinalco 2%Cu, Dado I. Patrón de extrusión tipo B, deformación homogénea con alta fricción superficial entre tocho y cámara. 8x.*



*Fig. 4.27. Zinalco 2%Cu, Dado I. Patrón de extrusión tipo B, deformación homogénea con alta fricción superficial entre tocho y cámara. 10x.*

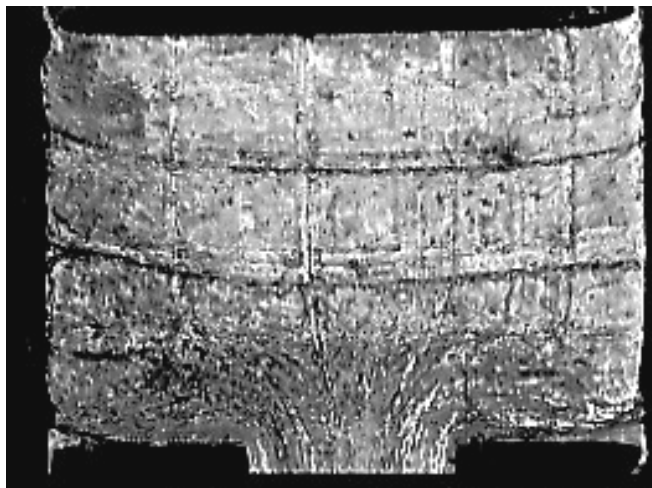


Fig. 4.28. Zinalco 2%Cu, Dado I. Patrón de extrusión tipo B, deformación homogénea con alta fricción superficial entre tocho y cámara. 10x.

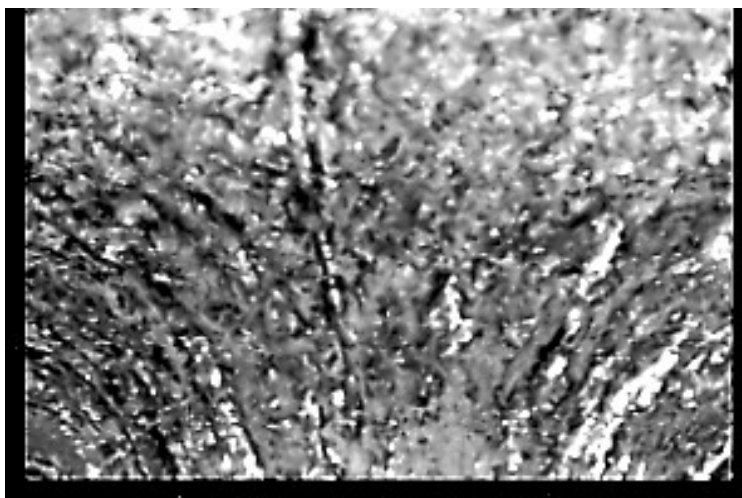


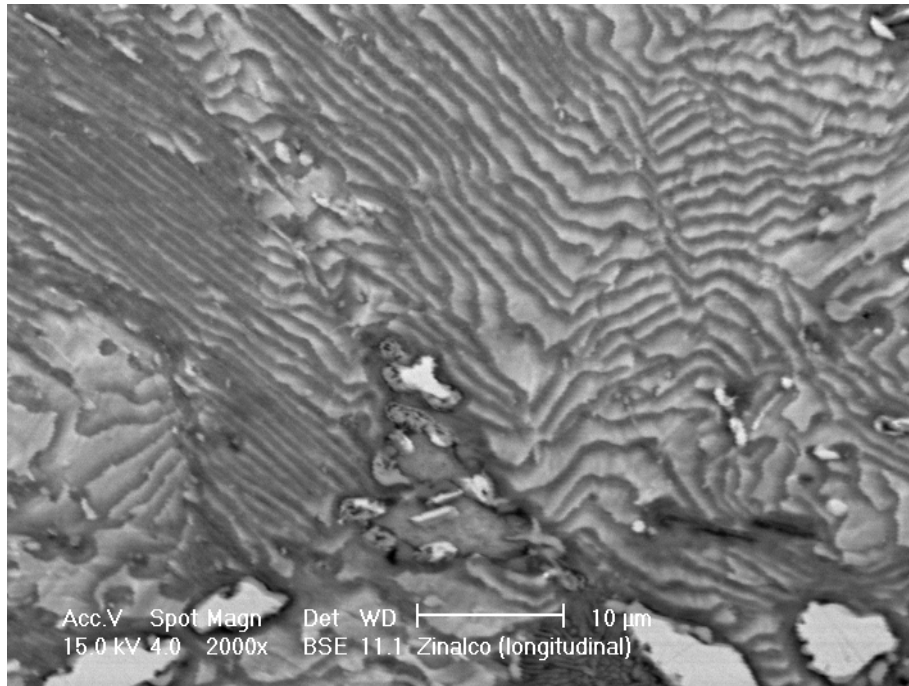
Fig. 4.29. Zinalco 2%Cu, Dado I. Patrón de extrusión tipo B, deformación homogénea con alta fricción superficial entre tocho y cámara. 24x.

#### **4.5 MICROESTRUCTURAS DE LA ALEACION**

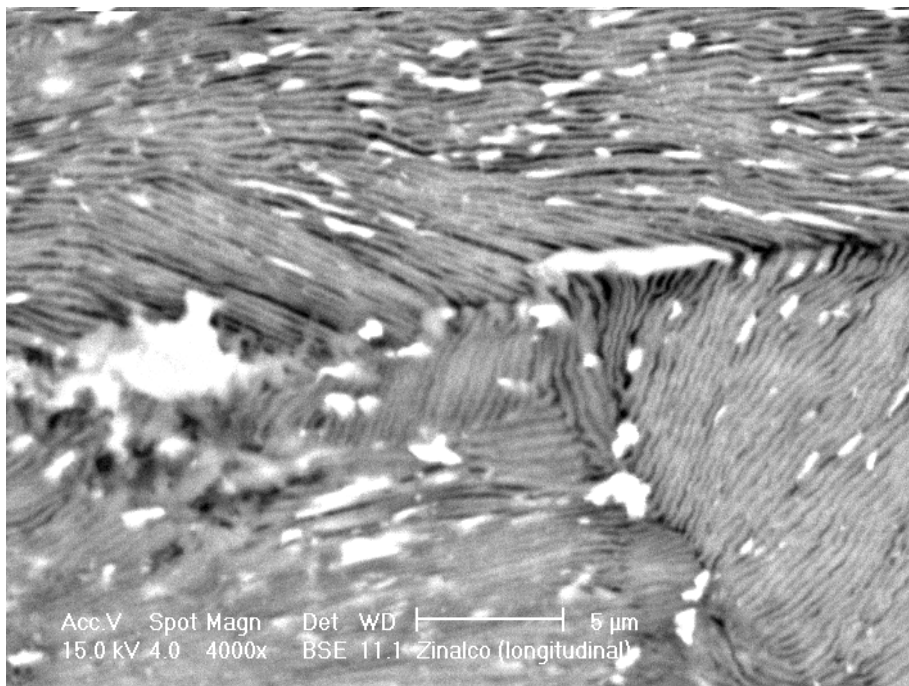
Se realizó un estudio metalográfico para observar las microestructuras iniciales y finales del proceso de extrusión con la finalidad de comprender los cambios en las propiedades mecánicas, mediante microscopía electrónica de barrido. Se empleó un microscopio electrónico, marca Philips, modelo XL20, para analizar la microestructura presente antes y después del proceso de deformación. Todas las muestras fueron atacadas con el siguiente reactivo: 15 ml HF + 4.5 ml HNO<sub>3</sub> + 9 ml HCl + 271.5 ml H<sub>2</sub>O.

Del estudio metalográfico del material de partida, se pudo apreciar una estructura de colada consistente en fase  $\eta$ , que corresponde a la fase rica en zinc, y a la fase  $\alpha$ , formada principalmente por el aluminio en forma de finas placas alternadas producto de la reacción eutécticoide. Fig. 4.30. Las microestructuras se obtuvieron de secciones longitudinales y transversales del tocho. En muestras recocidas, se observa la misma microestructura con la diferencia de que las placas son más finas que las del material de colada [25]. Figuras 4.31 a 4.33.

Microestructuras del material sin extruir

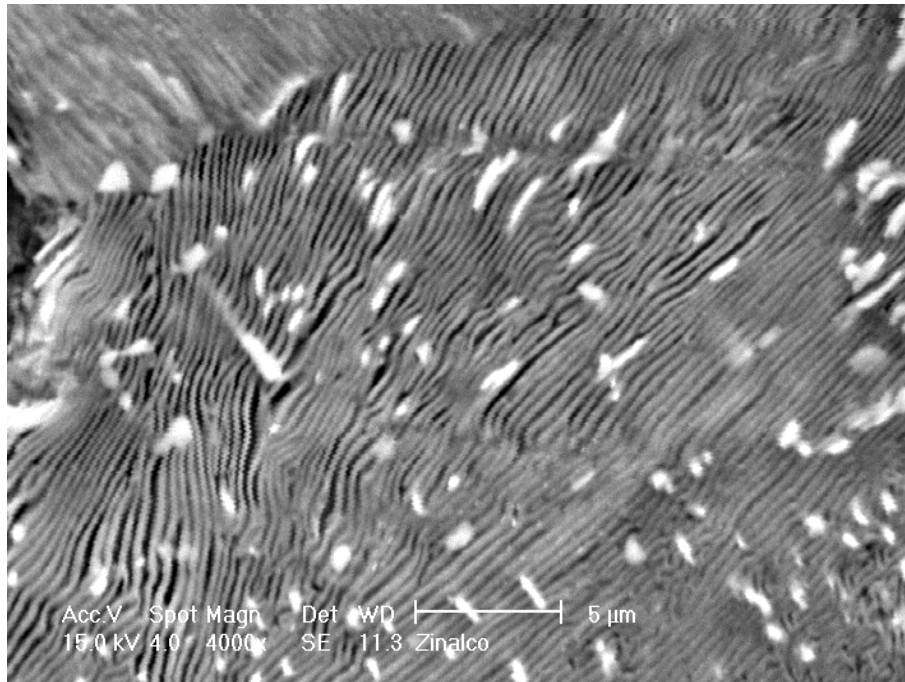


*Fig. 4.30. Zinalco 2%Cu, estructura de colada, 2000x, microestructura del tocho, estructura eutectoide, con partículas de zinc en la parte inferior. Sección longitudinal.*

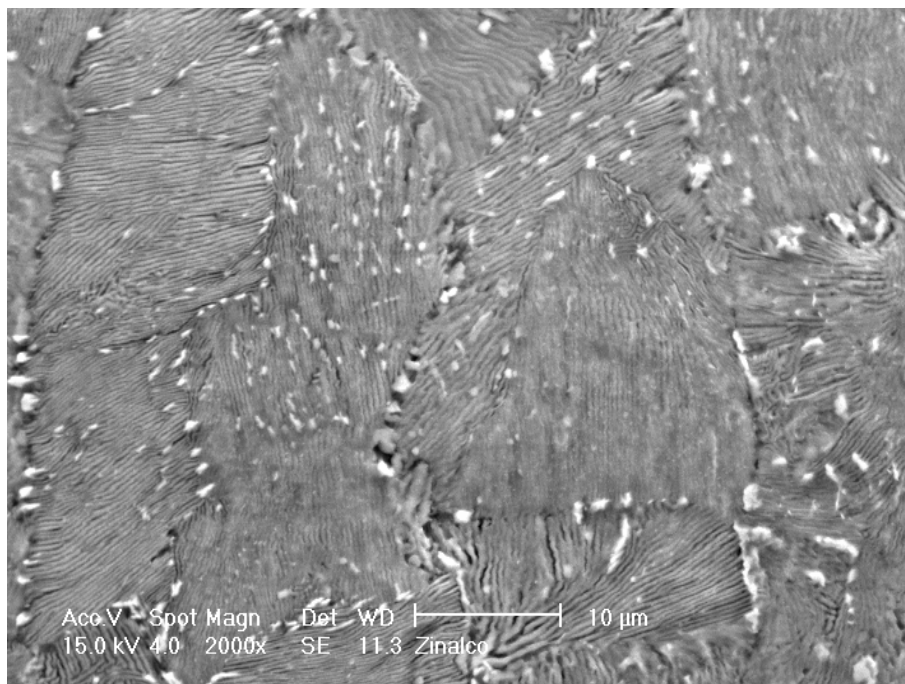


*Fig. 4.31. Zinalco 2%Cu, recocido, 4000x, microestructura del tocho, estructura eutectoide, con partículas de zinc. Sección longitudinal.*





*Fig. 4.32. Zinalco 2%Cu, recocido, 4000x, microestructura del tocho, estructura eutectoide, con partículas de zinc. Sección Transversal.*



*Fig. 4.33. Zinalco 2%Cu, recocido, 2000x, microestructura del tocho, estructura eutectoide, con partículas de zinc en los límites de grano. Sección Transversal.*

En las microestructuras de los productos extruidos se aprecian los cambios del porcentaje de deformación plástica, del contenido de cobre y del tratamiento térmico previo a la deformación. En casi todos los casos se puede apreciar que, como producto de la deformación plástica, se produce una disminución en la distancia entre las placas alternadas del material original, esto es, de la microestructura eutectoide. Figuras 4.34 a 4.37. A mayor porcentaje de deformación plástica, se rompe más la estructura de colada y, así también, el tamaño de grano es mas fino, sobretodo en las aleaciones que tienen un contenido de cobre del 2 y 5%, como se puede apreciar en las figuras 4.38 a 4.41. Lo anterior puede favorecerse debido al incremento de temperatura durante el proceso de extrusión y al enfriamiento rápido que sufre el producto extruido.

En las microestructuras de las aleaciones con 2 y 5% de cobre, la morfología de las fases cambia totalmente, formándose una microestructura de granos muy finos con un diámetro promedio de 1.5 a 3  $\mu\text{m}$ . La estructura laminar remanente (perlita) sufre una gran disminución en cantidad y tamaño. Generando una microestructura (ver Fig. 4.38) donde los granos muy finos de la fase rica en aluminio se encuentran distribuidos dentro de la fase continua rica en zinc. Lo anterior se puede apreciar tanto en la microestructura del corte longitudinal, como en la del corte transversal del producto.

### Microestructuras Extruidas

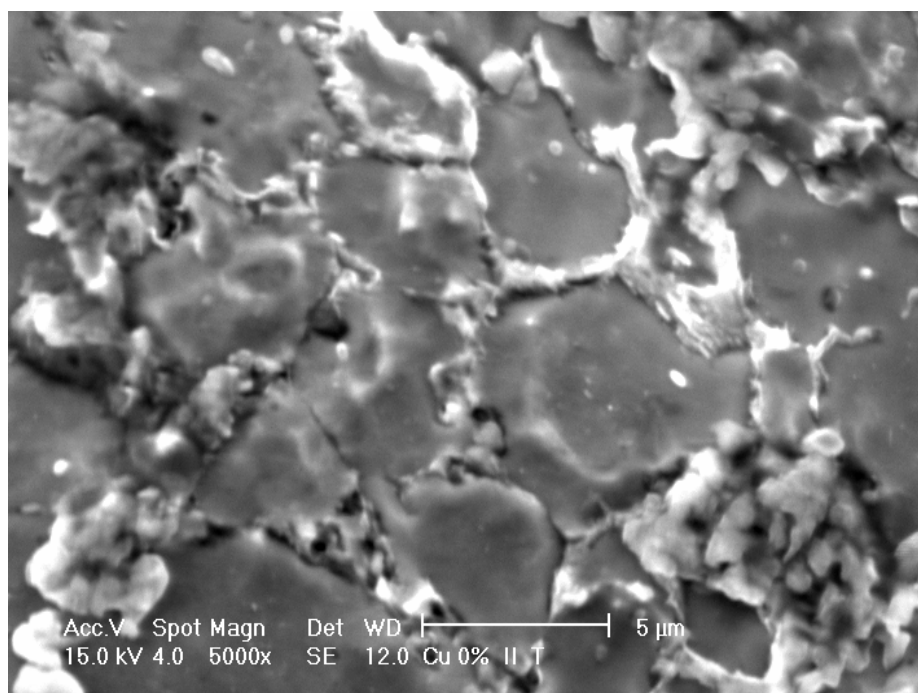


Fig. 4.34. Zinalco 0%Cu, recocido, 5000x, estructura extruída. Sección transversal.

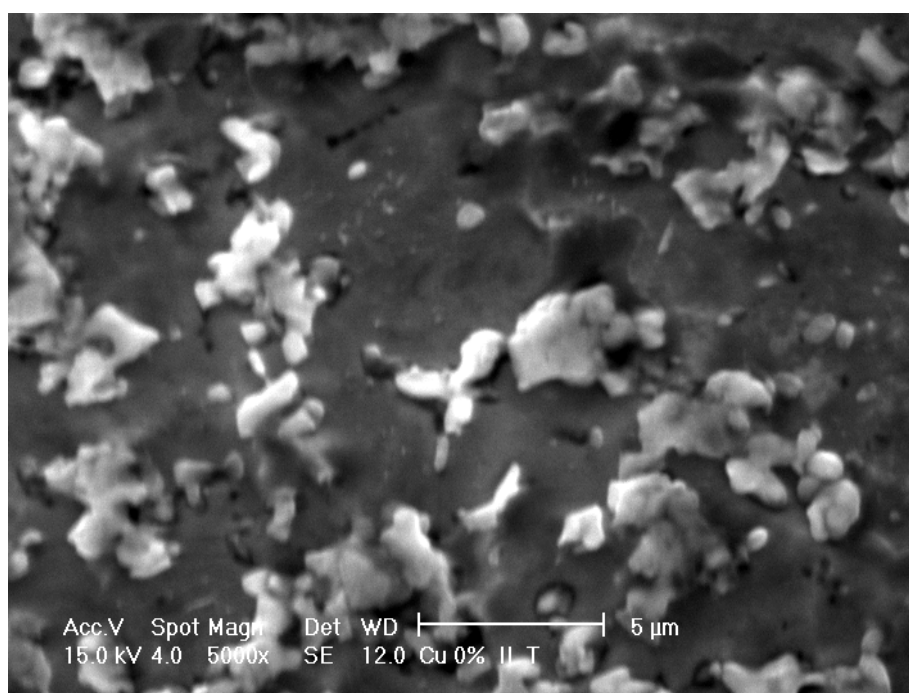


Fig. 4.35. Zinalco 0%Cu, recocido, 5000x, estructura extruída. Sección transversal.

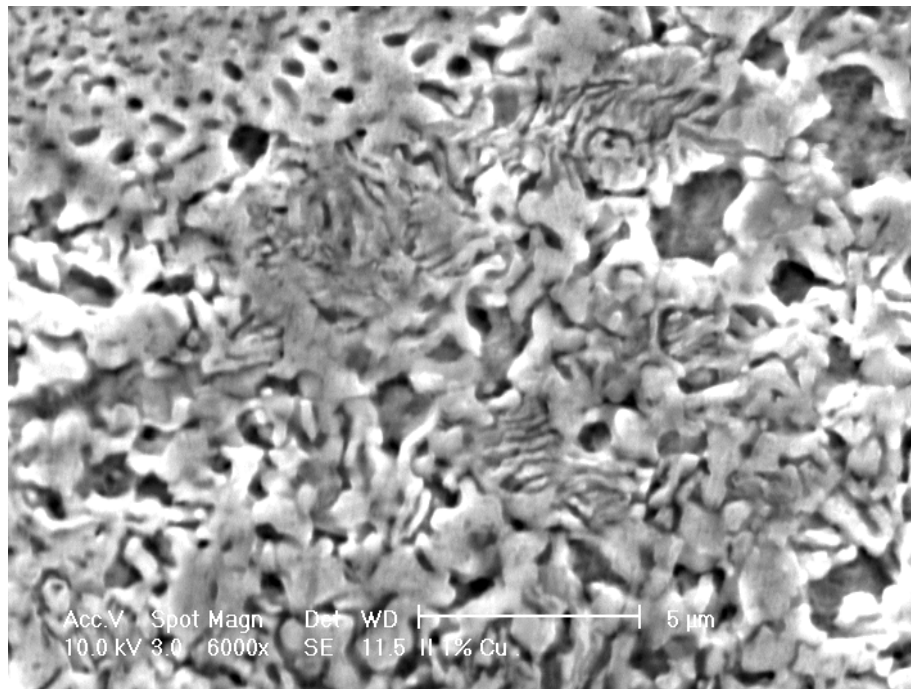


Fig. 4.36. Zinalco 1%Cu, recocido, 6000x, estructura extruída. Sección longitudinal.

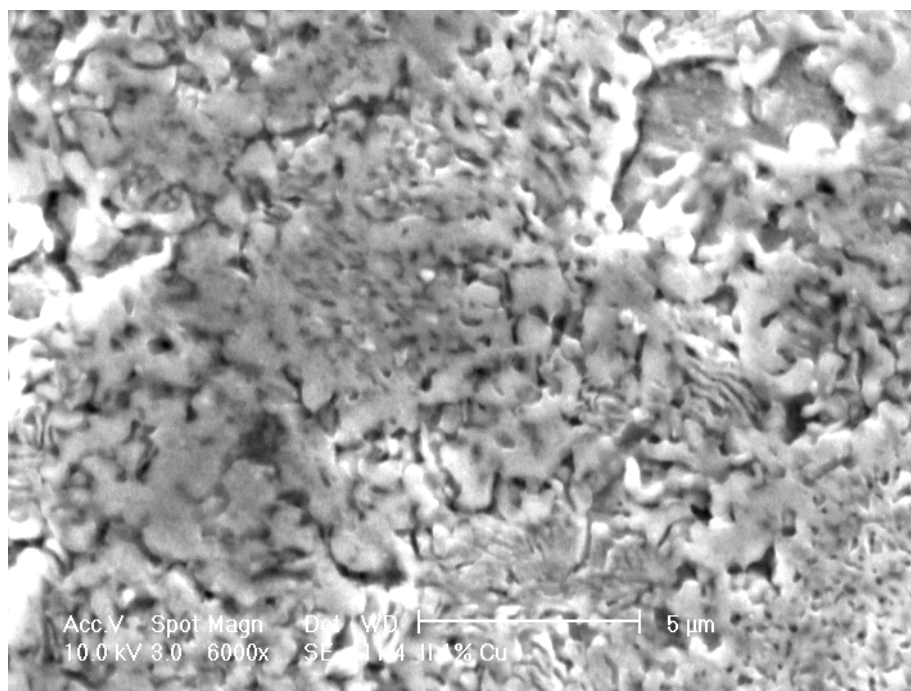


Fig. 4.37. Zinalco 1%Cu, recocido, 6000x, estructura extruída. Sección transversal.

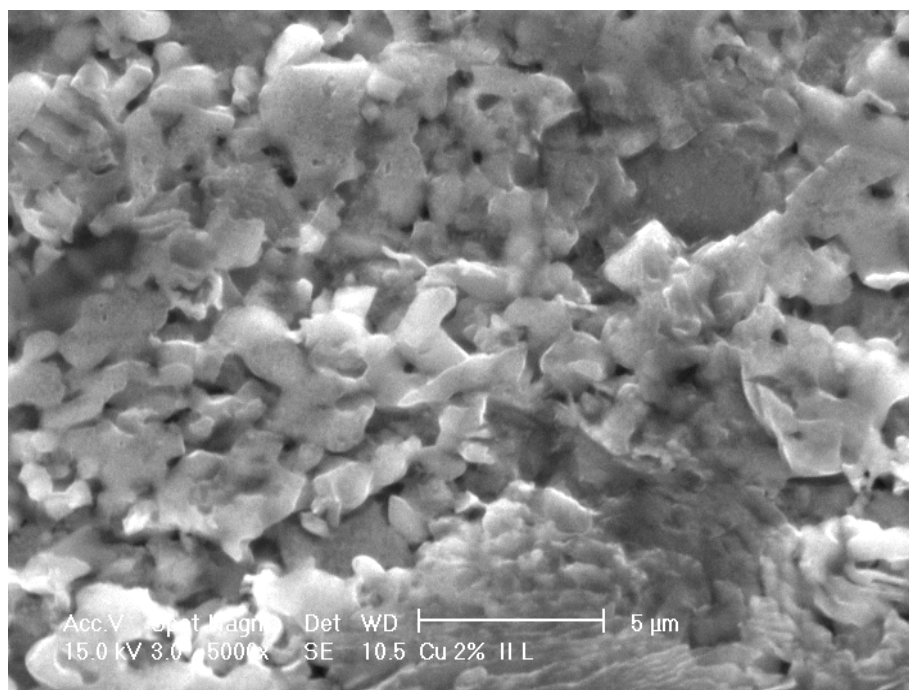


Fig. 4.38. Zinalco 2%Cu, recocido, 5000x, estructura extruída. Sección longitudinal.

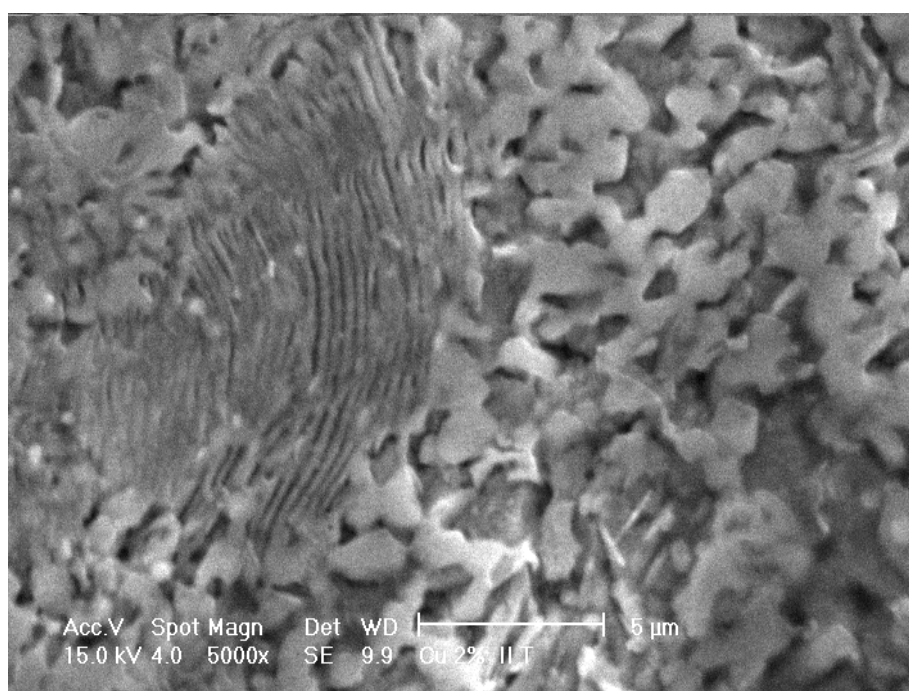


Fig. 4.39. Zinalco 2%Cu, recocido, 5000x, estructura extruída. Sección transversal.

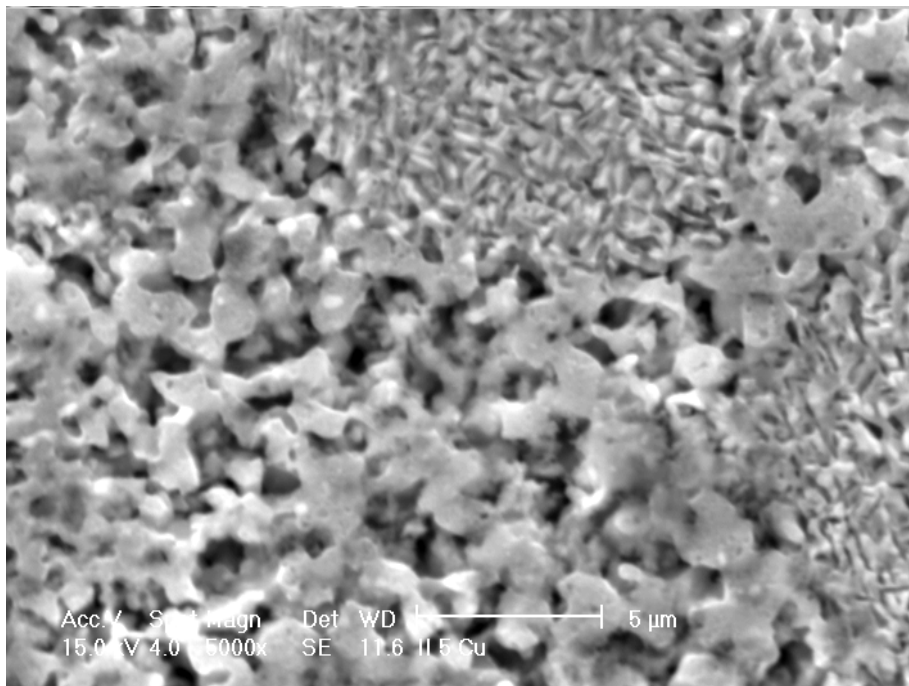


Fig. 4.40. Zinalco 5%Cu, recocido, 5000x, estructura extruída. Sección longitudinal.

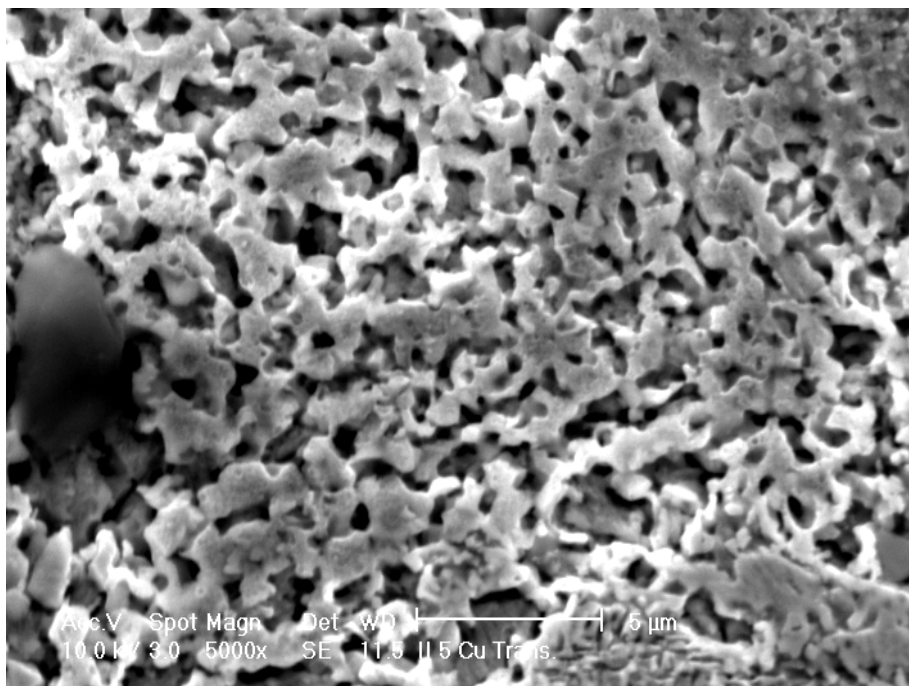


Fig. 4.41. Zinalco 5%Cu, recocido, 5000x, estructura extruída. Sección transversal.

#### **4.6 RESISTENCIA DE LOS PRODUCTOS EXTRUIDOS**

Con la finalidad de determinar las propiedades mecánicas de los productos extruidos se les realizó el ensayo de tracción (sólo hasta obtener la resistencia a la cedencia) obteniéndose los resultados presentados en la siguiente tabla. De éstos se obtuvieron las gráficas de resistencia a la cedencia contra la relación de extrusión para las distintas aleaciones con los diferentes contenidos de cobre. En las figuras 4.43, 4.44, 4.45 y 4.46 se puede apreciar que la resistencia a la cedencia disminuye conforme se incrementa la relación de extrusión, esto es, conforme se incrementa la deformación plástica, lo que ha de suponer que el cambio microestructural generado produce una microestructura de menor resistencia a la deformación. La disminución en resistencia es, en mayor porcentaje en las aleaciones con mayor contenido de cobre (2 y 5%), y menor porcentaje en las aleaciones con 0 y 1% de cobre.

En las figuras 4.47, 4.48 y 4.49 se muestran la resistencia a la cedencia en función del contenido de cobre para las distintas relaciones de extrusión ( $Re$ ). En los tres casos, se puede apreciar que la resistencia se incrementa a mayor contenido de cobre para cualquiera de los porcentajes de deformación. Lo anterior denota que la resistencia de estas aleaciones depende del contenido de cobre sin importar el grado de deformación plástica producido. La resistencia de las aleaciones que se deforman con el dado de menor relación de extrusión, presentan un mayor incremento en la resistencia con el contenido de cobre, a diferencia de las aleaciones que se deformaron con el dado 2 y con el dado 3, en el que el cambio de resistencia es muy pequeño con el incremento de contenido de cobre. Todo lo anterior refleja que el cambio microestructural producido por la extrusión genera una microestructura de menor resistencia y que está asociado con el grano fino que fue observado.

**TABLA 4.5. RESISTENCIA A LA CEDENCIA DE LOS PRODUCTOS EXTRUIDOS.**

<b>MUESTRA</b>	<b>% Cu</b>	<b>DADO</b>	<b>RESISTENCIA A LA CEDENCIA (MPa)</b>
1	0	1	255
2	0	1	245
3	0	1	250
<b>PROMEDIO</b>	<b>250 ± 5.0</b>		
4	1	1	335
5	1	1	330
6	1	1	330
<b>PROMEDIO</b>	<b>331.7 ± 2.35</b>		
7	2	1	335
8	2	1	315
9	2	1	365
10	2	1	330
<b>PROMEDIO</b>	<b>336.3 ± 18.15</b>		
11	5	1	400
12	5	1	355
13	5	1	355
<b>PROMEDIO</b>	<b>370 ± 25.98</b>		
14	0	2	185
15	0	2	185
16	0	2	193
<b>PROMEDIO</b>	<b>187.7 ± 4.62</b>		
17	1	2	270
18	1	2	260
19	1	2	265
<b>PROMEDIO</b>	<b>265 ± 5.0</b>		
20	2	2	268
21	2	2	265
<b>PROMEDIO</b>	<b>266.5 ± 2.12</b>		
22	5	2	287
23	5	2	300
24	5	2	246
<b>PROMEDIO</b>	<b>277.7 ± 71.14</b>		



**TABLA 4.5(cont). RESISTENCIA A LA CEDENCIA DE LOS PRODUCTOS EXTRUIDOS.**

<b>MUESTRA</b>	<b>% Cu</b>	<b>DADO</b>	<b>RESISTENCIA A LA CEDENCIA (MPa)</b>
25	0	3	95
26	0	3	105
27	0	3	100
<b>PROMEDIO</b>			<b>100 ± 5.0</b>
28	1	3	122
29	1	3	124
30	1	3	116
<b>PROMEDIO</b>			<b>120.7 ± 4.16</b>
31	2	3	100
32	2	3	110
33	2	3	105
<b>PROMEDIO</b>			<b>105 ± 5.0</b>
34	5	3	117
35	5	3	122
36	5	3	124
<b>PROMEDIO</b>			<b>121 ± 3.6</b>



*Fig. 4.42. Perfiles extruidos (izquierda) mostrando algunos defectos superficiales. Perfiles extruidos y probados a tracción (derecha).*

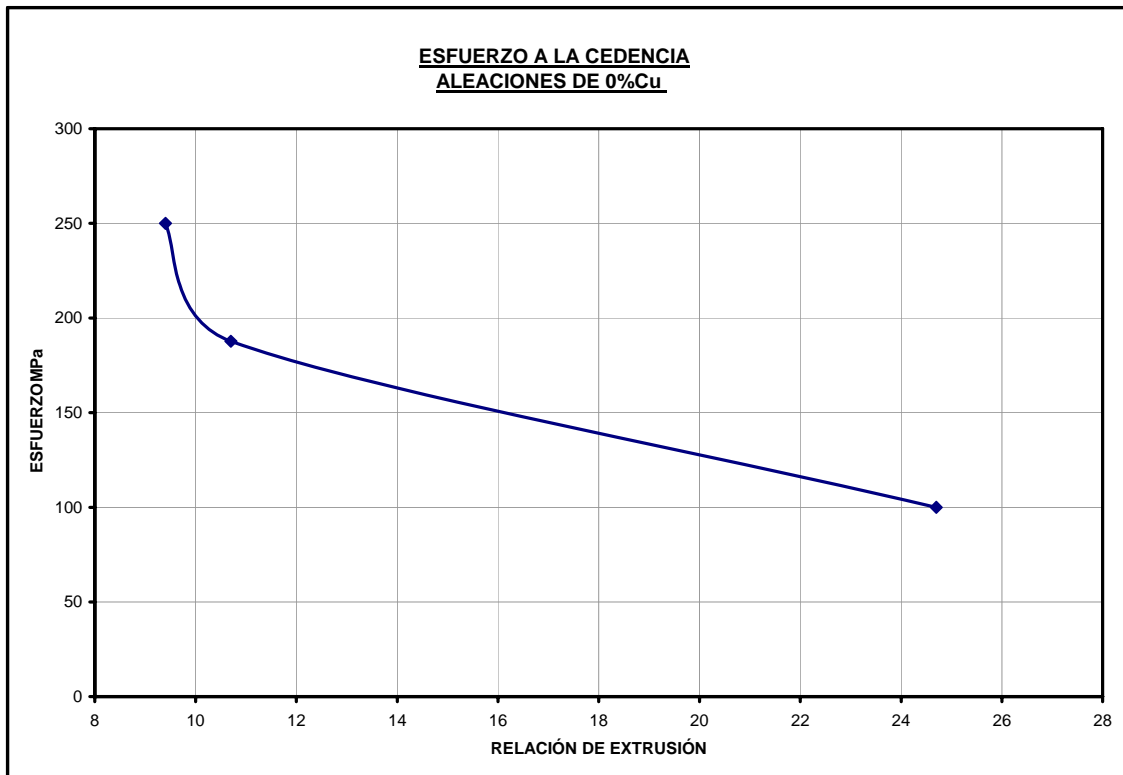


Fig. 4.43. Resistencia a la cedencia contra Relación de extrusión para una aleación Zinalco con 0%Cu.

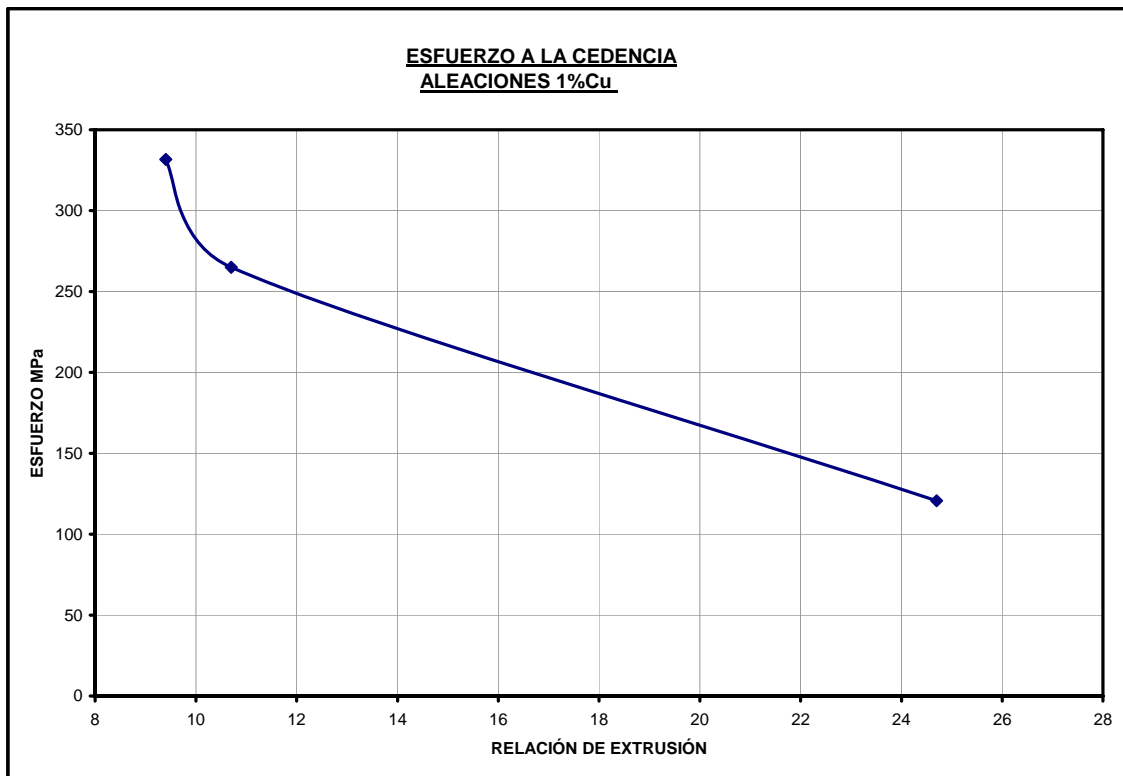


Fig. 4.44. Resistencia a la cedencia contra Relación de extrusión para una aleación Zinalco con 1%Cu.

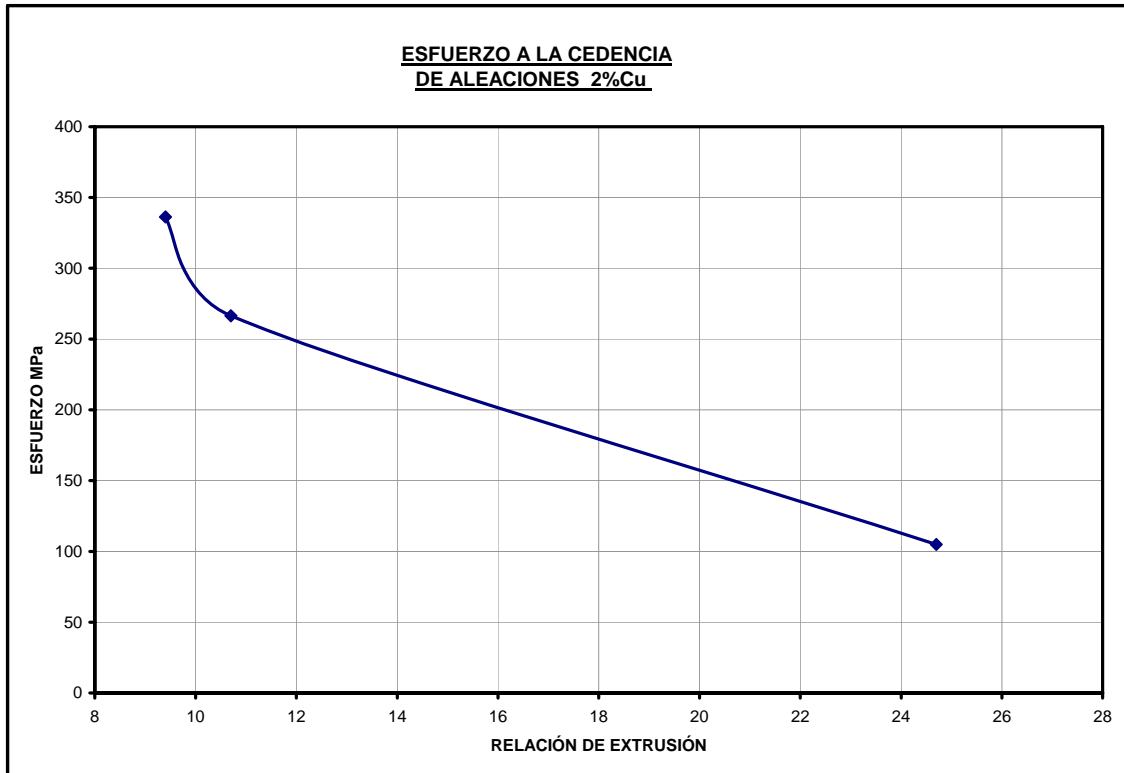


Fig. 4.45. Resistencia a la cedencia contra Relación de extrusión para una aleación Zinalco con 2%Cu.

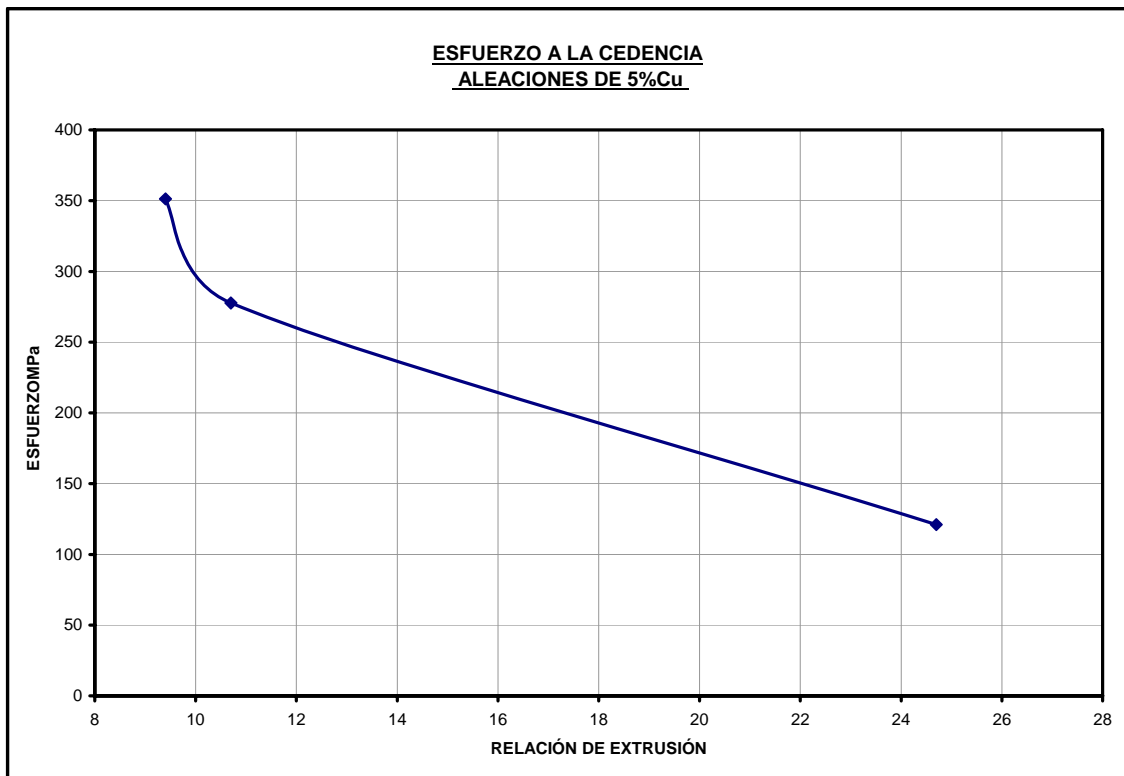


Fig. 4.46. Resistencia a la cedencia contra Relación de extrusión para una aleación Zinalco con 5%Cu.

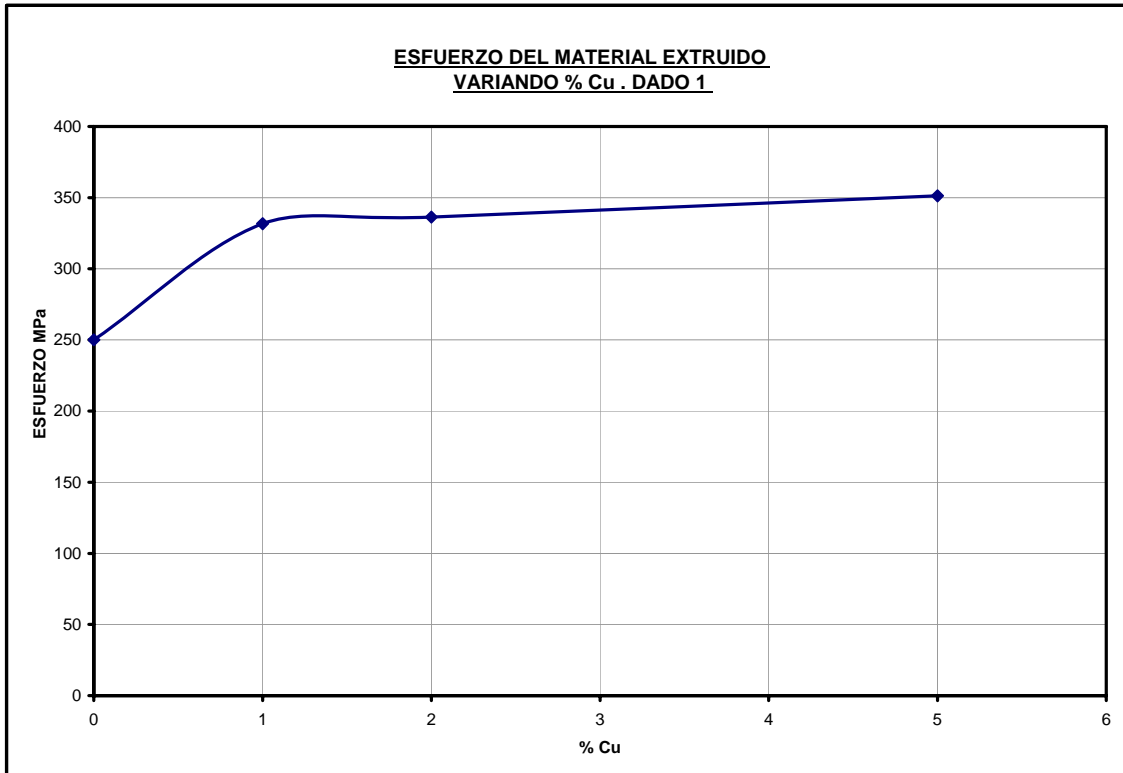


Fig. 4.47. Resistencia a la cedencia contra Porcentaje de Cu para un mismo porcentaje de deformación (Dado 1).

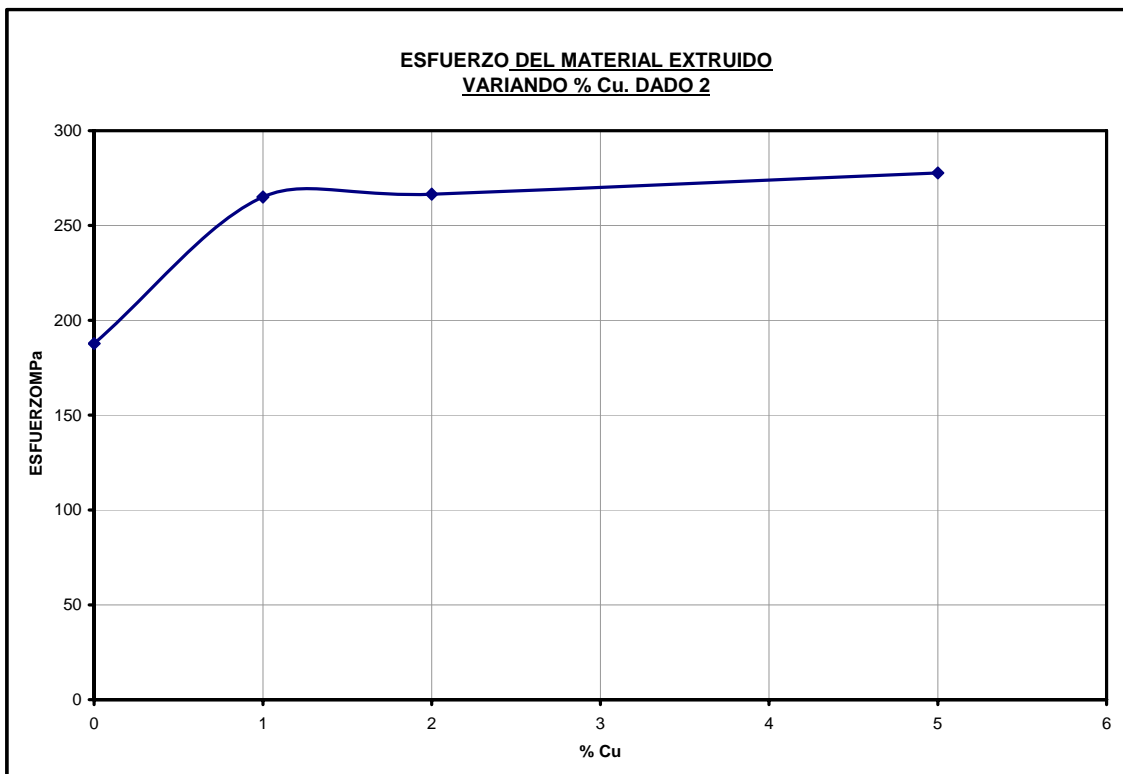


Fig. 4.48. Resistencia a la cedencia contra Porcentaje de Cu para un mismo porcentaje de deformación (Dado 2).

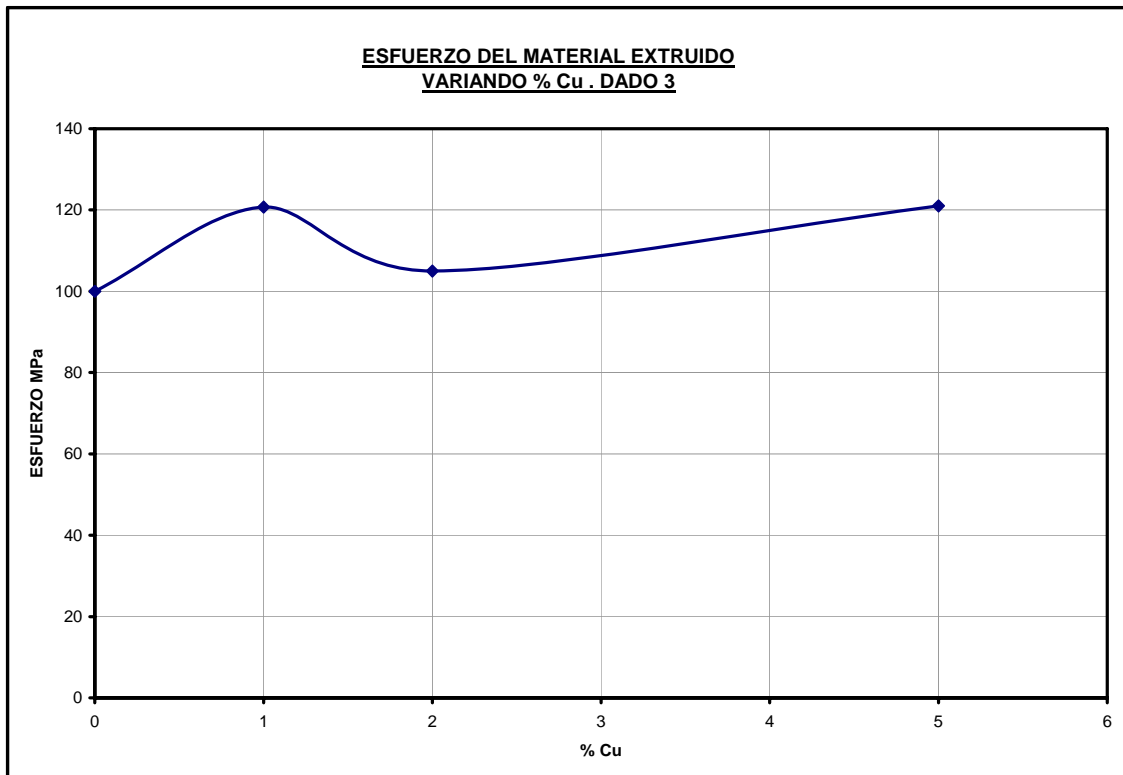


Fig. 4.49. Resistencia a la cedencia contra Porcentaje de Cu para un mismo porcentaje de deformación (Dado 3).

#### **4.7 PRODUCTOS DE EXTRUSION**

Con la finalidad de probar que el dispositivo de extrusión funciona para diferentes relaciones de extrusión y geometrías, así como verificar que los parámetros del proceso obtenidos son los apropiados, se diseñaron y construyeron otros dados con otras geometrías, como por ejemplo, para formar perfiles en forma de “U” y en forma de tubo. Se realizaron las extrusiones y se pudo ver el efecto de fricción entre el material y el dado se incrementaban, lo que ocasionaba que los perfiles extruidos se alabeaban. Lo anterior se puede apreciar en la gráfica carga – longitud del tocho adjunta a la fotografía del perfil, en la que se aprecian incrementos de carga y que corresponden a pequeñas irregularidades en la superficie del producto como se pueden apreciar en las figuras 4.50, 4.51 y 4.52.

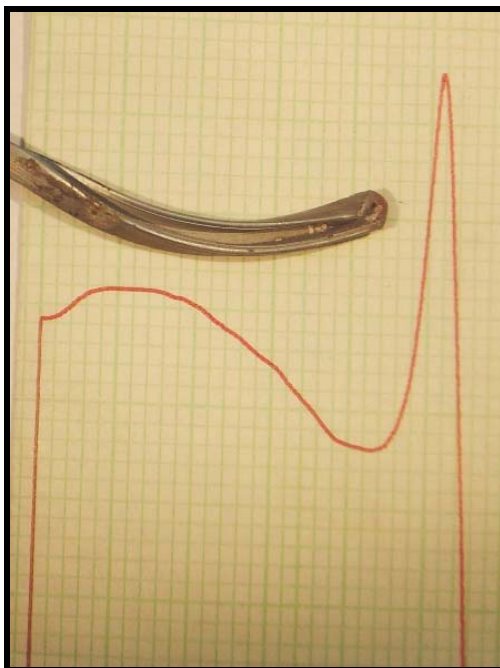


Fig. 4.50. Perfil en "U" extruido y gráfica Carga de extrusión-Longitud tocho.

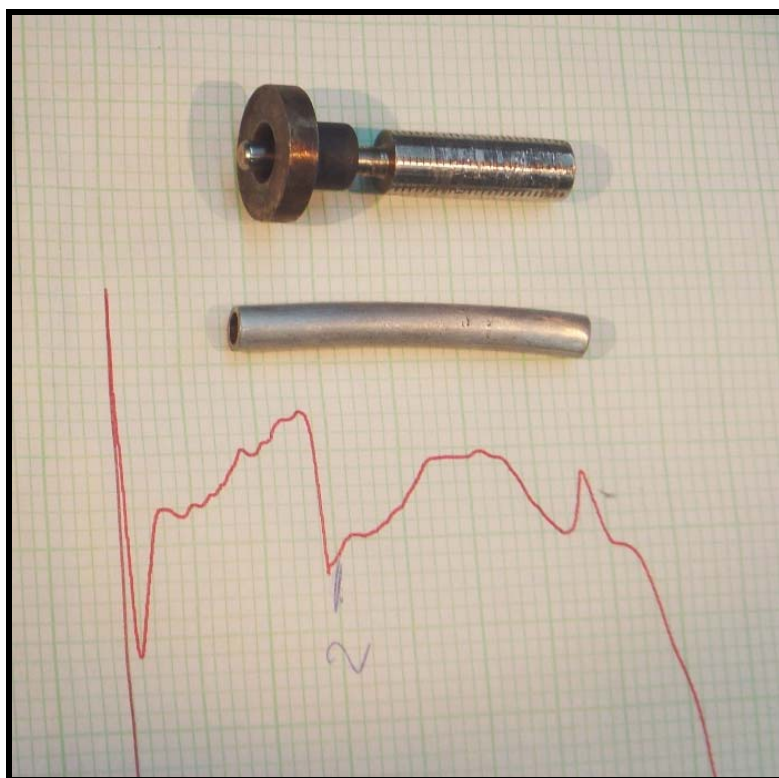


Fig. 4.51. Tubo extruido, dado-mandril y gráfica Carga de extrusión-Longitud tocho.

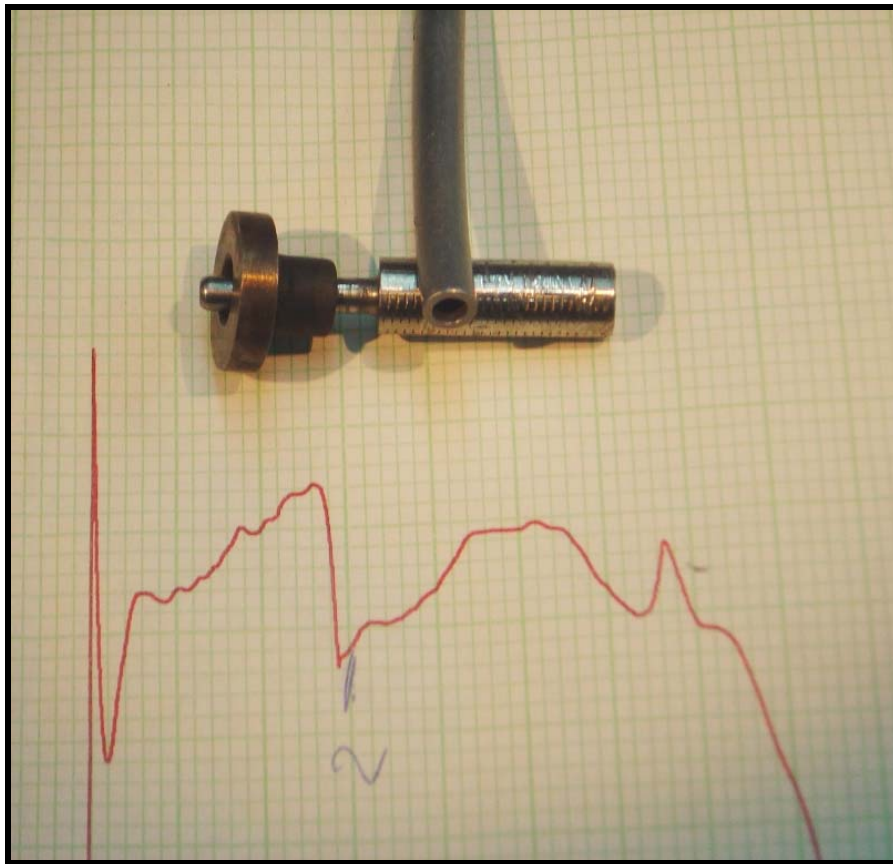


Fig. 4.52. Tubo extruido, dado-mandril y gráfica Carga de extrusión-Longitud tocho.

## **CAPÍTULO 5    DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS**

De todo lo anterior se pueden desprender las siguientes observaciones:

- El equipo empleado en la experimentación de este trabajo funcionó apropiadamente para extruir las aleaciones de Zinalco, permitiendo diferentes porcentajes de deformación con los cambios en los datos de extrusión, obteniendo relaciones de extrusión desde 9.4 hasta 24.7.
- Las gráficas obtenidas de extrusión son similares a la gráfica típica de carga de extrusión-longitud del tocho de una extrusión directa, en la que se puede apreciar que la carga tiende a disminuir, pero en muchos casos se presentó que no lo hace linealmente. Conforme disminuye la longitud del tocho, se presentó esta tendencia no lineal, y esto es debido a los efectos de fricción entre la superficie del material, cámara y dado. Lo anterior se reflejaba en las marcas que se presentaban en la superficie del producto extruido.
- De las gráficas carga de extrusión-longitud del tocho se puede apreciar que, en muchos casos, no hay un efecto sustancial de la lubricación empleada, ya que se pudo observar que el lubricante es expulsado de la cámara por la compresión inicial antes de que el material inicie la salida del dado, por lo tanto, se deberá diseñar otro método de aplicación del lubricante (y/o someter al producto a una carga de tracción durante el proceso).
- Se puede apreciar que, a mayor relación de extrusión, se incrementa la carga y la presión para todas las aleaciones con diferentes contenidos de cobre que se emplearon lo cual concuerda con los resultados de J. Negrete y G. Torres [1] [6] [7].
- De las figuras 4.15 a 4.18, se pueden obtener los diferentes valores de la constante de extrusión para los distintos contenidos de cobre, lo que permitirá estimar las cargas o presiones de proceso para otras relaciones de extrusión. Los valores de la constante  $k$  tienden a disminuir conforme se incrementa el porcentaje de cobre en las aleaciones de Zinalco. Para 0% Cu,  $k= 87.69$  [MPa]; 1% Cu,  $k= 46.83$  [MPa]; 2% Cu,  $k= 59.66$  [MPa]; 5% Cu,  $k= 26.27$  [MPa].



Esto es, el contenido de cobre (0 a 2%) hace que la presión requerida para extruir tienda a disminuir, posteriormente casi se mantiene constante y con 5% de cobre vuelve a disminuir.

- De la observación anterior, se puede establecer que el efecto del contenido de cobre que tiende a refinar la microestructura y reducir el tamaño de grano presente, se refleja en la carga requerida para deformar, y este efecto se mantiene constante después del 2%. El incremento en el contenido de cobre también tiene un efecto en el incremento a la resistencia al impacto [6].
- De la experimentación realizada, se puede destacar que a medida que se incrementa la temperatura, la carga de extrusión disminuye, obteniéndose los menores valores en el rango de 270 a 280°C para los cuatro tipos de aleaciones. Por lo que, a nivel industrial, se recomienda este rango de temperaturas de procesamiento para obtener las menores cargas posibles, lo cual era estimado, debido a que son las temperaturas cercanas a la eutectoide, donde existe la transformación de fase que sumado a la deformación plástica generada produce un refinamiento en la microestructura, lo que causa que la fuerza para extruir disminuya [8].
- Como era de esperarse, conforme se incrementa la velocidad de deformación se incrementa la carga requerida para deformar, (como ocurre en el aluminio) pero a velocidades de deformación superiores a 40 mm/min las cargas tienden a permanecer constantes, que en el presente trabajo no puede confirmarse por las limitantes de las cargas máximas que pueden aplicarse. Este efecto se asocia al crecimiento de los granos, por la permanencia del material en la cámara a altas temperaturas a bajas velocidades de deformación. Si por el contrario, la permanencia del material en la cámara es corto, la estructura predominante es laminar por falta de tiempo para el crecimiento de grano y la globulización de la estructura, que es lo que ocurre a altas velocidades de deformación [1].
- De los patrones de líneas de flujo, se puede estimar que el material presenta alta fricción, ya que se aprecian zonas de metal muerto que se generan durante el proceso, evidencia de esta fricción Fig. 2.11.

A su vez, en el mallado del tocho se presenta distorsión de las líneas, lo que puede producir defectos superficiales como los que se presentaron en algunos de los productos.

- De las microfotografías observadas, se aprecia un cambio microestructural relevante generado por la deformación plástica, a pesar de que la estructura inicial es la obtenida del proceso de fundición y que consiste en dendritas, produciéndose un refinamiento de la microestructura laminar y granos finos (de 1.5 a 3  $\mu\text{m}$ ), ver Figuras 4.38 a 4.41. Tratándose de la aleación de Zinalco, que presenta propiedades de superplasticidad, en las pruebas de tracción se observó que la resistencia disminuyó en las aleaciones con un mayor contenido de cobre y mayor porcentaje de deformación.
- También se observó la presencia de zonas de una estructura finamente dispersa rodeada de granos muy finos Fig. 4.40, producidas en una muestra que fue extruída en el dado 2 y con un enfriamiento rápido, que de acuerdo a lo explicado en el capítulo 1, puede tratarse de una estructura espinodal que es la estructura previa a la formación de la estructura laminar [26].
- De las pruebas de tracción realizadas a los productos extruidos, se obtuvo que a mayor porcentaje de deformación, la resistencia a la cedencia de los productos extruidos disminuyó considerablemente hasta en un factor de 3. Lo anterior, se asocia a una considerable disminución en el tamaño de grano y a la poca o nula presencia de la estructura laminar. Figuras 4.38 a 4.41. En los casos en que se presenta la estructura laminar la distancia interlaminar se reduce considerablemente.

## **CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES**

1. Se logró uno de los objetivos, que fue el de emplear un equipo de procesamiento de plásticos para simular el proceso de conformado mediante extrusión de aleaciones de Zinalco, empleando rangos similares de temperatura con las que se procesan algunos plásticos. Con el uso de la máquina de pruebas universales, se pudieron controlar las velocidades de aplicación de carga y así se obtuvieron las lecturas de las cargas resultantes con una mayor precisión.
2. Se confirmó que a las aleaciones de Zinalco, que tradicionalmente se procesan mediante fundición, es factible aplicarles procesos de conformado que implican altos porcentajes de deformación, como es el caso de la extrusión, y a temperaturas inferiores a las requeridas para deformar aleaciones de aluminio, que es uno de los principales metales que se procesa por este método.
3. Se determinaron las mejores condiciones de proceso, en particular la temperatura, la cual debe estar en el rango de 270 a 280°C y la velocidad de deformación de 40 mm/min. Con las anteriores condiciones el material se puede extruir con la menor fuerza posible y obtener estructuras de grano fino que favorezcan la alta deformación plástica de estas aleaciones.
4. Se obtuvo la constante de extrusión, y su tendencia, para estimar las presiones de extrusión requeridas para valores mayores de relación de extrusión para procesos industriales.

5. A partir de la determinación de las variables de extrusión, se pudo establecer el efecto del contenido de cobre en las aleaciones de Zinalco, teniéndose que para el mismo contenido de cobre la presión de extrusión se incrementa conforme se incrementa la relación de extrusión. Para la misma deformación, la presión de extrusión primero disminuye incrementando el contenido de cobre, y a porcentajes de 5% de cobre, la presión vuelve a incrementarse o se mantiene constante, encontrándose los menores valores de presión de extrusión entre el 1 y 2% de cobre.
  
6. La microestructura de los productos extruidos con alto contenido de cobre y alto porcentaje de deformación, revelan una disminución en el tamaño de la estructura laminar remanente y la formación de granos muy finos de 1.5 a 3  $\mu\text{m}$ . Este efecto de afino de grano se favorece con los altos porcentajes de deformación y un mayor contenido de cobre. Lo anterior se asocia a altos porcentajes de deformación plástica y baja resistencia a la cedencia.
  
7. Del patrón de flujo del metal extruido, se pudo verificar la presencia de fricción entre el tocho y la cámara, con un muy bajo o nulo efecto de los lubricantes empleados.
  
8. Existe un gran efecto del tratamiento térmico previo que se realiza al material a extruir, resultando valores muy similares de la presión de extrusión cuando se procesa a un material con estructura de fundición y a las muestras con una estructura obtenida del tratamiento de recocido. Es de destacar que, en el material con la estructura obtenida del tratamiento térmico de enfriamiento rápido, se obtuvieron las menores presiones de extrusión. Ello se relaciona a la reducción de tamaño de grano que se logra con este tratamiento.

A diferencia de otras aleaciones, las estructuras obtenidas de tratamiento de solución, a temperaturas superiores a la eutectoide, y enfriamiento rápido, favorecen la capacidad de deformación.

9. De los resultados de las pruebas de tracción aplicados a los productos extruidos, es notable la disminución de la resistencia a la cedencia a mayor porcentaje de cobre y a mayor porcentaje de deformación. Lo anterior está asociado con el refinamiento de grano que se pudo apreciar en las aleaciones con contenidos de cobre del 2 y 5%.

## **BIBLIOGRAFIA**

1. J. NEGRETE, G. TORRES VILLASEÑOR. 1995. Materials and Manufacturing Processes. Vol 10. pp 785-793.
2. GABRIEL TORRES VILLASEÑOR. 1988. Ciencia. Vol. 39. pp 103-111.
3. ASM International. Vol. 3. "Metals Handbook". 1992. USA.
4. ASM International. Vol. 2. "Metals Handbook". 1992. USA.
5. Y.H. ZHU, H.C. MAN. 1997. Materials and Manufacturing Processes. Vol. 12. pp 1149-1162.
6. J. NEGRETE, Y.H. ZHU, G. TORRES VILLASEÑOR. 1994. Materials Transactions. Vol. 35. pp 330-333.
7. GABRIEL TORRES VILLASEÑOR, J. NEGRETE. 1985. Revista Mexicana de Física 31. No. 3. pp 489-501.
8. GABRIEL TORRES VILLASEÑOR, J. NEGRETE SANCHEZ, ANTONIO A. TORRES CASTILLO. 1989. Memoria XV Congreso, Academia Nacional de Ingeniería. pp 276-280.
9. DONALD R. ASKELAND, PRADEEP P. PHULE. Ciencia e Ingeniería de los Materiales. 4ª ed. 2004. Editorial Thomson. México.
10. GEORGE E. DIETER. Mechanical Metallurgy. 3ª ed. 1988. Editorial McGraw-Hill. UK.
11. JOHN A. SCHEY. Procesos de Manufactura. 3ª ed. 2000. Editorial McGraw-Hill. México.
12. SU-HAI HSIANG, CHAO-SHUN LIAO. 1997. Journal of Materials Processing technology. Vol. 63. pp 254-259.
13. KALPAKJIAN, SCHMID. Manufactura Ingeniería y Tecnología. 4ª ed. 2002. Editorial Pearson Educación. México.
14. LANGE KURT. Handbook of Metal Forming. 1985. Editorial McGraw-Hill.
15. T. SAVASKAN, M.S. TURHAL. 2003. Materials Characterization. Vol. 51. pp 259-270.
16. YAO HUA ZHU, JULIO JUAREZ ISLAS. 1997. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 66. pp 244-248.

17. S.H. WSIANG, Y.W. LIN. 2007. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 192-193. pp 292-299.
18. MIKELL P. GROOVER. Fundamentos de Manufactura Moderna. 3ª ed. 2007. Editorial McGraw-Hill.
19. T.C.H. CHILDS. 1974. Metals Technology. pp 205-309.
20. D.Y. YANG, K.J. KIM. 2007. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 191. pp 2-6.
21. MENDOZA L. M., CUITLÁHUAC O.C., TORRES V.G. 1981. VII Congreso de la Academia Nacional de Ingeniería, A.C. Oaxaca, México. pp 244-248.
22. YONGJUN CHEN, QUDONG WANG, JIANGUO PENG, CHUNQUAN ZHAI, WENJIANG DING. 2007. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 182. pp 281-285.
23. TSUTOMU MURAI, SHIN-ICHI MATSUOKA, SUSUMU MIYAMOTO, YOSHINARI OKI. 2002. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 141. pp 207-212.
24. MARCO POLO GARCÍA MONTES. Tesis de Maestría "Refinamiento de Grano de Zinalco Mediante Extrusión en Canal Angular Constante". Posgrado en Ciencia e Ingeniería de Materiales. Instituto de Investigaciones en Materiales. UNAM. 2006.
25. ALBERTO RAMIRO SANDOVAL JIMENEZ. Tesis de Doctorado "Estructura y Cinética de la Transformación de Beta en la Aleación Zn-22Al". Facultad de Química. UNAM. 2002.
26. DORANTES ROSALES HÉCTOR, et al. Caracterización Microestructural de las Transformaciones de Fase en la Aleación Zn-22Al-2Cu Deformada. Episteme No. 22 Año 1. Octubre-Diciembre 2004.
27. ALBERTO RAMIRO SANDOVAL JIMENEZ, J. NEGRETE. GABRIEL TORRES VILLASEÑOR. 2000. Revista Mexicana de Física. No. 46. pp 361-366.
28. DONG-WOO SUH, SANG-YONG LEE, KYONG-HWAN LEE, SU-KEUN LIM, KYU HWAN OH. 2004. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 155-156. pp 1330-1336.

- 29.** E. MARTINEZ FLORES, G. TORRES VILLASEÑOR. 1997. *Materials and Design*. Vol. 18. pp 127-130.
- 30.** E. MARTINEZ FLORES, J. NEGRETE, G. TORRES VILLASEÑOR. 2003. *Materials and Design*. Vol. 24. pp 281-286.
- 31.** K. MUELLER, S. MUELLER. 2007. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 187-188. pp 775-779.
- 32.** M. MALPANI, S. KUMAR. 2007. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 190. pp 363-374.
- 33.** MITSUGU TOKIZAWA, NORIO TAKATSUJI. 1987. *Transactions of the Japan Institute of Metals*. Vol. 28. pp 994-1003.
- 34.** SAID R. CASOLCO, M. LOPEZ PARRA, G. TORRES VILLASEÑOR. 2006. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 174. pp 389-393.
- 35.** SU-HAI HSIANG, JER-LIANG KUO. 2003. *Journals of Materials Processing Technology*. Vol. 140. pp 6-12.