



# UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA

**FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS FÍSICAS Y NATURALES**

**ESCUELA DE INGENIERÍA AERONÁUTICA**

**PROYECTO INTEGRADOR**

## **Proceso de Extrusión de la Aleación de Magnesio AZ91D**

Alumno: Fernández, Gustavo Jorge

Director: Prof. Dr. Ing. Oldani, Carlos

Córdoba, 20 de Diciembre de 2016



## **Índice.**

Índice.....	1
1. Agradecimientos.....	3
2. Resumen.....	5
3. Hipótesis del Trabajo Final.....	6
4. Introducción.....	7
4.1. Aspectos Generales.....	7
4.2. El Magnesio.....	8
4.2.1. Historia del Magnesio.....	8
4.3. Utilización del Magnesio y sus Aleaciones en la Industria Aeronáutica.....	9
4.4. Propiedades del Magnesio Puro- Físicas, Químicas y Mecánicas.....	11
4.5. Las Aleaciones de Magnesio.....	13
4.5.1. Elementos Comunes de Aleación.....	14
4.6. La Aleación de Magnesio AZ91D.....	21
4.7. Propiedades de la Aleación de Magnesio AZ91D- Físicas y Mecánicas.....	24
4.7.1 Propiedades Físicas.....	24
4.7.2 Propiedades Mecánicas.....	24
4.7.3 Propiedades Térmicas.....	25
4.7.4 Otras Designaciones.....	25
4.8. El Proceso de Reciclado de las Aleaciones de Magnesio.....	25
5. Objetivos.....	31
6. Fundamentos de Proceso de Extrusión.....	32
6.1. Concepto de Extrusión.....	32
6.2. Clasificación del Proceso de Extrusión.....	34
6.3. Análisis del Proceso de Extrusión.....	40
6.4. Extrusión Directa Convencional en Caliente.....	44
6.5. Las variables del proceso de Extrusión Directa.....	45

6.6	Los Defectos en el Proceso de Extrusión.....	50
6.7	Dimensionamientos de la matriz y la prensa que intervienen en el proceso de extrusión directa.....	51
7.	Materiales y Metodología Experimental.....	55
7.1.	Materiales.....	55
7.2.	Aparatología Utilizada.....	55
7.3.	Dispositivo de Extrusión.....	59
7.4	Procedimiento del Proceso de Extrusión.....	62
8.	Resultados Obtenidos y Discusión.....	67
8.1.	Proceso de Extrusión.....	67
8.2.	Metalografía.....	67
8.2.1	Microestructura.....	68
8.3.	Ensayos Mecánicos.....	71
8.3.1.	Ensayo de Dureza.....	71
8.3.2	Ensayo de Tracción.....	72
9.	Conclusiones.....	74
10.	Referencias Bibliográficas.....	75
11.	Trabajos Futuros.....	76
	Anexo.....	77
Anexo 1	Planos del Dispositivo.....	78
Anexo 2	Mecanismo de Recristalización en Magnesio y Aleaciones de Magnesio.....	83

## **1. Agradecimiento.**

Este trabajo final quiero dedicarles, en primer lugar, a mis padres, Ernesto y Marta, porque plasmaron todo su sacrificio en esto que logré. Y a pesar de que ellos no se encuentran porque la salud de mi madre no lo permitió, yo sé que se pueden sentirse orgullosos de mí, por qué no les fallé y siempre seguí sus enseñanzas que son la honestidad, el trabajo duro, el sacrificio y la perseverancia.

A mis hermanos que siempre me apoyaron Pablo, Verónica, Ernesto, Vittorio, José Carlos y Gimena quienes me dieron apoyo moral y material.

A la familia que forme junto a Gaby, esa mujer luchadora y compañera en todos estos momentos, a mis hijas Melina y Ana Victoria, que son el motor de mi vida y a las que tengo que enseñar los valores de honestidad, perseverancia y sacrificio para poder guiar sus pasos en la vida.

Al Profesor Dr. Ingeniero Carlos Oldani quien me dio la posibilidad de hacer este trabajo final y que me enseñó como resolver problemas de ingeniería, al Profesor Ingeniero Luciano Grinschpun que me ayudó en la realización del trabajo, a los Profesores, Dr. Ingeniero Walter Castello y Roberto Lucci quienes me ayudaron en la toma de decisiones del diseño del dispositivo y de su temperatura de extrusión y cuerpo de Docentes que pudieron finalmente formar a este ingeniero a pesar de haber estado tantos años en la facultad.

A mi suegro Francisco y Celia que siempre nos apoyaron moral y económicamente por todas las necesidades que pasamos.

A la Familia Vittone: Gustavo, Maruca, Carlitos y Don Vittone quienes me acogieron como uno más de la familia cuando la situación económica de mi familia se complicó.

A mi Amigo Javier Mena y su familia, quien me ayudó con un empleo y me dio sabios consejos que me ayudaron a crecer mi autoestima y la Fe en mi futuro.

A mis amigos José Luis Fernández y su familia que supieron acobijarme y alentarme a seguir adelante en esta carrera, hoy le puedo decir a Don Fernández que nos acompaña desde el cielo que "Llegué".

A Gabriela y Miriam dos personas excepcionales, personal de esta facultad, que estuvieron en todo momento de mi vida, dentro y fuera de aquí, y que también me alentaron a poder llegar disfrutar este día.

A mis compañeros los Técnicos, Julio Costa y Alejandro Minghetti del INTI Mecánica Córdoba, que me colaboraron en la realización de los ensayos mecánicos y de la metalografía y dureza.

A mis Amigos Juan y Maximiliano Rolih, quienes se pusieron a disposición para la fabricación de todos los elementos para este trabajo y también por brindarme toda su experiencia en el tema.

A Alejandro, que me proveyó del material para este trabajo.

A mis Amigos Julián, Rubén, Marcos, Ignacio, Matías, Sebastián y a todos los amigos de “la pile” que en estos diez años de amistad supieron alentarme y acompañarme.

Al personal de la Biblioteca, que siempre me alentó a seguir adelante y con su trabajo diario pudieron formar a este profesional.

A todos, MUCHISIMAS GRACIAS!!! . . . Aquí están los resultados que ustedes esperaban de mí, no les fallé!

Este logro no es mío solamente, es el Esfuerzo y la Esperanza de todos.

**GRACIAS TOTALES!!!**

## **2. Resumen.**

La finalidad de este Proyecto Integrador es analizar la posibilidad de deformación plástica de la Aleación de Magnesio AZ91D, obtenida a partir de un proceso de re fusión de virutas de mecanizado. Los ensayos consisten en someter este material a un proceso de extrusión en caliente, para lo cual se realiza un estudio completo del material, del proceso de extrusión, se diseña un dispositivo para extruír y se desarrolla una metodología de trabajo. Los resultados muestran que el material se deforma plásticamente bajo la acción de cargas de compresión a alta temperatura.

El material resultante de estas experiencias fue caracterizado mediante el análisis del comportamiento de la estructura cristalina, la variación de la dureza y la variación de la resistencia máxima. Estos datos fueron comparados con las propiedades y microestructura del material original que no sufre deformación plástica.

Palabras claves: Aleación de magnesio AZ91D, propiedades del AZ91D, proceso de reciclado, extrusión directa en caliente, diseño de dispositivo de extrusión, procedimiento, ensayos mecánicos, metalografía, recristalización dinámicas.

### 3. Hipótesis del trabajo final

En este trabajo final la hipótesis que plantearemos es:

Es posible mejorar las propiedades mecánicas de una aleación de magnesio AZ91D, obtenida por re fusión de viruta, mediante el proceso de extrusión directa en caliente.

Para poder realizar este trabajo, se partió de un lingote de la aleación de magnesio AZ91D, obtenida de reciclado de virutas de mecanizado de la fábrica automotriz Volkswagen en la planta en Córdoba (Dr. Roberto Lucci [1]), como el que se ve en la Figura N°1.



Figura N° 1

El resultado final es la obtención de una barra extruida de la aleación (Figura N° 2).



Figura N° 2

## 4. Introducción.

### 4.1. Aspectos generales

El uso de las aleaciones de magnesio ha contribuido a la ingeniería por sus propiedades físicas, tales como la densidad mucho menor que la del aluminio, y por sus propiedades mecánicas tales como la resistencia a la tracción, resistencia al creep. También son de fácil mecanizado.

Todas estas variables hacen que sea una excelente posibilidad para el uso en la industria automotriz en la fabricación de piezas estructurales tales como la carcasa de la caja de la transmisión MQ-200. Estas cajas fundidas provienen de la empresa Rima Industria Brasileña, la cual provee a la planta de Volkswagen donde se realiza el mecanizado de las mismas.

Las aleaciones de magnesio también son usadas en la industria aeronáutica y espacial, donde se obtienen piezas como por ejemplo la carcasa de caja de cambios de helicópteros, como se ve en la Figura N°3.



Carcasa de caja de cambios de helicópteros de aleación de magnesio

Figura N°3[2]

También se usan para el área de componentes electrónicos como parte estructural de celulares y laptops.

Desde el punto de vista térmico las aleaciones de magnesio son buenas conductoras de calor y se las puede usar en partes que requieran ser refrigeradas por el medio circundante.

La creciente demanda de piezas mecanizadas de aleaciones de magnesio trae aparejado la dificultad que implica el almacenamiento de la viruta y el impacto medio ambiental. A tal efecto es que la legislación vigente Nacional y Provincial enmarcan al magnesio como material peligroso, prohibiendo su almacenamiento en las instalaciones industriales y su enterramiento a cielo abierto.

Esto es debido principalmente a dos razones. El contenido de diferentes metales como así de aceites provenientes de la refrigeración durante el mecanizado, ponen en riesgo de contaminación a los suelos y napas acuíferas. Por otro lado, el magnesio es un material altamente ávido de oxígeno y por lo tanto pirofosfórico. Además, reacciona con la humedad del aire liberando hidrógeno gaseoso aumentando el riesgo de incendio. En respuesta a estas dificultades es que surge la necesidad de la recuperación de la viruta AZ91D y su posible nueva aplicación.

## **4.2. El Magnesio.**

### 4.2.1. Historia del Magnesio.

El Magnesio fue descubierto en el siglo XVIII y el nombre antiguo pertenece a una ciudad griega de Magnesia en Tesalia. Es el octavo elemento más abundante ya que comprende el 2,7% de la corteza terrestre. Debido a la alta reactividad, el magnesio no se encuentra en forma elemental en la naturaleza, sino sólo en complejos químicos, ampliamente distribuidos en estructuras de roca, como por ejemplo la dolomita o la magnesita; agua de mar y suelo de los lagos. Las ventajas inherentes del magnesio incluyen una mezcla única de baja densidad, de alta resistencia específica, rigidez, conductividad eléctrica, buena disipación de calor y absorción de la vibración.

Cuando se combina las siguientes características tales como un fácil mecanizado, fácil de fundición, un buen conformado plástico y la posibilidad de ser reciclaje, el magnesio es visto como un material muy atractivo para un gran volumen de aplicaciones. En los últimos años el interés en el magnesio ha crecido de forma espectacular, lo que ha estimulado la investigación académica y ensayos industriales para identificar formas más eficientes de fabricación del metal

primario, así como la búsqueda de nuevas aleaciones y la extensión de las áreas de su aplicación. Este capítulo contiene los antecedentes históricos, elementos de la metalurgia física, una caracterización de aleaciones y ejemplos de aplicación.

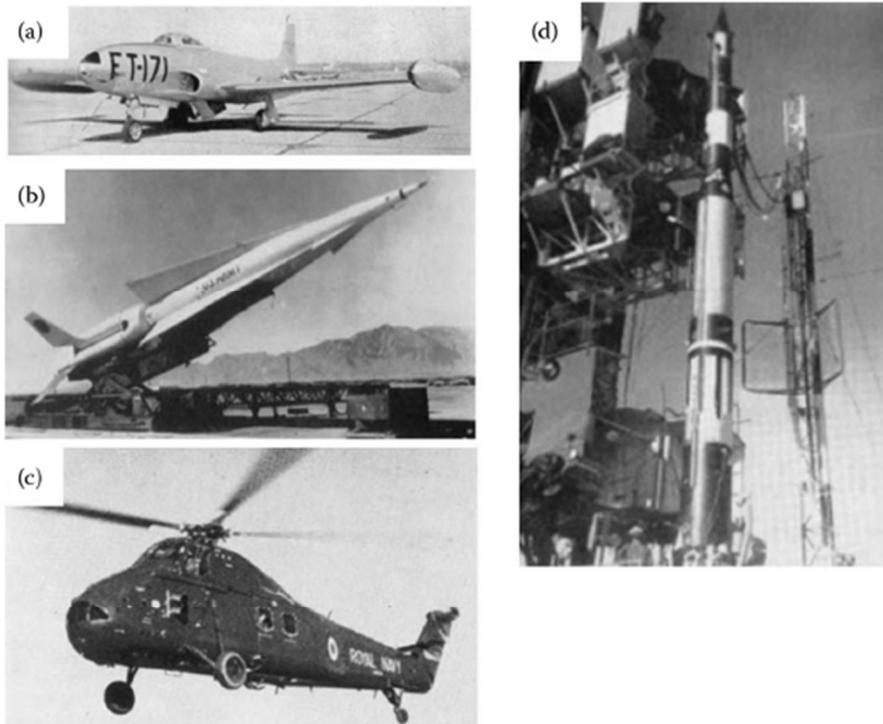
### **4.3. Utilización del Magnesio y sus Aleaciones en la Industria Aeronáutica.**

La reducción de peso es uno de los objetivos más importantes en la industria aeroespacial. La reducción del peso total de la aeronave contribuye al ahorro de combustible, lo que significa una caída en el costo operacional total. En la industria aeroespacial, el costo del combustible asciende a alrededor del 35-40% del gasto total de operación. Una reducción del 30% en el peso del avión ahorra cerca de 20% del combustible, lo que representa casi una reducción del 10% en costo de funcionamiento.

Los materiales estructurales con baja densidad y buenas propiedades mecánicas son deseables en aplicaciones aeroespaciales.

Se han utilizado varias alternativas de reducción de peso, como por ejemplo, el uso de aleaciones de aluminio, laminados metálicos de fibras y plásticos estructurales de baja densidad. La reducción de peso es cada vez más difícil con el aluminio. Los laminados de metal de fibra se pueden aplicar sólo para estructuras primarias con los requisitos más altos debido al alto costo. Para los plásticos estructurales de baja densidad, el bajo rendimiento a temperaturas bajas o elevadas, la ausencia de conductividad eléctrica, las bajas características de resistencia al impacto y la baja tolerancia al daño, limitan su aplicación. En comparación con estos materiales como se ha mencionado anteriormente, el magnesio y sus aleaciones atraen cada vez más la atención para aplicaciones en sistemas estructurales ligeros, especialmente en sistemas aeroespaciales. La densidad de magnesio es de aproximadamente  $1,74 \text{ g / cm}^3$ , lo que representa casi el 65% de la del aluminio, menos del 25% de la del acero y cerca de la de muchos polímeros.

De hecho, el desarrollo de las aleaciones de magnesio ha sido impulsado por el requisito de materiales ligeros en la industria aeroespacial. En el pasado, el magnesio se utilizó ampliamente en la Primera Guerra Mundial y de nuevo en la Segunda Guerra Mundial. El primer uso de magnesio en el sector aeroespacial fue en una aleación conocida como Duraluminio que contenía aluminio, cobre, manganeso y 2,8% de magnesio. Además, este metal fue utilizado para crear partes en el primer avión de metal con resultado exitoso y completo en 1917 que se llamó J7. En 1940, se construyó el primer avión casi completamente hecho de magnesio, el Northrop XP-56, pero nunca entró en producción en masa.



Aplicaciones del Magnesio en la industria aeroespacial: (a) Avión con fuselaje monocasco y alas todo fabricado en magnesio; (b) Misil que contiene lamina de Mg de aproximadamente 18 kg; (c) Helicoptero con chapa de magnesio cerca de 113 kg; (d) Cohete de lanzamiento de satélite de vanguardia que contiene en la parte trasera del deposito de la 2ª fase un revestimiento en la sección espaciadora y en la superficie de satélite de magnesio

Figura N° 4

En la antigua URSS, los aviones TU-95MS y TU-134 poseían 1550 y 780 kg de magnesio respectivamente, como se ve en la Figura N° 4. Las compañías aeronáuticas en ese momento (como Boeing, Aircraft Ltd.) también produjeron muchos aviones militares con aleaciones de magnesio.

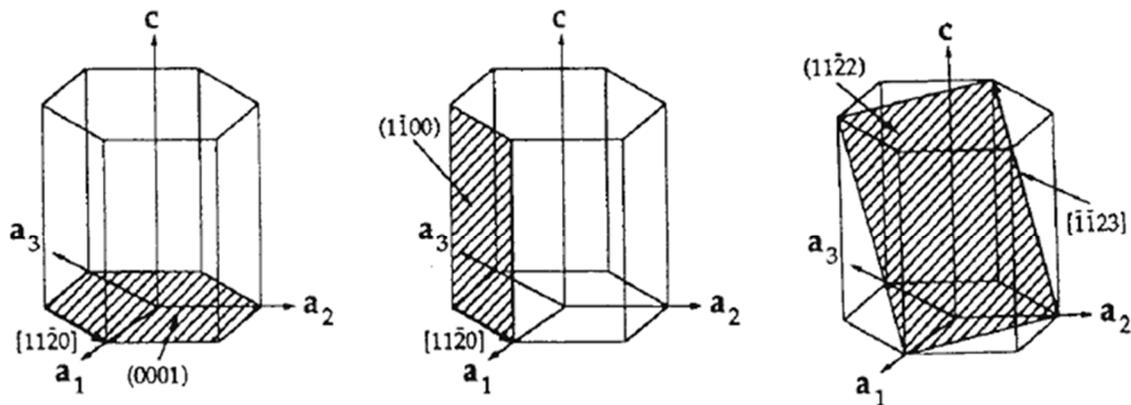
Antes de los años sesenta, el magnesio y sus aleaciones se utilizaban principalmente en la industria aeroespacial y militar. La producción de magnesio fue de 250.000 toneladas por año durante la guerra, que disminuyó dramáticamente a 10.000 toneladas por año después de la Segunda Guerra Mundial. La producción aumentó otra vez a 110.000 toneladas por año cuando ocurrió la guerra de Corea, y entonces cayó otra vez. Posteriormente, las aleaciones de magnesio también se utilizaron en aplicaciones civiles y su producción aumentó constantemente. Especialmente desde la década de 1980, muchos países desarrollados comenzaron a hacer planes de desarrollo y pusieron mucho dinero en la investigación sobre el magnesio y sus aleaciones en consideración al medio ambiente y al ahorro energético.

Sin embargo, las aleaciones de magnesio tienen algunos problemas serios. La corrosión, la pobre ductilidad a temperatura ambiente inducida por la estructura hexagonal inherente, junto con la dramática degradación del rendimiento a alta temperatura impiden en gran medida algunas aplicaciones de las aleaciones de magnesio. Con una comprensión más profunda de las aleaciones de Mg, los problemas mencionados anteriormente se han resuelto gradualmente. El desarrollo de sistemas de aleación complejos (las principales aleaciones comerciales de magnesio incluyen la serie AZ (Mg-Al-Zn), la serie AM (Mg-Al-Mn), la serie AE (Mg-Al-RE), la serie EZ (Mg-RE-Zn), la serie ZK (Mg-Zn-Zr) y la serie WE (Mg-RE-Zr), el procesamiento avanzado (como la solidificación rápida, la metalurgia de polvos, la fundición, etc.), el proceso tecnológico (la alta velocidad de rodado, laminación transversal, etc.), promueven en gran medida las perspectivas de aplicación de aleaciones de magnesio en el área aeroespacial. [3]

#### 4.4. Propiedades del Magnesio Puro- Físicas, Químicas y Mecánicas.

El magnesio pertenece a los metales alcalinos térreos, que ocupan el segundo grupo principal de la tabla periódica de elementos. [4] El símbolo es **Mg**; el número atómico es 12, el peso atómico es 24,3050, el diámetro atómico es 0,320 nm y el volumen atómico es 14,0 cm<sup>3</sup>/ mol. Su configuración electrónica es 1s<sup>2</sup>, 2s<sup>2</sup>, 2p<sup>6</sup>, 3s<sup>2</sup>.

Este metal tiene un color blanco plateado. Su estructura cristalina es HCP, (empaquetamiento hexagonal compacta) como se ve en la Figura N°5. Los parámetros de la red cristalina del magnesio puro a temperaturas ambiente son  $a = 0.32092$  nm y  $c = 0.52105$  nm. La relación  $c/a$  es igual 1.6236, que está cerca del valor ideal de 1.633. [5]



Celdas Unitara y los planos y direcciones principales

Figura N°5

Los parámetros de esta red cristalina se incrementan con el aumento de la temperatura, según la ecuación N°1.

$$a = 0.32075 + (7.045 \cdot \Delta T + 0.0047 \cdot \Delta T_2) \cdot 10^{-6} \text{nm}$$

$$c = 0.5276 + (11,758 \cdot \Delta T + 0,0080 \cdot \Delta T_2) \cdot 10^{-6} \text{nm}$$

Ecuación N° 1

Donde  $\Delta T$  es la temperatura en °C.

- **Propiedades Físicas[6]**

La densidad en la fase sólida es 1,738 g/cm<sup>3</sup> a 20 °C, y de 1,650 g/cm<sup>3</sup> a 650 °C.

- **Propiedades Eléctricas**

Resistividad es de 45,3  $\mu\Omega$  m en el eje a y 37,8  $\mu\Omega$  m en el eje c

- **Propiedades Térmicas**

Temperatura de punto de fusión es de 650  $\pm$  1 °C

Temperatura de punto de ebullición es de 1090 °C

Expansión térmica es de 26,1  $\mu\text{m}^\circ\text{C}$  20-100 °C y 29.9  $\mu\text{m}^\circ\text{C}$  20-500 °C

Conductividad Térmica (fase sólida) es de 156 W/m K 27 °C a 27 °C, 149 W/m K 27 °C a 327 °C y 130 W/m K 27 °C a 650 °C.

Conductividad Térmica (fase líquida) es de 78 W/m K 650 °C.

Calor latente de fusión por mol es de 8,954 kJ/mol

Calor latente de fusión por unidad de volumen es de 5,90 J/m<sup>3</sup>

Calor de Vaporización es de 127,4 kJ/mol

Capacidad de Calor específico es de 1,025 kJ/kg K a 20 °C

- **Propiedades Químicas**

Su alta reactividad química se explota a menudo para su uso en la reducción de los compuestos de otros metales y en la protección contra la corrosión como ánodo de sacrificio.

- **Propiedades Mecánicas**

Módulo de Young es de 45 GPa

Módulo de Corte es de 17,2 GPa

Resistencia a la tracción va de 80 a 180 MPa

Alargamiento va de 1 – 12%

Dureza va de 30 a 47 HB

Coefficiente de Poisson es de 0.35

Viscosidad 1,23 mPas a 650 °C y 1,13 mPas a 700 °C

Tensión superficial es de 0,56 N/m a 650 °C.

#### **4.5. Las Aleaciones del Magnesio [ 7]**

El magnesio puede ser aleado con otros metales si se va a emplear para aplicaciones de ingeniería. La clasificación de las aleaciones empleadas fue realizada principalmente de acuerdo con el método de fabricación, subdivisiones que indican su composición y aplicación. En consecuencia, en la primera clasificación tenemos: la fundición en arena, en coquilla, fundición a presión, forja, extrusión y laminación. A continuación se realizan subdivisiones según la composición.

Hay que tener en cuenta el tamaño del radio atómico para formar aleaciones y, en este metal, pocos elementos de aleación son apropiados.

La solubilidad de la solución sólida está a menudo restringida por el efecto de valencia y debido a la afinidad química por elementos tales como el silicio y estaño lo que conduce a la formación de compuestos estables.

En consecuencia, hay sólo diez elementos que pueden considerarse elementos de aleación. Se puede esperar que estos elementos (que se disuelven) modifiquen las características mecánicas tales como ductilidad, las propiedades elásticas y dureza. Sólo las adiciones disueltas pueden modificar las constantes elásticas a menos que se consideren compuestos.

Cuando se forman compuestos intermetálicos, estos, restringen la ductilidad y a menudo tales aleaciones se pueden utilizar solamente como aleaciones de fundición. La formación de intermetálicos puede ser usada para mejorar la resistencia a la fluencia siempre y cuando los precipitados se puedan formar con el tamaño y distribución correctos. La secuencia de precipitación y el proceso de precipitación son críticos para determinar la idoneidad de una aleación para aplicaciones en las que es necesaria la resistencia a la fluencia.

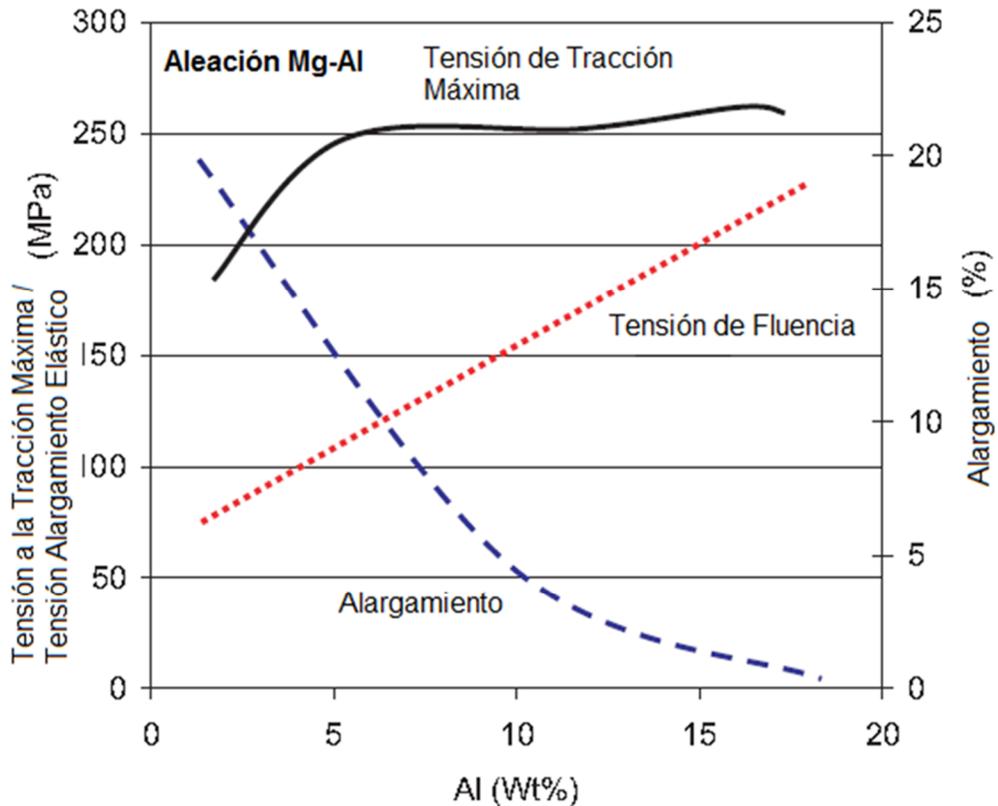
#### **4.5.1. Elementos Comunes de Aleación**

##### **– Aluminio**

El aluminio es el elemento de aleación más comúnmente utilizado y forma la base de las aleaciones fundidas. Este es uno de los elementos principales que constituyen la aleación de magnesio AZ91D. La solubilidad máxima es 11,5% (12,7% en masa) y las aleaciones con más del 6% en masa pueden ser tratadas térmicamente. En la Figura N° 6-a podemos observar el comportamiento de las propiedades mecánicas con el contenido de aluminio en las aleaciones. Las aleaciones Mg-Al son fácilmente moldeables. La resistencia al creep está limitada por la pobre estabilidad térmica de la fase  $Mg_{17}Al_{12}$ . En la Figura N° 6-b vemos el comportamiento de las curvas de la aleación de magnesio AZ con el contenido de Aluminio,

##### **– Calcio**

El Calcio como aleante es cada vez más común en el desarrollo de aleaciones resistentes al creep - esencialmente por el reemplazo del compuesto intermetálico  $Mg_{17}Al_{12}$  por  $Al_{12}Ca$ . El Ca puede actuar como un desoxidante de la masa fundida o en los pasos subsiguientes del tratamiento térmico, mejorando la capacidad de laminado. Pero un porcentaje de Ca > 0,3% en masa puede reducir la capacidad de soldadura.



La influencia del contenido de Aluminio con las propiedades mecánicas de la aleación Mg-AL

Figura N° 6 –a

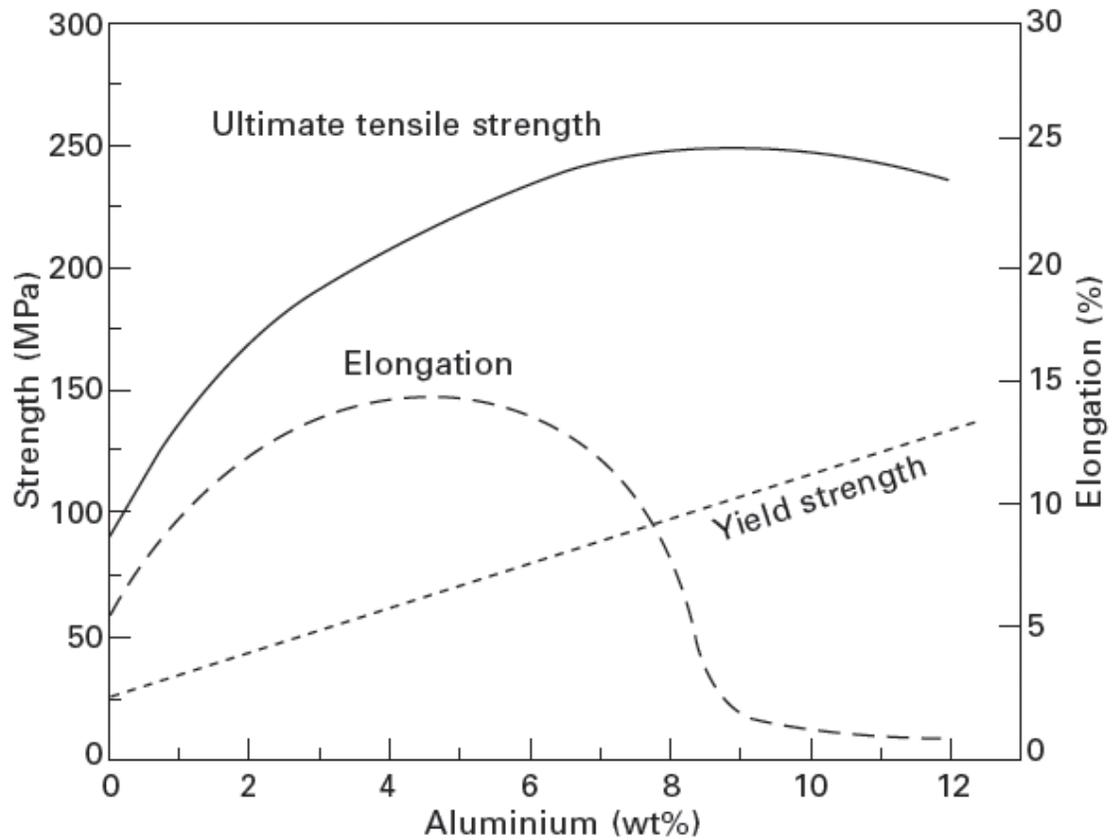
– Litio

Es el único elemento de aleación para reducir la densidad de las aleaciones por debajo de la del magnesio. Además, es soluble hasta 17,0% en peso (5,5% en masa). La adición de Li disminuye la resistencia pero aumenta la ductilidad. Las constantes elásticas también se mejoran algo.

– Manganeseo

El manganeseo normalmente no se emplea sólo sino con otros elementos, por ejemplo el Al, con el cual se forman los compuestos  $MnAl$ ,  $MnAl_6$  o  $MnAl_4$ . Reduce la solubilidad del hierro y produce compuestos relativamente inocuos. Aumenta el

límite de elasticidad y mejora la resistencia a la corrosión de las aleaciones MgAl y MgAlZn en agua salada. La cantidad máxima de manganeso es 1,5-2% en masa.



Efecto del aluminio contenida en las propiedades tensoras de un calor trate aleación de magnesio

Figura N°6-b [8]

#### – Tierras Raras

Las tierras raras se añaden a las aleaciones de magnesio para mejorar la resistencia a altas temperaturas y resistencia al creep. Normalmente se añaden como Mischmetal (contienen cerio, lantano y neodimio o didimio, neodimio y praseodimio).

- Silicio

El silicio aumenta la fluidez de las aleaciones fundidas. En presencia de hierro reduce la resistencia a la corrosión. Se emplea en muy pocas aleaciones ( $AS_{21}$  y  $AS_{41}$ ).

- Plata

La plata aumenta la respuesta al endurecimiento por envejecimiento y las propiedades a alta temperatura de las aleaciones que contienen torio o tierras raras ( $AgRE_{22}$  y  $AgTh_{21}$ ).

- Torio

La adición de torio confiere resistencia al creep hasta el  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Mejora la capacidad de moldeo. Las aleaciones son soldables. Su uso se está eliminando debido a que el torio es radiactivo.

- Itrio

El itrio se utiliza en conjunción con tierras raras para mejorar la resistencia a alta temperatura y al creep, hasta los  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

- Zinc

El zinc es una de las adiciones más comunes en el magnesio. Se utiliza junto con Al (por ejemplo, AZ91 o con circonio, torio o tierras raras).

– Circonio

Es un agente refinador de granos. Se puede utilizar con aleaciones que contienen cinc, tierras raras, torio, itrio o una combinación de los mismos, pero no en aleaciones que contienen aluminio o manganeso, ya que forman compuestos estables con circonio. También forma compuestos estables con hierro, silicio, carbono, nitrógeno, oxígeno e hidrógeno en la masa fundida. Solamente el circonio disuelto es eficaz como refinador del grano.

Existen varios elementos que se presentan como impurezas en las aleaciones de magnesio:

- Berilio

El berilio es sólo ligeramente soluble. Se utiliza para disminuir la oxidación de la masa fundida. Puede causar un aumento del tamaño de grano.

- Cobre

El cobre afecta negativamente a las propiedades de corrosión si está presente en una cantidad mayor que 0,05% en masa, aunque mejora la resistencia a altas temperaturas.

- Hierro

Es una impureza muy perjudicial ya que reduce la resistencia a la corrosión. Para una buena resistencia a la corrosión, se especifica el límite superior de 0,005% en masa.

- Níquel

También es una impureza dañina. Reduce considerablemente la resistencia a la corrosión incluso en pequeñas cantidades. Como con el hierro se especifica un límite superior de 0,005% en masa para tener una buena resistencia a la corrosión.

- Estaño

Pequeñas cantidades de estaño, junto con pequeñas cantidades de aluminio, sirven para mejorar la ductilidad y reducen la tendencia al agrietamiento durante el forjado.

Del listado anterior se hace evidente que están disponibles pocos elementos para producir las propiedades deseadas. A medida que la búsqueda de nuevas y mejores aleaciones continúa, se están investigando otros elementos para aleaciones inusuales, por ejemplo, escandio, estroncio, terbio y gadolinio.

En la Tabla N°1 se presenta la forma de clasificar las aleaciones de magnesio.

Primera parte	Segunda parte	Tercera parte
Indica los dos principales elementos de aleación	Indica las cantidades de los dos elementos principales	Distingue entre diferentes aleaciones con los mismos porcentajes de los dos principales elementos de aleación.
Consiste en dos letras de código que representan los dos principales elementos de aleación dispuestos en orden de porcentaje decreciente (o alfabéticamente si los porcentajes son iguales)	Consta de dos números que corresponden a porcentajes redondeados de los dos principales elementos de aleación y dispuestos en el mismo orden que las designaciones de aleación en la primera parte	Consiste en una letra del alfabeto asignada para que las composiciones se conviertan en estándar.
Al - Aluminio Cu - Cobre RE - Tierra Rara Th - Torio Zr - Circonio Mn - Manganeseo Ag - Plata Si - Silicio Sn- Estaño Y - Itrio Zn- Cinc		A - Primera composición registrada en ASTM B - Segunda composición registrada con ASTM C - Tercera composición registrada con ASTM D - Alta pureza registrada con ASTM E - Alta corrosión registrada con ASTM X1 - No registrado con ASTM

## Denominaciones de temple para aleaciones de magnesio

Designación	Explicación
F	Como-Fabricado
O	recocido, recristalizado (sólo productos forjados)
H	Endurecimiento por deformación en frío (Sólo productos forjados)
H1	Solamente endurecido
H2	Endurecido y parcialmente recocido
H3	Endurecido y Estabilizado
W	Solución tratadas térmicamente
T	Solución tratada con calor para producir temple estables
T2	Recocido (Sólo productos colado)
T3	Solución tratada con calor, trabajado en frío, envejecido naturalmente
T4	Solución tratada con calor y envejecido naturalmente
T5	Envejecimiento artificial
T6	Solución tratada con calor y envejecido artificialmente
T7	Solución tratada con calor y hiperenvejecido.
T8	Solución tratada con calor, trabajado en frío, envejecido artificialmente
T9	Solución tratada con calor, envejecido artificialmente y trabajado en frío
T10	Artificialmente Envejecido, Trabajado En Frío

[9]Tabla N°1

### **4.6. Las Aleaciones del Magnesio AZ91D**

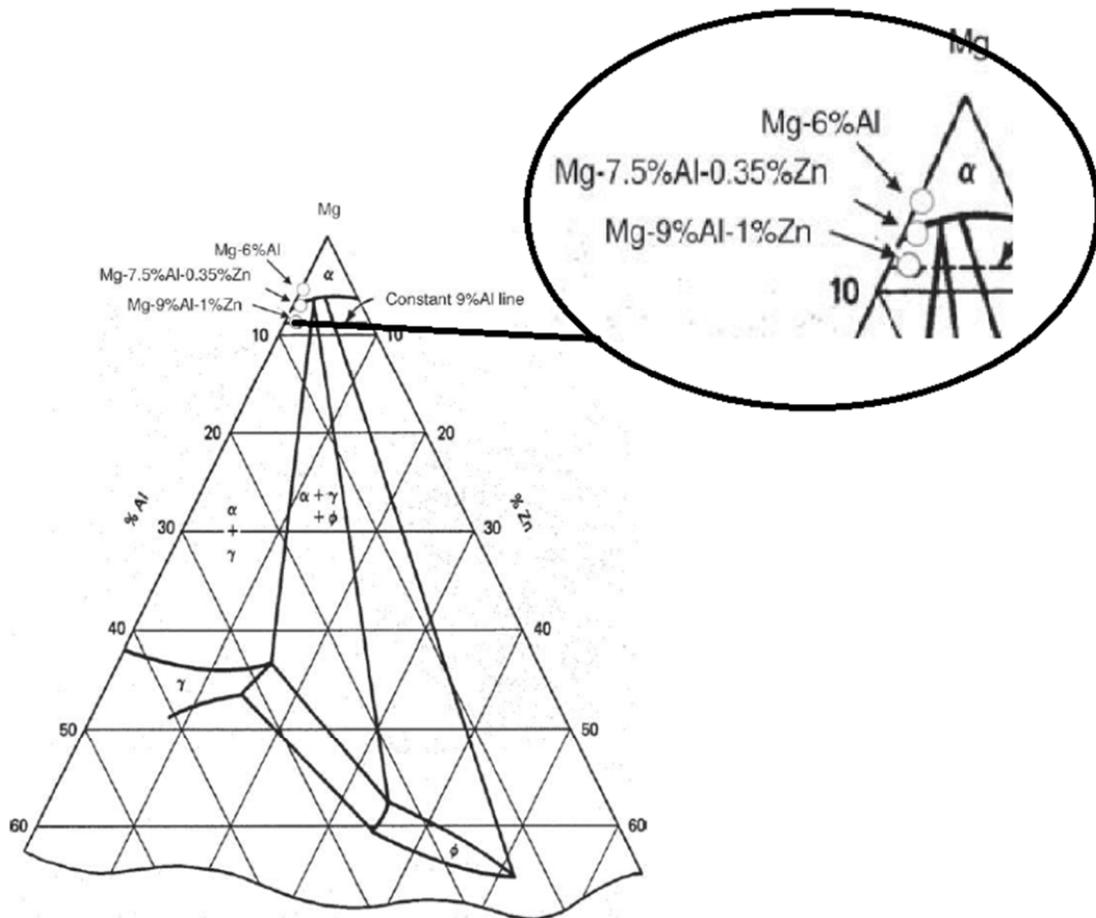
Para el caso de la aleación de magnesio AZ91D utilizada en este trabajo, AZ son los componentes principales: Aluminio y Zinc, en un 9% en peso y en un 1% en peso, respectivamente. La letra D indica Alta Pureza según esta clasificación ASTM.

Esta es una aleación en la que sus principales elementos aleantes le darán las características mecánicas. En el diagrama ternario de la figura N° 7 se ve dónde se encuentra de acuerdo a su composición química.

Es la aleación de magnesio de fundición a presión más ampliamente utilizada, con propiedades de alta resistencia para componentes estándar en la construcción de automóviles y computadoras, equipos domésticos y deportivos y muchas otras aplicaciones. Posee excelentes características de colado, con muy buen flujo y capacidad de llenado. En la Figura N° 7 podemos observar el diagrama ternario Mg- Al- Zn a temperatura constante de 335 Cola aleación AZ91D se encuentra cerca del vértice del Mg.

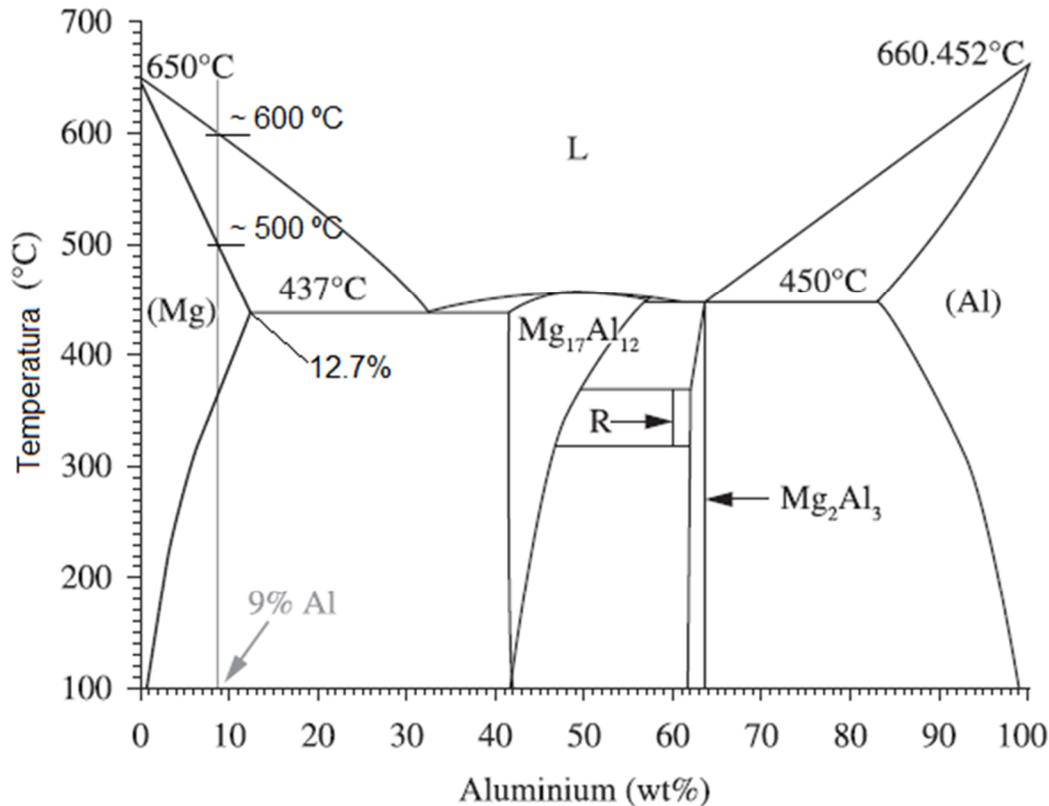
La composición de la Aleación de Magnesio AZ91D es [11]:

**Mg: 90%; Al 8,3-9,5%; Zn 0,35-0,9%; Mn: 0,15-0,50%; Cu: 0,025%; Si: 0,08%; Fe: 0,005%; Ni: 0,001%; Otros: 0,01%.**



Una sección del diagrama de fase ternario para Mg-Al-Zn a una temperatura de 335 ° C.

Figura N° 7



Fase del diagrama Binario Mg-Al

Figura N°8

Como ya se dijo, el aluminio es uno de los elementos de aleación más importantes del magnesio. Varias aleaciones contienen Al hasta 10% en masa. La Figura N° 8 muestra el sistema Mg-Al. El aluminio es uno de los pocos metales que forma solución sólida fácilmente con el magnesio. Por encima del límite de solubilidad, precipita un compuesto intermetálico frágil, Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> en los bordes de grano. El límite de solubilidad del aluminio a la temperatura eutéctica es de 12,7% en peso (12% en masa) y cae hasta aproximadamente 1% a temperatura ambiente. En consecuencia, el Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> desempeña un papel dominante en la determinación de las propiedades. Las aleaciones comerciales basadas en Mg-Al, por ejemplo AZ91, AZ81 y AZ63, contienen también adiciones de zinc.

Es una de las aleaciones fundidas con alta fluidez y las aplicaciones principales son para conseguir paredes delgadas en el moldeo por inyección porque para ello se requiere que las aleaciones tengan una alta fluidez. La aleación para fundición a presión AZ91D es la de mayor consumo por el mercado de piezas de paredes delgadas. Dado que la aleación fue diseñada hace mucho tiempo para fines generales, su aplicación para componentes más delgados y

ligeros, combinados con un acabado superficial de alta calidad, causa algunas veces defectos superficiales y reduce el rendimiento de producción[ 12]

#### **4.7. Propiedades de la AZ91D – Físicas y Mecánicas**

##### **4.7.1. Propiedades físicas**

Las propiedades físicas de la aleación de magnesio AZ91D se dan en la siguiente tabla:

Propiedades	Métrico
Densidad	1,81 g / cm <sup>3</sup>
Punto de fusión	600 ° C

##### **4.7.2. Propiedades mecánicas**

Las propiedades mecánicas de la aleación de magnesio AZ91D se describen en la siguiente tabla:

Propiedades	Métrico
Resistencia a la tracción	230 MPa
Fluencia (0,2%)	150 MPa
Módulo elástico	44,8 GPa
Módulo de cizallamiento	17 GPa
Relación de Poisson	0,35
Elongación a la rotura (en 50 mm)	3%
Dureza, Brinell	63
Dureza, Vickers (estimado de Brinell)	71

### **4.7.3. Propiedades térmicas**

Las propiedades térmicas de la aleación de magnesio AZ91D se destacan en la siguiente tabla:

Propiedades	Métrico
Coeficiente de dilatación térmica (a 0,000100 °C / 32212 ° F)	26 $\mu\text{m} / \text{m} \text{ } ^\circ \text{C}$
Conductividad térmica	72.7 W / mK

### **4.7.4. Otras Designaciones**

Los materiales equivalentes a la aleación de magnesio AZ91D en otras normativas son:

EN 1753 MC 21120

ASTM B 94

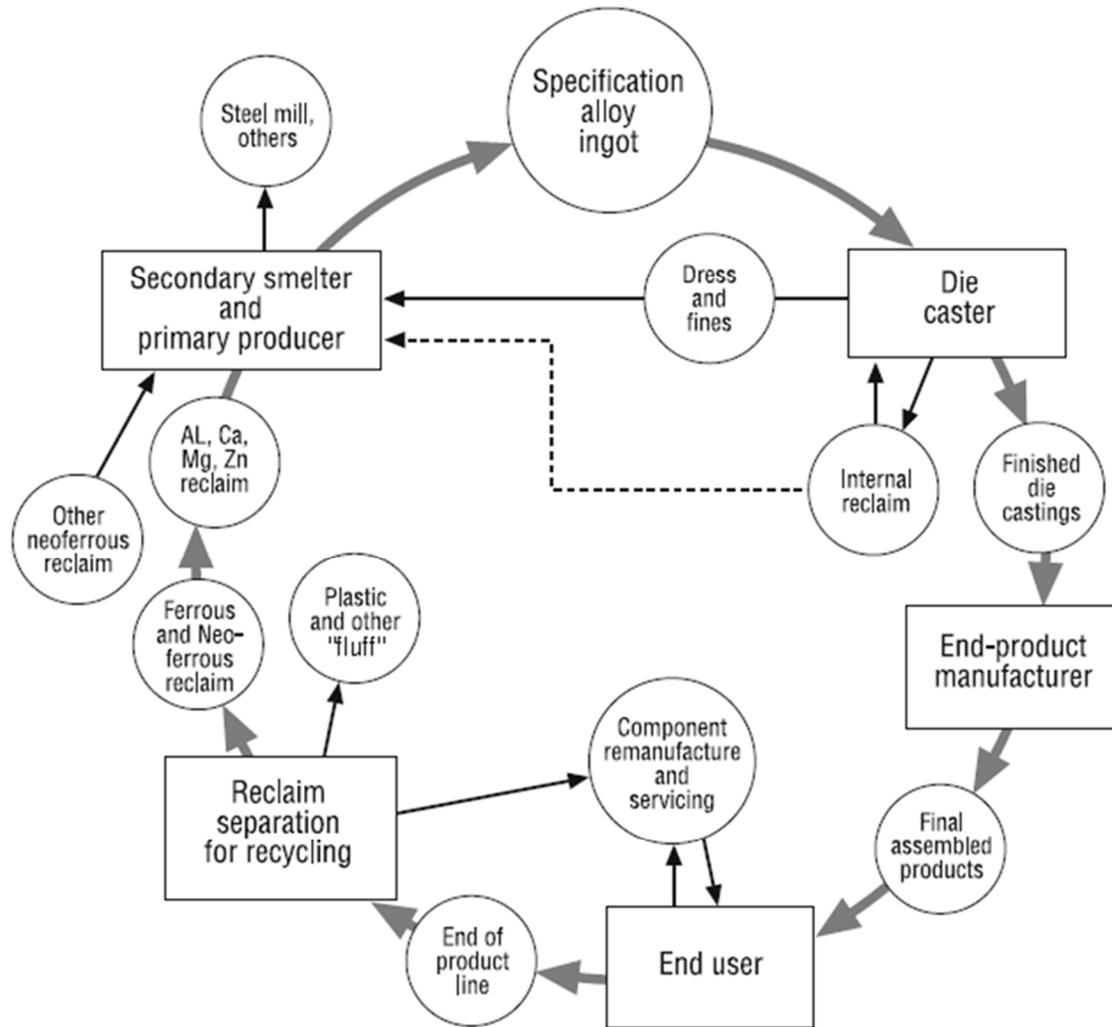
SAE J465 [13]

## **4.8. El Proceso de Reciclado de las Aleaciones de Magnesio[14]**

El uso respetuoso del medio ambiente y el uso rentable de las aleaciones de magnesio en las aplicaciones automotrices suponen un reciclaje que cierra el ciclo eficiente de los retornos de fundición a presión y de chatarra post-consumo. El reciclaje es un circuito cerrado como se ve en la Figura N° 9. Se define el reciclaje como el retorno de fundición a presión y la chatarra post-consumo de nuevo a la calidad necesaria para arrojar la misma pieza, tal como se produjo originalmente.

El éxito del reciclaje como un circuito cerrado es importante para la industria del magnesio porque, a diferencia del aluminio, no hay otro mercado o fuente importante para devoluciones / chatarra fuera de la comunidad de fundición. Esto

obliga a los procesos de reciclado a ser capaces de recuperar la composición química original y la limpieza de las aleaciones de magnesio. También es el objetivo de la industria para minimizar los costos del ciclo de vida, el consumo de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub> de los productos de magnesio. También es importante para la industria mejorar continuamente el reciclaje de magnesio, tanto a través del desarrollo de las especificaciones de la aleación como también, a través de tecnologías más eficientes para el reciclaje de los retornos.



El círculo de reciclado de la fundición. De Asociación de fundición de America del Norte

Figura N° 9

Basándose en las evaluaciones del ciclo de vida, se puede estimar el consumo total de energía para producir una aplicación "típica" de magnesio. La energía requerida para la fusión y el reciclado de magnesio es sólo alrededor del 5% de la energía para producir la misma cantidad de material primario. Como ejemplo, las partes producidas a partir de una mezcla de aleaciones primarias y recicladas,

asumiendo el reciclado en circuito cerrado, representan sólo un 50-70% de consumo de energía en comparación con las piezas producidas a partir de magnesio primario solamente. Las piezas producidas a partir de una mezcla de reciclado primario y de chatarra post-consumo, suponiendo que el 50% del metal neto se produce a partir de chatarra post-consumo, representan sólo un 30-40% de consumo de energía en comparación con piezas producidas a partir de metal primario solamente.

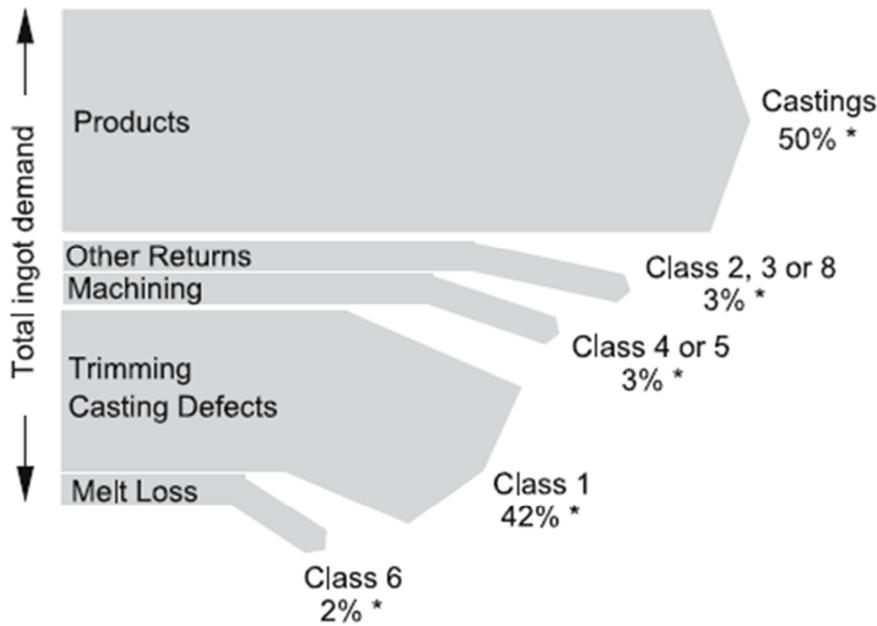
El crecimiento en el consumo de aleaciones de magnesio es impulsado por una creciente demanda de aplicaciones de automoción. La industria del automóvil representa el 90% de la demanda de fundición.

### **Sistema de clasificación de la viruta**

En este trabajo se utilizó viruta de mecanizado de piezas fundidas con aleación AZ91D.

En las operaciones típicas de fundición a presión de magnesio, sólo alrededor del 50% del lingote comprado aparece como piezas acabadas, el resto es viruta o chatarra. Esto se ilustra en la Figura N°10

Hay varios sistemas de clasificación para la chatarra de magnesio. Un sistema genérico de clasificación para el material reciclable típico fue derivado por HydroMagnesium y otro sistema bastante similar por Magnesium Elektron. Un tercer sistema fue desarrollado por Dow, mientras que también han sido sugeridas otras variantes. El sistema de clasificación aplicado por HydroMagnesium divide la chatarra en las siguientes clases:



\* Typical numbers in % of ingot demand

Las fracciones típicas de las diversas clases en relación con la demanda del lingotes

Figura N° 10

1. Clasificado, ordenados y limpios
2. Clasificado, limpias devuelto con insertos
3. Clasificado con aceite / pintado y devuelto
4. Virutas secas clasificadas
5. Las virutas clasificadas con aceite / mojadas
6. Escoria - sin sal
7. Lodo - con sal
8. Vueltas mixtas y fuera de clases

La chatarra limpia y clasificada generada en las plantas de fundición a presión, por ejemplo piezas con formas variadas es decir las piezas fundidas rechazadas se denominan chatarra de la clase 1. Como se ve en la Figura N° 10, la mayor parte de la chatarra producida pertenecerá normalmente a la clase 1. La chatarra de la clase 2 incluye chatarra limpia con insertos. Las tres primeras clases no requieren acciones especiales para el embalaje y el envío, excepto que el material debe mantenerse alejado de la humedad. Las clases 4 y siguientes

necesitan una atención especial ya que el material está sujeto a ciertas regulaciones de transporte (ARD / RID) (Atmospheric Reentry Demonstrator.). Las clases 4 y 5 (virutas, secas y con aceite / húmedas) deberán ser embaladas en bidones de acero ventilado y clasificadas de conformidad con la normativa de la ONU. Las clases 6 (escoria) y 7 (lodo) se clasifican de acuerdo con la normativa de la ONU. Además, la clase 6 está clasificada como mercancía peligrosa y debe ser tratada de acuerdo con los reglamentos de IMDG (International Maritime Dangerous Goods). Independientemente de las clases, todo el material debe cumplir con las especificaciones de la serie de aleación ASTM, AZ, AM, AS y AE. Otro material o material segregado pertenece a la clase 8.

### Clase 5

La mayoría de las virutas que surge del proceso de producción de las cajas de cambio en la empresa Volkswagen están contaminadas con emulsiones de aceite o de aceite / agua. Es técnicamente factible recuperar el metal de virutas mojadas / aceitosas (clase 5), pero en la actualidad, algunos procesos implican que los costos pueden ser más altos que el valor real del metal. Como los líquidos representan un volumen considerable del material de la clase 5, deben realizarse grandes esfuerzos en la etapa de limpieza. Incluso con tiempos de drenaje largos no es posible reducir el contenido de aceite por debajo del 10%.

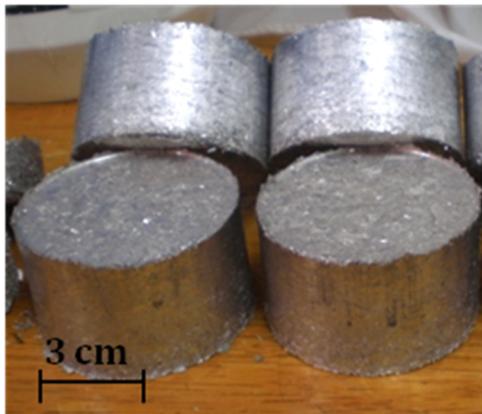


Figura N° 11: Briquetas de viruta de magnesio [15]

En el caso de la planta de Volkswagen, separan el líquido de la viruta mediante compresión, con lo que forman briquetas que luego se embalan para ser llevadas nuevamente al fundidor. No se tienen datos de la cantidad de material descartado.

En un trabajo previo (Tesis doctoral de Roberto Lucci) [16], se trabajó sobre la re fusión de estas virutas de aleación de magnesio AZ91D, provenientes del mecanizado de cajas de cambio en la empresa Volkswagen, obteniendo lingotes

de la aleación. Ese material es el que se usa en este trabajo como materia prima para un proceso de extrusión en caliente. Se espera que este proceso mejore las propiedades mecánicas del material.

## 5. Objetivos

El objetivo general del actual trabajo es:

**Obtener una mejora en las propiedades mecánicas de material fundido de aleación AZ91D, a través de un proceso de extrusión directa en caliente, para su posible utilización en la industria aeronáutica.**

Como objetivos particulares se plantean:

- Diseño de una matriz de extrusión
- Estudio del calentamiento de la matriz
- Realización de ensayos de extrusión en caliente
- Caracterización mecánica y microestructural del material obtenido



Talon, supersonic jet trainer, has 644 lbs. of magnesium (11% of air-frame weight). There is 361.25 lbs. of sheet; 276.52 lbs. castings; 2.47 lbs. extrusions; 2.44 lbs. bar; 1.42 lbs. tube.

The T-38 Talon, 11% magnesium airframe

Figura N° 12[17]

## 6. Fundamentos del Proceso de Extrusión

### 6.1. Concepto de Extrusión

El proceso de extrusión se basa en la deformación plástica de un material debido únicamente a fuerzas de compresión y de cizallamiento; no hay tensiones de tracción que se apliquen al metal extruido.

Básicamente, la extrusión es el proceso por el cual un bloque de metal, tal como un tocho cilíndrico, es forzado a fluir a partir un área inicial  $A_{inicial}$  a un área final  $A_{final}$  de la matriz a alta presión, reduciendo así la sección transversal (como se ve en la Figura N°13) y produciendo la forma requerida del producto. Dependiendo de la ductilidad del material, los metales se pueden extruir ya sea en caliente o en frío. [18]

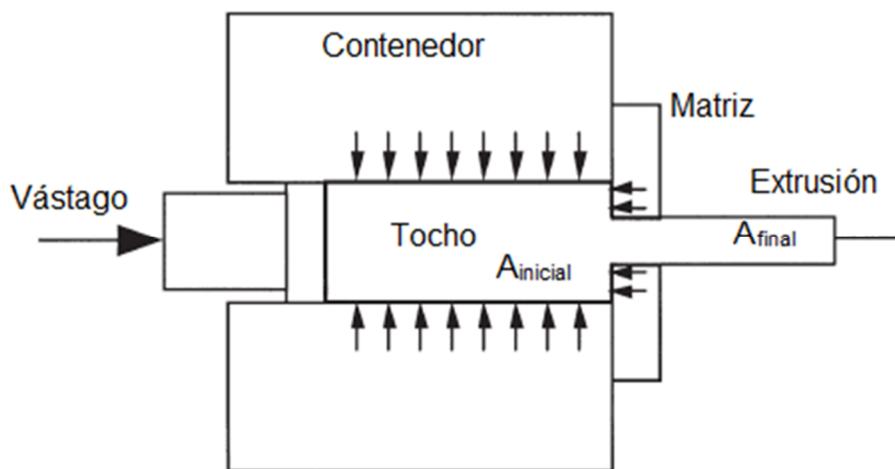


Figura N° 13[19]

La extrusión de metales se utiliza para piezas que por lo general tienen una sección transversal constante a lo largo de su longitud. Este tipo de proceso funciona en grandes producciones a bajo costo. Otra razón por la cual este proceso es eficiente es su flexibilidad. Es decir, si se necesita una parte con una sección transversal diferente, no es necesaria otra máquina para producirlo ya que sólo se requiere un cambio en el tipo de matriz. Sin embargo, se recomienda la extrusión para la producción de productos rectos y largos con dimensiones de sección transversal constante.

Se pueden obtener formas macizas y huecas y formas perfiladas tales como:

Perfiles Sólidos como barras, varillas, extruidos a partir de un tocho sólido por extrusión directa.

Tubos y perfiles huecos extruidos a partir de un tocho sólido a través de matriz tipo ojo de buey o de tipo puente (para ciertas aleaciones) por extrusión directa.

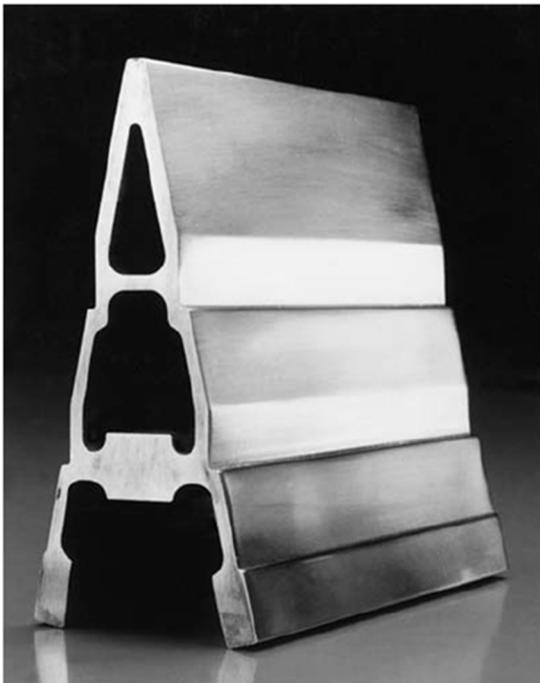
Tubos y perfiles huecos extruidos a partir de tochos huecos o sólidos (este último perforados en la prensa a través de mandril flotante) por extrusión directa

Tubos y perfiles huecos extruidos a partir de tochos huecos o sólidos (este último atravesado en la prensa a través de mandril estacionario) por extrusión directa

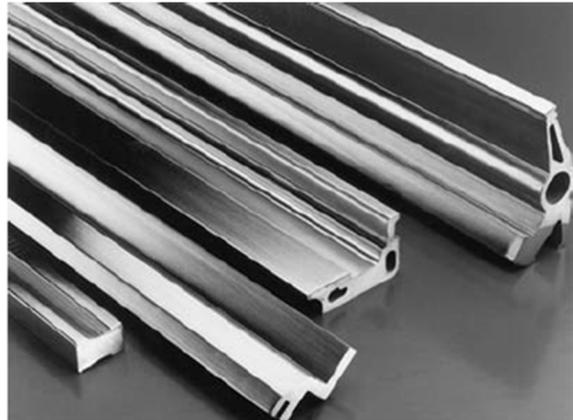
Secciones críticas de sólidos, barras, varillas extruidos a partir de un tocho sólido con recipiente sellado a través del matriz montado en el vástago por extrusión indirecta.

Tubos y perfiles huecos extruidos a partir de tochos huecos o sólidos (este último perforados en prensa) a través de mandril estacionario a través del troquel montado en el vástago por el proceso de extrusión indirecta.

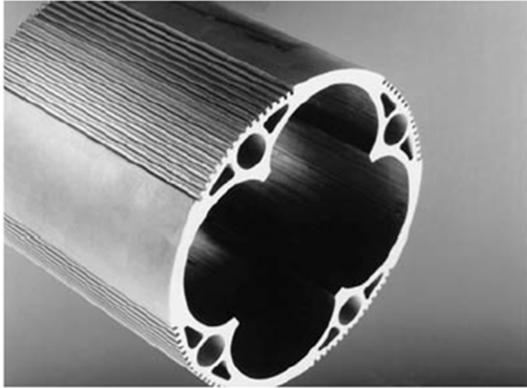
Algunos ejemplos de perfiles extruidos se muestran en la Figura N° 14.



Sección extruida en MgAl3Zn para máquinas textiles.  
Fuente: Fuchs-Metallwerke



De izquierda a derecha: Sección en MgAl2Zn para la producción de sacapuntas, dos secciones en MgAl3Zn de urdimbre máquina, y las secciones de brazo de prueba para cargadores de discos.  
Fuente: Fuchs-Metallwerke



Sección hueca en MgAl3Zn para el rotor externo de un turbocompresor para motores de automóviles  
Fuente: Fuchs-Metallwerke

Figura N° 14[20]

Las Máquinas de extrusión son generalmente prensas hidráulicas con capacidades que van desde 500 toneladas a alrededor de 7500 toneladas. Se utiliza comúnmente grasa de grafito para la lubricación entre el metal y herramientas.

## **6.2. Clasificación de los Procesos de Extrusión**

Existen cuatro tipos básicos de extrusión: Extrusión directa, indirecta, hidrostática y extrusión por impacto.

### **Extrusión directa**

El proceso de extrusión directa (también llamado de extrusión hacia delante) se ilustra en la Figura 15. Es el más importante y el método más común de extrusión. El tocho de metal se carga en un recipiente y es conducido a través del orificio de la matriz por el pistón. La dirección del movimiento del macho es la misma que la del metal extruido en la salida. Durante una carrera de extrusión, como el pistón y el bloque postizo presionan el tocho a través del contenedor, el flujo real de metal dentro de la matriz es cónico.

Esto deja una zona muerta del metal en el extremo del contenedor que rodea la sección cónica de metal que fluye, como se ilustra en la Figura N° 15.

Óxidos, inclusiones, y otras impurezas de la piel de la palanquilla se acumulan en esta zona. Se debe tener cuidado para asegurar que la extrusión se detenga antes de que esta aleación contaminada pase a través de la matriz y quede en la pieza de trabajo.

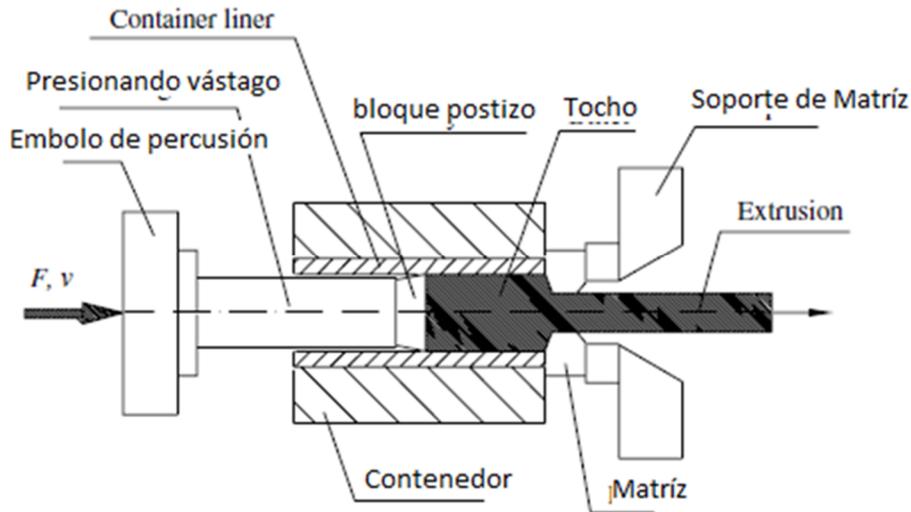
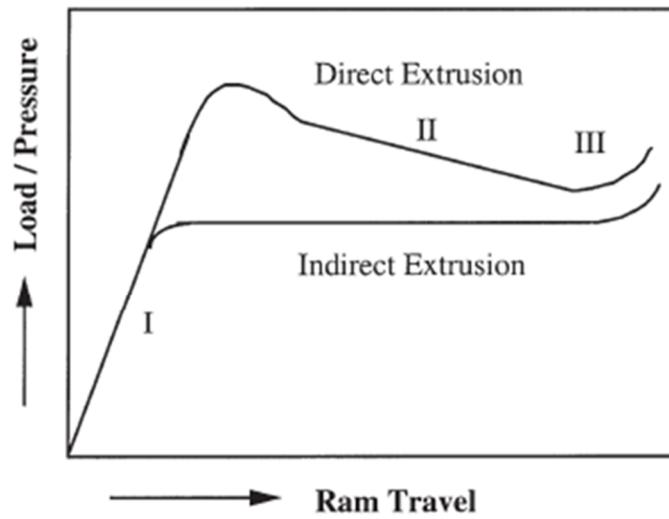


Figura N° 15

Este residuo que se forma en el extremo y que se adhiere a la parte posterior de la matriz, debe ser separado de la pieza de trabajo mediante corte, más allá de la salida de la matriz. El principal problema en este tipo de proceso son las fuerzas de fricción que se crean entre las paredes del recipiente y la pieza de trabajo; por lo tanto, se requieren más fuerza y energía para hacer funcionar el proceso de extrusión. En la extrusión en caliente, un problema adicional es la presencia de un óxido en la superficie de la palanquilla que puede causar defectos en las partes extruidas.

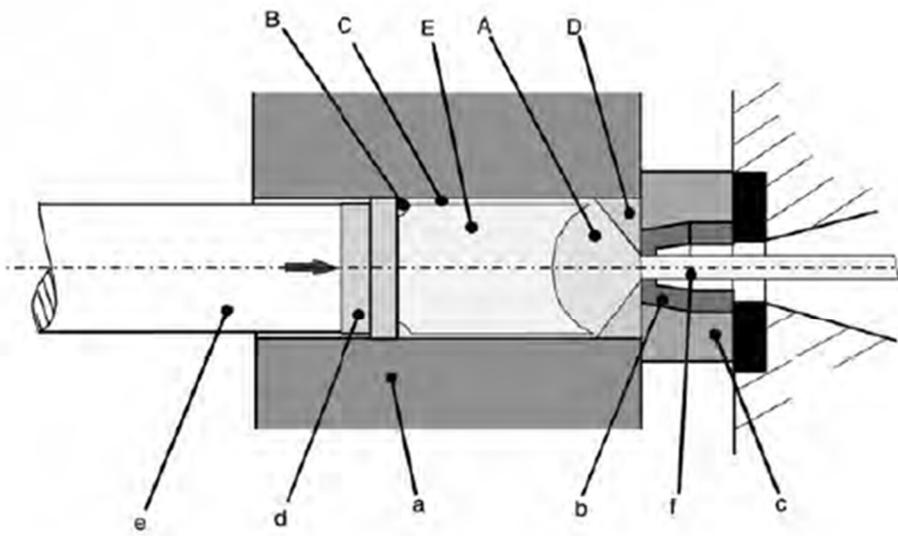
Para evitar estos problemas se utiliza a menudo un bloque postizo entre el pistón y el tocho de trabajo, como se ilustra en la Figura N°17. El diámetro del bloque postizo es ligeramente más pequeño que el del diámetro de palanquilla, por lo que la capa de óxido queda en el recipiente, dejando la parte final libre de óxido. La segunda función del bloque postizo es proteger la punta del punzón

Durante la extrusión directa, la carga o la curva de presión-desplazamiento tiene la forma mostrada en la Fig. 16.



Variación de la carga o presión con el desplazamiento del vástago tanto proceso de extrusión directa e indirecta

Figura N°16



Material flow zones in direct hot extrusion without lubrication and without a shell. A, primary deformation zone; B, secondary deformation zone; C, friction affected peripheral zone; D, dead metal zone; E, billet core; a, container; b, die; c, die holder; d, dummy block; e, stem; f, extrusion

Figura N° 17[20]

## Extrusión indirecta

El proceso de extrusión indirecta (también llamado extrusión invertida o hacia atrás) se ilustra en la Figura N°18.

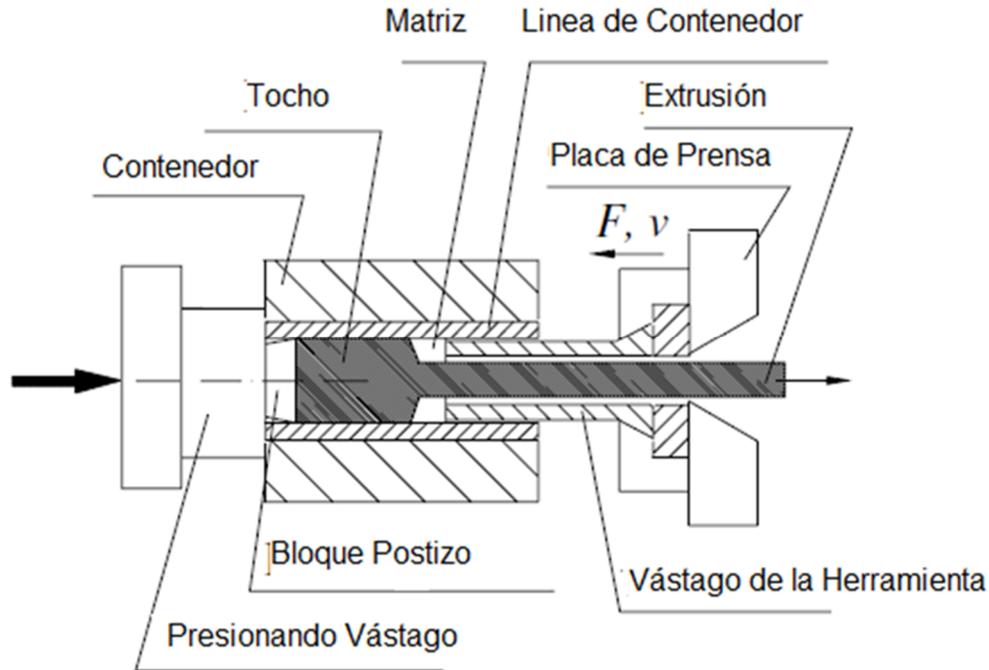


Figura N° 18

En este método de extrusión, un vástago hueco lleva la matriz y empuja hacia el tocho, para hacer que el metal fluya hacia fuera de la matriz en contra de la dirección de movimiento del vástago y la matriz. Esto elimina el movimiento relativo entre las paredes del recipiente, lo que conduce a reducir las fuerzas de fricción y los requisitos de energía de la necesaria para la extrusión directa.

## Extrusión hidrostática

La extrusión hidrostática se ilustra en la Figura N° 19. En ella, el tocho en el contenedor está rodeado por un medio líquido, también llamado medio hidrostático. El recipiente se sella en el lado del vástago y en el lado de la matriz, de modo que el vástago de penetración puede comprimir el medio hidrostático sin tocar realmente la palanquilla. Por lo tanto, la velocidad a la que el tocho se mueve cuando se presiona en la dirección de la matriz no es igual a la velocidad del pistón, pero es proporcional al volumen medio hidrostático desplazados.

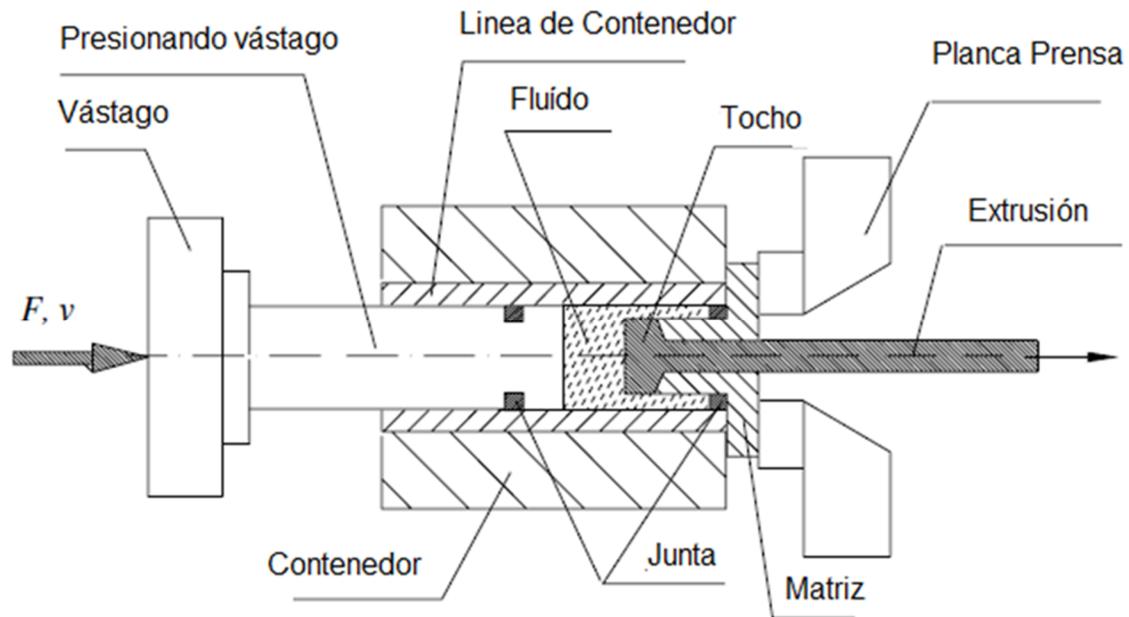
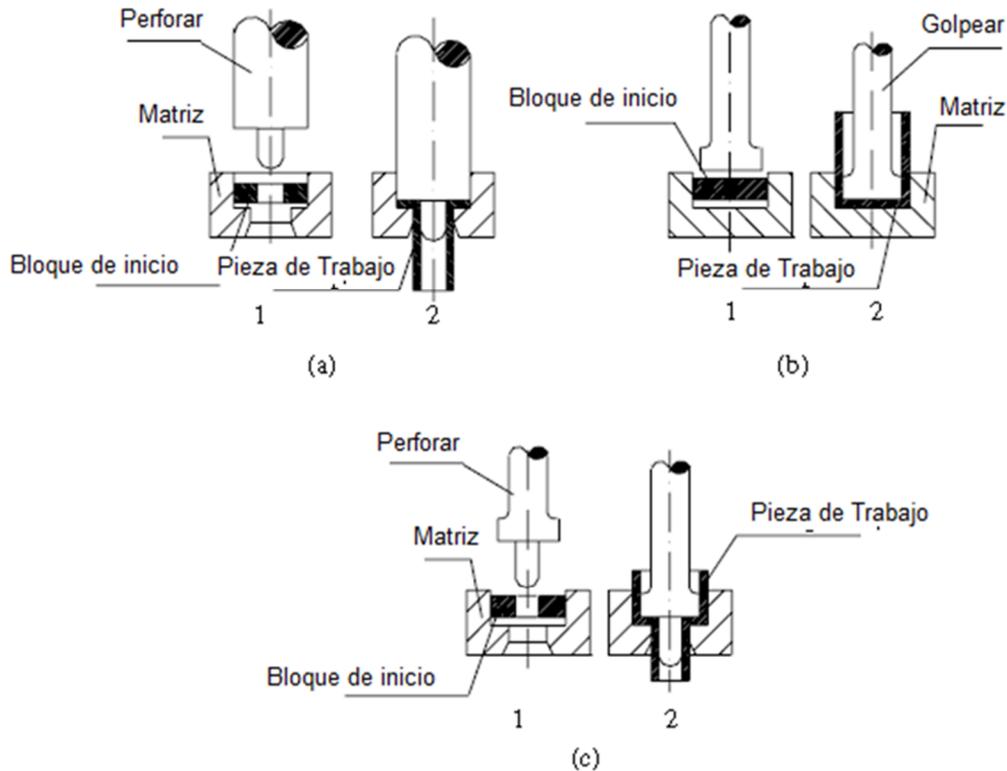


Figura N° 19

Debido al fluido a presión, la lubricación es muy eficaz, y el producto extruido tiene un buen acabado superficial y precisión dimensional.

### Extrusión por impacto

La extrusión por impacto es uno de los procesos de conformación en frío utilizados para las producciones de gran tamaño. Una pieza de volumen controlado y lubricada se coloca en una cavidad de la matriz y es golpeada por un pistón, obligando a que el metal fluya alrededor del punzón, a través de la abertura entre el punzón y la matriz, como se ilustra en la Figura N° 20. El espesor de la sección tubular extruido es una función de la holgura entre el punzón y la cavidad de la matriz. Las técnicas de extrusión por impacto más comunes son extrusiones hacia adelante y hacia atrás.



Extrusión por impacto: a) hacia adelante; b) hacia atrás; c) Posición de combinación (1-partida; 2- posición final).

Figura N° 20

### Extrusión Caliente Versus Fría

Los cuatro tipos de métodos de extrusión se pueden realizar ya sea en caliente o en frío. La elección del tipo de proceso a seguir depende de la ductilidad del material y de la tensión a la que el material será sometido durante la deformación. Materiales dúctiles pueden necesitar solamente de extrusión en frío y los materiales frágiles pueden requerir un proceso en caliente con el fin de cambiar su forma sin romperlo.

### Extrusión en caliente

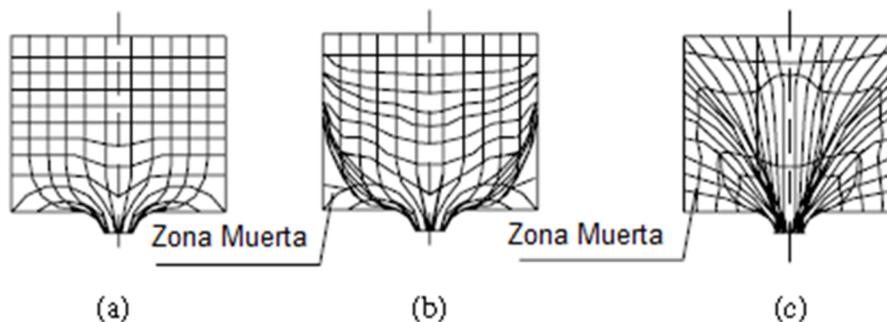
Dado que el metal está en un estado de esfuerzo de compresión en las tres direcciones durante la extrusión, la fuerza requerida es muy grande. Con el fin de reducir la fuerza requerida, la extrusión se lleva a cabo a temperaturas elevadas.

La mayoría de extrusiones en caliente se realizan mediante un proceso directo. Los parámetros principales para la extrusión en caliente incluyen la relación de extrusión, la temperatura de trabajo, la velocidad de deformación y la condición de fricción y lubricación.

Para la extrusión en caliente de acero, la relación de extrusión puede alcanzar aproximadamente 40: 1, mientras que para la extrusión de aluminio en caliente, esta relación puede ser tan alta como 400: 1.

### **6.3. Análisis del Proceso de Extrusión.**

La teoría de la deformación plástica de un material se puede aplicar al análisis de los procesos de extrusión. La teoría incluye conceptos de flujo de metal, la temperatura y la transferencia de calor, tensiones, fuerza de extrusión y la presión. En una simple extrusión de compresión homogénea, el metal fluye plásticamente cuando la tensión alcanza el valor de la tensión de fluencia. El flujo de metal durante la extrusión depende de muchos factores, como las propiedades del material del tocho a la temperatura de extrusión, la fricción tocho - contenedor y la interface del material a extruir y la matriz, la proporción de extrusión, el tipo de extrusión, el tipo de diseño y el diseño de la matriz, la velocidad de extrusión, etc. Típicamente, se observan tres tipos de patrón de flujo durante el proceso de extrusión como se ilustra en la Figura N° 21.



**Esquema del los tres diferentes tipos de flujo en la extrusión**

Figura N°21

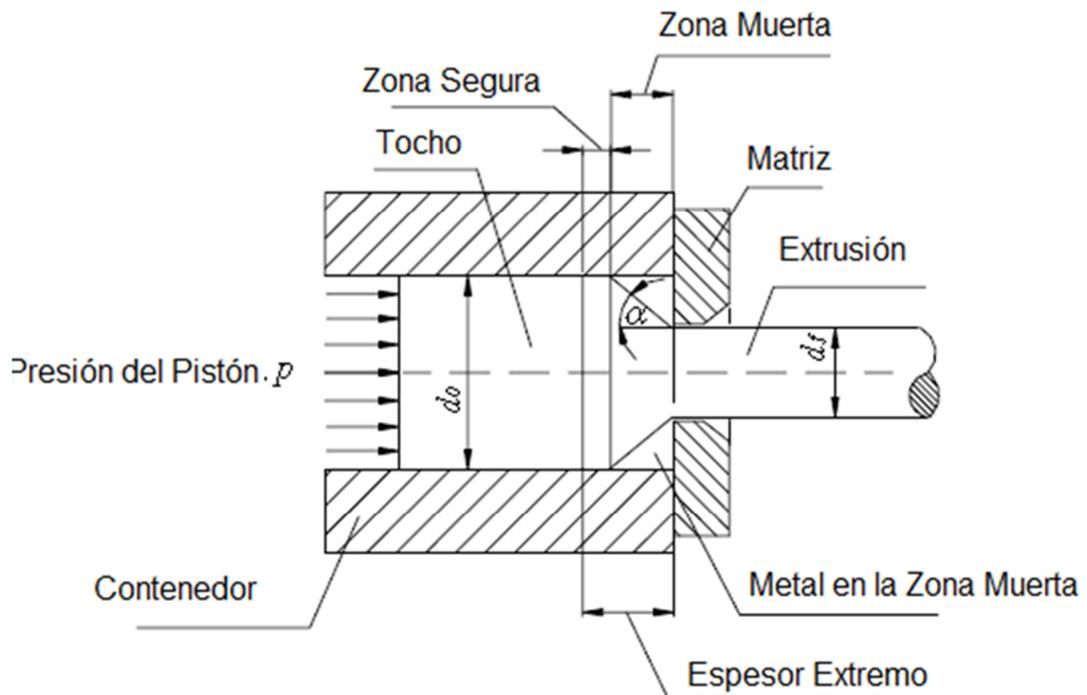
Tipo (a). Este patrón de flujo más homogéneo se produce por la ausencia de fricción en la interfaz de palanquilla-contenedor-matriz. Para obtener este tipo de patrón de flujo, es necesario que haya lubricación total entre las interfaces del material con el contenedor-matriz.

Tipo (b). Este patrón se obtiene en materiales homogéneos cuando existe fricción a lo largo de todas las interfaces; una zona de metal separado se forma entre la cara de la matriz y la pared del contenedor, conocido como zona muerta del metal. En este caso, el material cerca de la superficie se somete a deformación por cizallamiento y fluye de forma diagonal en la abertura de la matriz para formar el perfil de extrusión. La extrusión tiene propiedades no uniformes.

Tipo (c). Este tipo de patrón es el resultado de la distribución de temperatura no uniforme en el tocho o propiedades de los materiales no homogéneos. La zona de alto esfuerzo cortante en el material se extiende más hacia atrás y también forma una zona muerta más extendida como resultado de la alta fricción del contenedor con el metal. En la extrusión en caliente el material cerca de las paredes del recipiente se enfría rápidamente; por lo tanto, la fuerza aumenta y los materiales en la zona central de la palanquilla fluyen fácilmente. Este patrón de flujo conduce a un defecto conocido como defecto de la tubería.

### **Espesor Extremo**

El espesor extremo del tocho es la distancia formada por la zona muerta y una zona de seguridad. El espesor extremo como se ilustra en la Figura N° 22 varía considerablemente, dependiendo principalmente del tipo de material que se extruye y la condición del tocho. Por ejemplo, un espesor extremo estándar para la extrusión directa de las aleaciones de aluminio es de alrededor de 10 a 15% de la longitud del tocho.

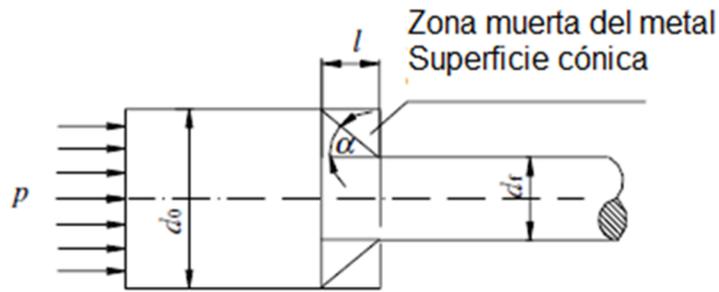


Relación entre la Zona Muerta y el Espesor Extremo

Figura N°22

### Deformación real y zona de deformación.

Algunos de los parámetros del proceso de extrusión como se muestran en la Figura N° 23, suponiendo que el tocho y la abertura de la matriz son redondos en la sección transversal.



Geometría del tocho en la extrusión directa

Figura N°23

**Deformación real:** La deformación real en la extrusión es la relación entre la sección transversal del tocho y la sección final de la pieza extruida, cuando la deformación se produce idealmente sin fricción y sin trabajo redundante como se ve en la Ecuación N° 1:

$$\varepsilon = \ln \frac{A_0}{A_f}$$

Ecuación N° 1

donde

$A_0$  = área de sección de corte de inicio de tocho, mm<sup>2</sup>

$A_f$  = área final de la sección extruida, mm<sup>2</sup>

**Zona de deformación.** La zona de deformación o zona muerta es una porción cónica; Por lo tanto, de la geometría como se muestran en la Figura N° 23, la longitud de la zona de deformación está dada por ecuación N° 2,

$$l = \frac{(d_o - d_f)}{2 * \tan \alpha}$$

Ecuación N° 2

donde

$l$  = longitud de la zona de deformación, mm.

$d_o$  = diámetro inicial del contenedor, mm.

$d_f$  = diámetro final equivalente del redoado extruido, mm.

$\alpha$  = semi ángulo de la zona muerta del metal.

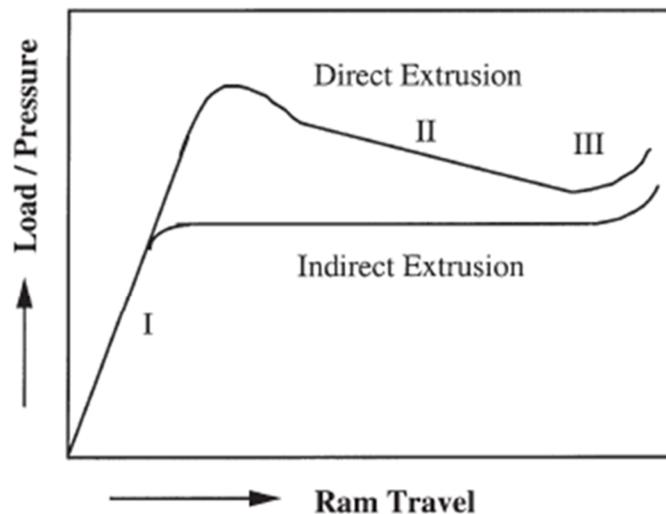
#### 6.4. Extrusión Directa Convencional en Caliente

El método más importante y común usado en la extrusión es el proceso directo. La Figura 3 muestra el principio de la extrusión directa en el que el tocho se coloca en el recipiente y es empujado a través de la matriz por la presión del vástago. En la extrusión directa, la dirección del flujo de metal estará en la misma dirección del movimiento del vástago. Durante este proceso, el tocho se desliza con relación a las paredes del contenedor. La fuerza de fricción resultante aumenta considerablemente la presión dinámica. Durante la extrusión directa, la carga o la curva de presión-desplazamiento tiene la forma como se muestran en la Figura N° 24. Tradicionalmente, el proceso ha sido descrito como que tiene tres regiones distintas:

El tocho es perturbado, y la presión se eleva rápidamente a su valor máximo.

La presión disminuye, lo que se denomina "estado estacionario".

La presión alcanza su valor mínimo seguido de un aumento agudo debido a que el vástago llega al final de la carrera y comprime la matriz.



Variación de la carga o presión con el desplazamiento del vástago tanto en el proceso de extrusión directa como indirecta

Figura N°24

#### **6.4. Las variables del proceso de Extrusión Directa**

##### **La Relación de Extrición (RE)**

Es la relación del área de sección transversal inicial del contenedor y el área de la sección transversal final de la matriz; después de la extrusión, dada por la Ecuación N° 3.

$$RE = \frac{\text{Area}_{\text{Inicial}}}{\text{Area}_{\text{Final}}}$$

Ecuación N° 3

##### **La Temperatura de Trabajo**

El proceso se lleva a cabo a una temperatura T por encima de la temperatura de recristianización del material de trabajo, dada por la Ecuación N° 4. Para el caso de la aleación de magnesio AZ91 la temperatura de fusión es aproximadamente de 600 °C y entonces la temperatura de recristalización sería de 360 °C

$$T = (0,6) * T_m \text{ Hasta } (0,7) * T_m$$

Ecuación N° 4

Donde

T = Temperatura de trabajo en, °C

T<sub>m</sub> = Temperatura de fundición del metal, °C

Para un material dado la temperatura de extrusión es generalmente más alta que la utilizada en la forja o laminación, debido a las altas tensiones de compresión y para minimizar el agrietamiento. Sin embargo, el agrietamiento en extrusiones de forma no simétrica puede producirse debido a un flujo desigual en diferentes secciones.

La lubricación juega un papel crítico en el proceso de extrusión en caliente. Cualquier lubricante utilizado para la extrusión en caliente debe tener baja resistencia al corte y también debe ser lo suficientemente estable a altas temperaturas.

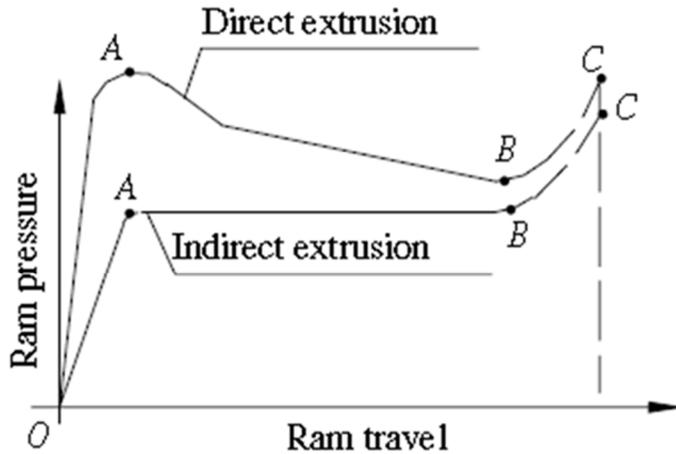
Hay varios pasos en el proceso de extrusión en caliente:

- Calentamiento de un tocho en el horno a la temperatura deseada.
- La transferencia de un tocho en el cargador y la aplicación de una capa fina de lubricante a la superficie del material a extruir y el vástago. El lubricante mantiene las dos partes sin que se peguen entre sí.
- Compresión del tocho en el interior del recipiente.
- La aplicación de presión al bloque postizo con el pistón. Bajo la presión, el tocho es aplastado contra la matriz, hasta que tiene pleno contacto con las paredes del contenedor.
- Como resultado de la presión, el metal comienza a pasar a través de la abertura de la matriz.
- El corte de la extrusión se da cuando la pieza alcanza la longitud deseada.
- Transferencia de la pieza a la mesa de refrigeración y enfriamiento a temperatura ambiente.
- El estiramiento de la pieza de trabajo.
- Corte de la pieza de trabajo a una longitud determinada.

### **Presión de extrusión.**

En el proceso de extrusión directa la presión alcanza un máximo en el punto de arranque en la matriz. Curvas típicas de presión dinámica en función del movimiento del vástago para la extrusión directa e indirecta se muestran en la Figura N°25.

Las curvas se pueden dividir en tres partes características:



Variación de la presión con la carrera del vástago

Figura N°25

Parte O-A. El tocho es perturbado y la presión se eleva rápidamente hasta alcanzar valores máximos en el punto A. Los valores más altos son el resultado de la fricción con la pared del contenedor.

Parte A-B. La presión disminuye para la extrusión directa y alcanza valores mínimos en el punto B. Para la extrusión indirecta, esta parte de la curva muestra valores constantes de presión. Para ambos tipos, esta región corresponde al proceso real de extrusión.

Parte B-C. La presión alcanza valores mínimos en el punto B, seguido por un aumento pronunciado por el efecto de la compactación.

La presión total de extrusión requerida para la extrusión directa puede ser expresada por la Ecuación N° 5.

$$p = \sigma_{f\mu} \left( \epsilon_e + \frac{2 * l}{d_0} \right)$$

Ecuación N° 5

donde

$\sigma_{f\mu}$  = Tensión de fluencia promedio durante la extrusión MPa.

$l$  = longitud de la zona de deformación, mm.

$d_0$  = diámetro internos del contenedor, mm.

$\epsilon_e$  = deformación de la extrusión ( $\epsilon_e = a + b \ln RE$ )

$a$  y  $b$  son constantes empíricas. Para un ángulo normal de la matriz  $a = 0.8$  y  $b = 1.2$  hasta  $1.5$ .

## **Fuerza de Extrusión**

La fuerza necesaria para la extrusión directa e indirecta depende de muchas variables de proceso, tales como la tensión de fluencia del material del tocho, la relación de extrusión, la condición de fricción en la interfaz de la pared del contenedor - matriz – material que se extruye, la temperatura del tocho, y otras variables. La fuerza de extrusión está dada por la Ecuación N° 6

$$F_e = p \cdot A_0$$

Ecuación N° 6

donde

$F_e$  = Fuerza de extrusión, N.

$p$  = Presión total de extrusión MPa.

$A_0$  = área de sección de corte de inicio de tocho, mm<sup>2</sup>

Para una extrusión, la fuerza de presión  $F_p$ , necesita ser mayor que la fuerza de extrusión.

$$F_p > F_e$$

## **Velocidad de Extrusión. [21]**

La respuesta de un metal en los procesos de extrusión puede estar influida por la velocidad de deformación. El aumento de la velocidad del pistón produce un aumento en la presión de extrusión y de la temperatura. Este aumento se debe al hecho de que la velocidad de deformación es directamente proporcional a la velocidad del pistón y la magnitud del calor generado también es proporcional a la velocidad de deformación. Cuanto más lenta sea la velocidad del pistón, más tiempo estará disponible para que el calor generado fluya.

Se puede calcular la velocidad de extrusión en términos de velocidad de émbolo mediante el uso de relaciones matemáticas simples. La velocidad de extrusión se puede calcular para cualquier matriz de extrusión mediante el uso de una relación que implica una constancia de volumen, lo que significa que el

volumen del metal en el recipiente llega a ser igual al volumen de extrusión que sale de la boquilla, porque no hay pérdida de metal durante la extrusión dada por la Ecuación N° 7

De la Fig. 26:

$$V_R * A_C = V_E * A_E$$

Ecuación N°7

Donde

$V_R$  es la velocidad del vástago mm/min

$A_C$  es el área del contenedor mm<sup>2</sup>

$V_E$  es la velocidad de extrusión mm/min

$A_E$  es el área de extrusión mm<sup>2</sup>

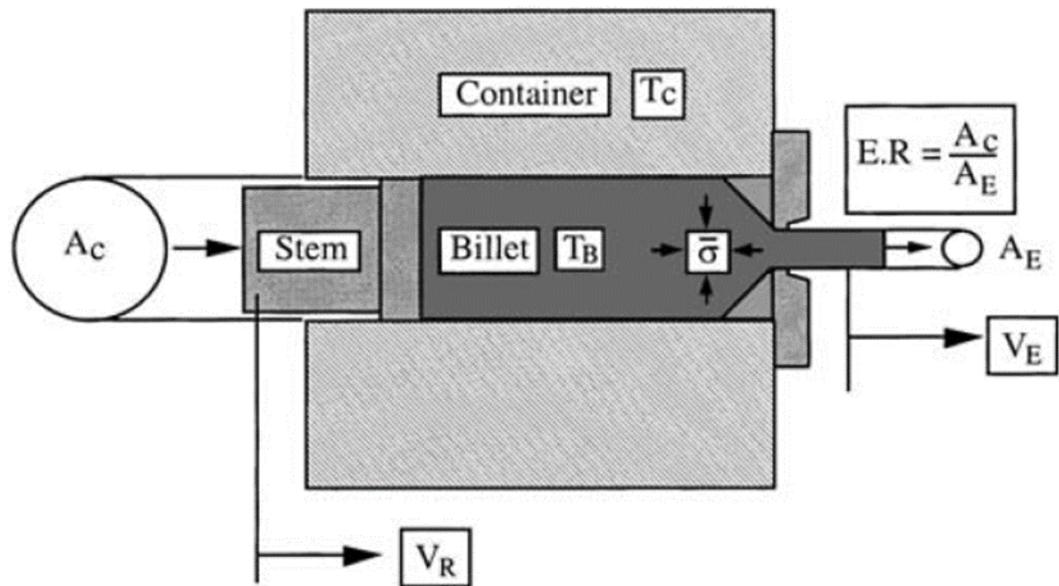


Figura N°26

De donde se deduce que la velocidad de extrusión podría escribirse como dada por la Ecuación N° 8

$$V_E = V_R * RE$$

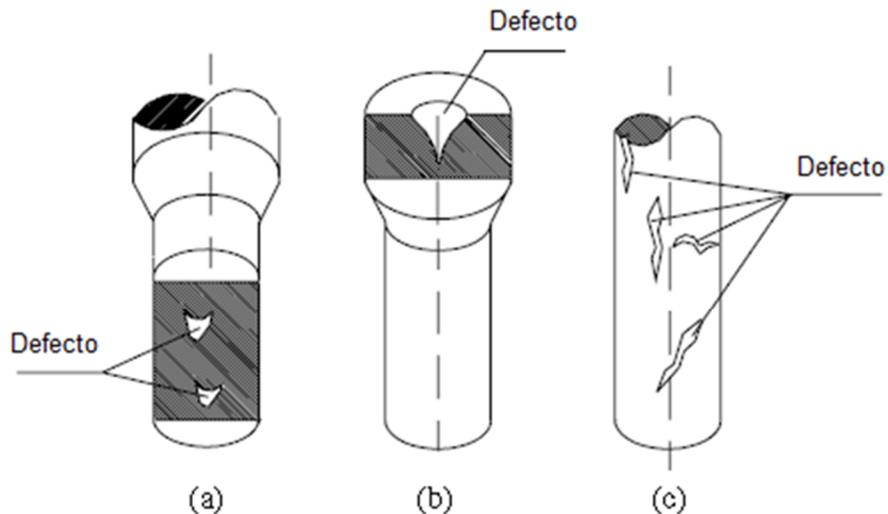
Ecuación N°8

donde RE está definido por la dada por la Ecuación N° 3.

## 6.6. Los Defectos en el Proceso de Extrusión

Dependiendo de los parámetros de proceso y del material, las piezas extruidas pueden presentar diferentes defectos que deben ser evitados. Estos defectos pueden afectar significativamente la resistencia de la pieza de trabajo y la calidad general. Algunos defectos son visibles a simple vista, mientras que otros pueden ser detectados solamente por técnicas de ensayo adecuadas. Todos los defectos en los procesos de extrusión se pueden clasificar, sin embargo, en las siguientes categorías, como se ilustra en la Figura N°27.

*Agrietamiento interno:* Esto ocurre por el mayor movimiento de material en las regiones interiores donde el material fluye a lo largo del centro de la pieza de trabajo. Si las tensiones son suficientemente grandes, se produce el agrietamiento interno. Las variables que promueven rajaduras internas son un alto ángulo del dado, una baja velocidad de extrusión, impurezas en el metal de la pieza de trabajo y la fricción. Estos defectos pueden ser detectados sólo en los exámenes regulares de ensayos no destructivos.



Algunos defectos comunes en la extrusión: a) agrietamiento interno; b) las tuberías; c) agrietamiento superficie.

Figura N°27

*Tubería.* Otro defecto que se produce en la extrusión es el de la tubería o de extrusión de defectos, que se producen cuando la extrusión se lleva a cabo hasta formar un tubo en el extremo posterior de la palanquilla, como se ilustra en la Figura N°23b. La modificación de la configuración de flujo a una más homogénea, tal como mediante el control de la fricción y la reducción al mínimo de los gradientes de temperatura, puede reducir la aparición de este defecto. Otro

método es usar un disco de empuje, cuyo diámetro es ligeramente menor que la de la palanquilla.

*Defectos de superficie.* Los defectos de superficie pueden ser producidos por la tensión de tracción longitudinal generada cuando la extrusión pasa a través de la matriz. Este defecto ocurre generalmente con las aleaciones más duras, más frágiles, como resultado de los intentos de extruir la pieza de trabajo demasiado rápido, y la causa exacta no se entiende. Los defectos superficiales ocurren cuando la temperatura y la velocidad de extrusión son demasiado altas, lo que conduce a altas velocidades de deformación.

### **6.7. Dimensionamientos de la matriz y la prensa que intervienen en el proceso de extrusión directa,**

- **Matriz de extrusión**

Hay una serie de aspectos importantes a considerar cuando se diseña una matriz de extrusión, para producir consistentemente una superficie del producto extruido con las características mecánicas y el aspecto deseados. Dos de los aspectos son: (1) el ángulo de la matriz  $\alpha$ , y (2) la forma del orificio.

Los resultados experimentales muestran que para un material de trabajo dado y una velocidad de extrusión, se puede encontrar un ángulo que minimiza la presión de extrusión requerida. A medida que aumenta el ángulo de la matriz, los cambios en la dirección del flujo del material que suceden antes de salir de la hilera se vuelven más graves, y esto aumenta la cantidad de trabajo requerido. Sin embargo, las áreas de contacto entre el material y la matriz disminuyen y, por tanto, las fuerzas de fricción disminuye de manera que, como mínimo, debe haber algún valor del ángulo óptimo. La Figura N°28 muestra la variación de la presión de extrusión con ángulos de la matriz para el aluminio y el acero al carbono.

La ecuación 6 para la presión total de extrusión se aplica a un orificio de la boquilla de la matriz de forma circular. Una sección transversal compleja requiere una alta presión y una mayor fuerza que una forma circular. El efecto de la forma de orificio de la boquilla puede ser evaluado por el factor de forma de la matriz. La Ecuación N° 8 es una ecuación empírica para determinar el factor de forma de la matriz:

$$K_x = 0,98 + 0,02 * \left(\frac{C_x}{C_c}\right)$$

Ecuación N° 9

donde

$K_x$  = Factor de forma de la matriz de extrusión.

$C_x$  = Perímetro de la sección de cruce extruido, mm.

$C_c$  = Perímetro del círculo de la misma zona del perfil extruido, mm.

La presión total de extrusión para formas distintas de las circulares en extrusión directas está dada por la ecuación N° 10.

$$p = K_x * \sigma_{f\mu} \left( \epsilon_e + \frac{2 * l}{d_0} \right)$$

Ecuación N° 9

donde

$p$  = Presión total de extrusión MPa.

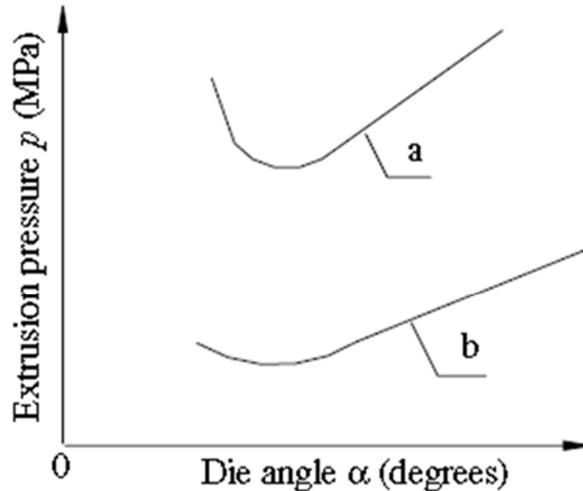
$K_x$  = Factor de forma de la matriz de extrusión.

$\sigma_{f\mu}$  = Tensión de fluencia promedio durante la extrusión MPa.

$l$  = longitud de la zona de deformación, mm.

$d_0$  = diámetro internos del contenedor, mm.

$\epsilon_e$  = deformación de la extrusión



Variación de la presión de extrusión con un ángulo dado: a) acero al carbono; b) 99,5% de aluminio.

Figura N°28

Las matrices se agrupan en términos generales en dos grupos: como matrices sólidas, que producen formas sólidas, y matrices huecas que producen formas huecas o semi huecas. Se puede incorporar en un solo dado una combinación de formas sólidas, semi hueca y hueca.

Una operación típica de extrusión hará uso de un conjunto de matriz, incluyendo la matriz en sí, que, junto con un soporte, está encerrado dentro de un anillo de matriz, y se coloca delante de un cabezal. El soporte de herramientas mantiene todas las partes juntas como una unidad.

El material para un troquel es generalmente de acero para herramientas (normalmente H 13).

- **Prensas**

El equipo básico para extrusiones es la prensa. La mayoría de las extrusiones se hacen con prensas hidráulicas. Las prensas de extrusión hidráulicas se clasifican en: prensas horizontales y prensas verticales, dependiendo de la dirección de la marcha del vástago.

*Prensas de extrusión verticales.* Las prensas de extrusión verticales se construyen generalmente con capacidades de 300 a 2000 toneladas. Tienen la ventaja de facilitar la alineación entre el pistón de la prensa y de las herramientas, una mayor tasa de producción y la necesidad de menos espacio que las prensas

horizontales. Sin embargo, necesitan un considerable espacio vertical para hacer extrusiones de longitud apreciable. Las prensas verticales producirán un enfriamiento uniforme de la palanquilla en el contenedor y por lo tanto, resultará en una deformación simétrica uniforme. En operaciones comerciales, las prensas verticales se utilizan en la producción de tubos de pared fina, donde se requieren espesor de pared uniforme y concentricidad.

*Prensas de extrusión horizontales.* Las prensas de extrusión horizontales se utilizan para la mayoría de extrusiones comerciales de barras y formas. Prensas con una capacidad de 1500 a 5000 toneladas están en funcionamiento regular, mientras que se han construido unas pocas prensas de capacidad hasta 14.000 toneladas. En una prensa horizontal, la parte inferior de la palanquilla, que se encuentra en contacto con el recipiente, se enfriará más rápidamente que la parte superior, a menos que el recipiente de extrusión se caliente internamente. Por lo tanto, la deformación no será uniforme.

## 7. Materiales y Metodología Experimental.

### 7.1. Materiales

La muestra de la aleación de magnesio AZ91D con la que se trabajó, proviene de la re fusión de virutas recicladas de la industria automotriz. Su composición química es:

**Mg:** 90%; **Al** 8,08%; **Zn:** 0,527%; **Mn:** 0,598%; **Cu:** 0,448%; **Si:** 0,2853%; **Fe:** 0,093%; **Ni:** 0,072%; **Ca:** 0,0026%; **Sn:** 0,0034%; **Zr:** 0,0075%; **Be:** <0,0001%.

Las propiedades mecánicas de esta aleación reciclada por fusión de la viruta de maquinado de AZ91D presenta las siguientes propiedades mecánicas:

Propiedades mecánicas de las aleaciones recicladas [22]

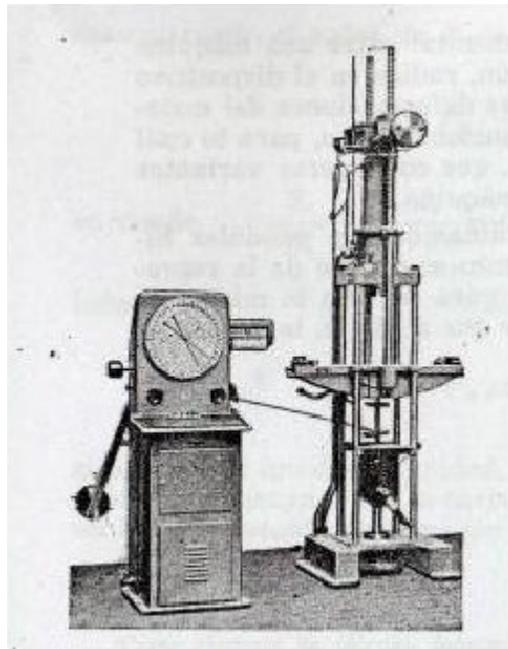
Aleación	Propiedades mecánicas				
	m <sub>áx.</sub> [MPa]	$\sigma_{0,2}$ [MPa]	A [%]	HB	Impacto [J]
Recicladas sin des escoriado	119	51	1,06	41	1,4
Recicladas con des escoriado	122	54	1,07	42	2,4

### 7.2. Aparatología Utilizada

Las muestras fueron maquinadas en forma de cilindros de diámetro 10 mm. Fueron calentadas en horno de mufla marca ORL, dentro de un dispositivo, como se muestra en la Figura N°29. Las fuerzas de extrusión se consiguieron con una Máquina Universal de Ensayo marca AMSLER con capacidad de 30 T, trabajando en compresión, como se ve en la Figura N°30.



Figura N°29



Máquina Amsler

Figura N°30

Para la caracterización del material se utilizaron los siguientes equipos:

Microscopio óptico marca, Niko, como se ve en la Figura N° 31.

Capacidad Máxima de Aumento 1.000 aumentos

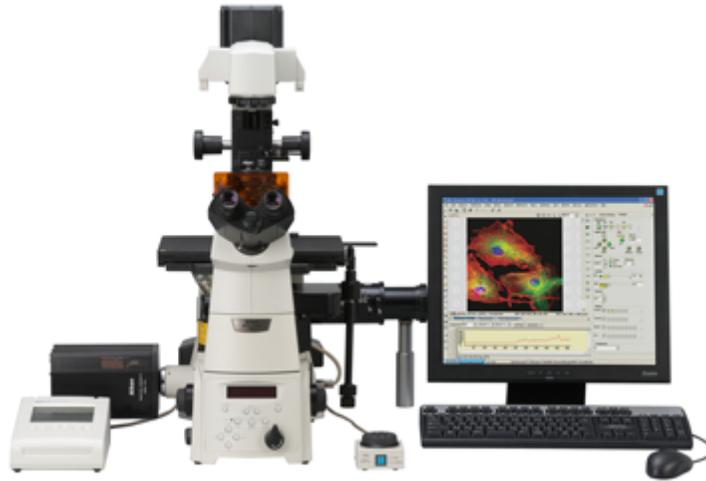


Figura N° 31

Microdurómetro

Capacidad de Carga Máxima de 2000 Gr, Tiempo de Aplicación 15 segundos como vemos en la Figura N° 32.



Figura N° 32.

Máquina Universal de Ensayo marca INSTRON 4486. Capacidad de Carga Máxima es de 30 Tn. Como se ve en la Figura N° 33.



Figura N° 33.

### 7.3. Dispositivo de Extrusión

Para la realización del proceso de extrusión de la aleación de magnesio AZ91D, se pensó en un dispositivo con el principio de la mecánica de la extrusión directa, como se ve en la Figura N° 34.

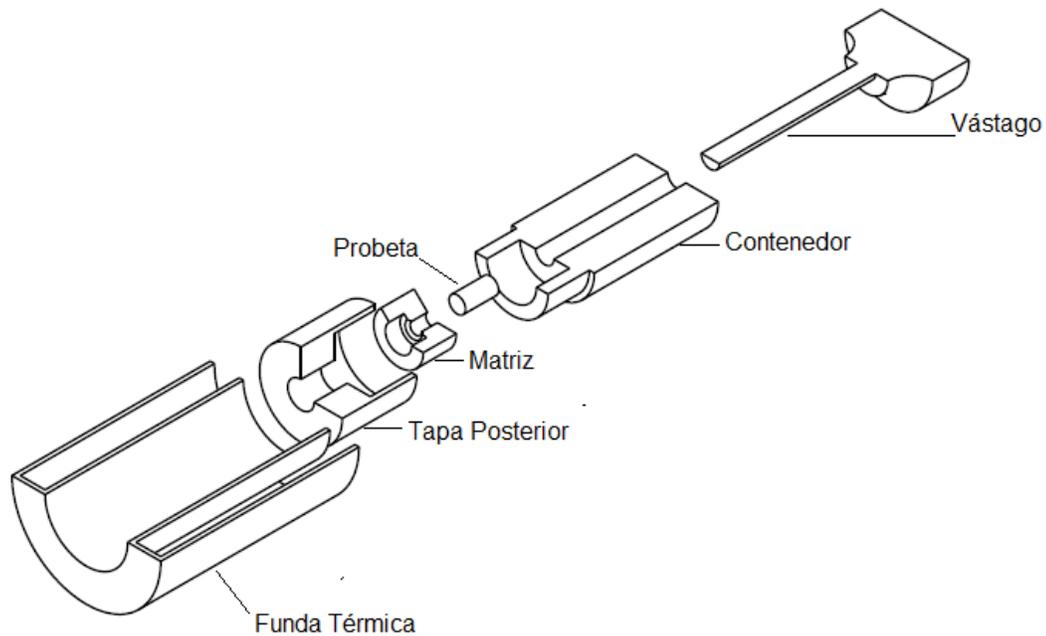


Figura N° 34

Por lo visto en el análisis de proceso de extrusión, el sistema está compuesto por los siguientes componentes, que se detallan a continuación:

La parte del contenedor es la parte del sistema que contiene al material que va a ser extruido. Las dimensiones del mismo se ven en Esquema N° 1 en el Anexo 1. Esta pieza fue obtenida de un redondo mediante un proceso de mecanizado a la medida que se ve en esquema N° 1. Esta parte del dispositivo fue pensada para contener una probeta de diámetro  $\varnothing=10\text{mm}$  y longitud de  $L=22.5\text{mm}$  como se ven Figura N°35 y 36.



Figura N°35.



Figura N°36

Esta probeta va a sufrir durante el ensayo, un proceso de compresión a alta temperatura en el cual comienza a deformarse plásticamente ocupando todo el diámetro del dispositivo contenedor. También aparecerán esfuerzos de corte.

Como se observa en el esquema, se eligió un alojamiento para la matriz en la parte posterior de sistema, para asegurarse la deformación plástica del material. Otro motivo por el que se diseñó así fue, para poder extraer la misma en caso de que el material se atasque. También asegura poder realizar otras experiencias con otras matrices de diferentes diámetros de extrusión y formas.

La matriz es otra pieza del sistema de extrusión, en la que se deforma el material cumpliendo con la relación de estricción.

Con el diámetro interior del contenedor  $\varnothing = 11\text{mm}$  y el diámetro interior de la matriz  $\varnothing = 7\text{mm}$ , calculamos:

$$\text{Área}_{\text{inicial}} = \frac{\pi \cdot \varnothing^2}{4} = \frac{\pi \cdot 11^2 (\text{mm}^2)}{4} = 95,033 (\text{mm}^2)$$

$$\text{Área}_{\text{final}} = \frac{\pi \cdot \varnothing^2}{4} = \frac{\pi \cdot 7^2 (\text{mm}^2)}{4} = 38,484 (\text{mm}^2)$$

$$\text{RE} = \frac{\text{Área}_{\text{inicial}}}{\text{Área}_{\text{final}}} = \frac{95,033 (\text{mm}^2)}{38,484 (\text{mm}^2)} = 2.47$$

La matriz como se ve en el Esquema N°2 en el Anexo 1, de diámetro  $\varnothing = 30\text{mm}$  y longitud  $L = 20\text{mm}$ ; tiene dos perforaciones una de diámetro  $\varnothing = 7\text{mm}$  y longitud  $L = 9,5\text{mm}$ , donde el material está obligado a ser deformado plásticamente para pasar por una sección de menor área. La segunda perforación es de diámetro  $\varnothing = 16\text{mm}$  y longitud  $L = 9\text{mm}$ , y cumple la función de descarga y recuperación elásticas del material.

La tapa posterior es un cilindro, como se ve en el Esquema N°3 en el Anexo 1, que tiene la función de contener a la matriz y dar apoyo durante el esfuerzo de compresión. También proporciona centralidad de los orificios entre el del contenedor y el de la matriz. También cumple la función de descarga del material extruido.

El vástago es una pieza cilíndrica como se ve en el Esquema N°4 en el Anexo 1. Este es el elemento responsable de transmitir la fuerza de compresión para generar la deformación plástica del material y es el responsable de hacer pasar el material por el orificio de menor sección.

Estos elementos nombrados anteriormente que componen el dispositivo extrusor fueron realizados en Acero AISI 4140; por ser un material de alta resistencia en condiciones de alta temperatura.

A estos elementos se lo sometió a un tratamiento térmico de temple y revenido en sales, donde se consiguió una dureza de 48HRC para soportar los esfuerzos de compresión a los  $460^\circ\text{C}$  como temperatura máxima de ensayo. Por

su composición química y características mecánicas este material es el adecuado para la realización del proceso de extrusión en caliente.

El vástago se confeccionó en Acero DIN175 conocido como acero plata; por ser un acero con una aleación de Tungsteno, lo que le da una alta capacidad al corte y se lo usa como herramienta, con una dureza de 62HRC.

La funda térmica, con dimensiones como se ve en el Esquema 5 en el Anexo 1; es donde se colocará material refractario para mantener el dispositivo a la temperatura de extrusión. Este elemento se realizó con un Acero 1010, sin tratamiento térmico, ya que la función es sólo de mantener caliente al dispositivo contenedor, a la probeta, al vástago y a la matriz durante el proceso de extrusión.

Todos estos elementos fueron calentados en un horno eléctrico.

#### **7.4. Procedimiento del Proceso de Extrusión**

Primeramente se montó la matriz en el alojamiento posterior del dispositivo extrusor ver Foto N°1. A continuación se colocó la tapa con rosca Diámetro  $\varnothing = 50$  paso 1,5, para asegurar la matriz y la probeta como lo muestra la Foto N°2.



Foto N°1



Foto N°2

Se coloca la probeta a extruir por la perforación del dispositivo de diámetro  $\varnothing = 11\text{mm.}$ ; como se ve en la Foto N°3; que será deformada plásticamente en el proceso de extrusión.



Foto N°3

Luego se prepara la funda térmica colocándole arcilla refractaria, para conseguir mantener caliente el material que se extruye, el dispositivo y la matriz mientras se aplica carga para la deformación plástica del material. Antes de colocar dentro del horno se debe medir la distancia que se debe poner en la máquina de tracción para colocar todo el dispositivo.

Posteriormente de haber preparado todo el equipo, se ubica dentro de una mufla, como se ve en la Foto N°4, para calentar todos los elementos y se gradua a la temperatura de trabajo para realizar las experiencias. Las temperaturas utilizadas en este trabajo fueron de 460° C y 400°C. El uso de estas temperaturas fue buscando que el material AZ91D tenga una tensión de fluencia baja.



Foto N°4

Previo a los ensayos definidos, se realizaron pruebas de puesta a punto para determinar los tiempos de trabajo, que es unas de las variables de los ensayos. El tiempo de calentamientos a esas temperaturas fue de 2 horas.

Luego se preparó la máquina de tracción para realizar la extrusión, cargando el sistema hidráulico que proporciona la carga necesaria. Realizada esta tarea y pasada las dos horas, se prosiguió a sacar del horno los elementos de extrusión con probeta alojada en el dispositivo extrusor.

Se realizó el acople del vástago al dispositivo extrusor y estos a la funda térmica, como se ve en la Foto N°5.



Foto N°5

El dispositivo completo fue ubicado en el travesaño superior de la máquina de ensayo. Luego se aplica la carga en forma progresiva hasta el descenso del vástago. La velocidad de desplazamiento del vástago se calculó en función de la carrera desde la distancia dada por la longitud de la probeta que es de 20 mm, y el tiempo en que descendió dicho vástago. Como se ve en la Foto N° 6.



Foto N°6

Luego de obtener la deformación buscada de la probeta de la aleación de magnesio AZ91D, se procede a la descarga de la máquina de tracción. Finalmente, se desmonta el dispositivo de dicha máquina y se deja enfriar hasta el otro día. Como se ve el material deformado plásticamente en la Foto N° 7 y 8.



Foto N°7



Foto N°8

## **8. Resultados obtenidos y Discusión.**

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del proceso de extrusión de la Aleación de Magnesio AZ91D, mostrando el comportamiento del material sometido a un proceso para el cual no fue diseñado. Esto último se debe a que la aleación, que tiene un alto contenido de aluminio, presenta un rango muy acotado de solución sólida en donde se puede deformar plásticamente.

### **8.1. Proceso de Extrusión**

Las fuerzas aplicadas en dicho proceso están en función de la temperatura a la cual se realiza el proceso de extrusión:

- Para la probeta calentada a 460 °C durante 2 horas, la carga necesaria fue de 27.500N (2.800 kgf), durante a 10 min.
- Para la probeta calentada a 400 °C durante 2 horas, la carga necesaria fue de 41.190N (4.200 kgf), durante a 10 min.

Es de hacer notar la gran diferencia en la fuerza necesaria para realizar la extrusión en los ensayos a 400 y 460 °C, siendo prácticamente el doble cuando el material está más frío que cuando está más caliente. Esto se debe a que durante la extrusión a 460 °C el material recristaliza más rápidamente que a 400 °C, lo que hace que no se alcance a endurecer durante el proceso de extrusión.

La velocidad no se consideró debido a que la máquina donde se realizó la extrusión no posee control de esta variable. Sin embargo, ésta fue estimada en 5 mm/min, que es una velocidad adecuada para que el sistema no se enfríe antes de poder completar el proceso.

### **8.2. Metalografía**

Por medio de un microscopio óptico se evaluaron muestras metalografías del material con los distintos procesos de extrusión. El proceso de metalografía se realizó siguiendo las pautas del libro de Metallography And Microestructure de ASM Handbook. [22]

### 8.2.1. Microestructura

En la Figura N° 37a se presenta la aleación AZ91 original, maquinada antes de realizar el proceso de extrusión. Un ejemplo de las muestras una vez extruidas se ve en la Figura N° 37b. Como se ve, las probetas presentan buena calidad superficial, buena estabilidad dimensional y, en la mayoría de los casos, buena rectitud.

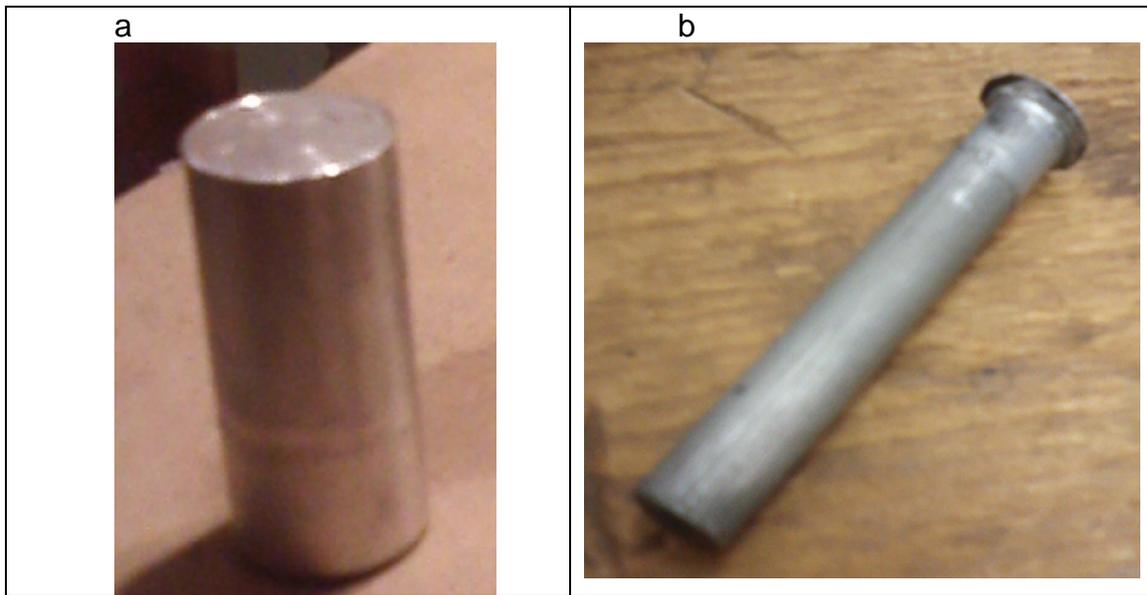


Figura N° 37 (Probetas a) original maquinada lista para extruír y b) probeta obtenida por extrusión a 460 °C de la aleación estudiada.

A partir de las probetas iniciales y extruidas, se caracterizaron metalográficamente y se realizaron ensayos de dureza sobre los cortes metalográficos. Así mismo se ensayaron a tracción para completar la caracterización mecánica del material procesado.

En la Figura N° 38 se puede observar la microestructura inicial de la aleación antes de la extrusión, mientras que en las Figura N° 39 y 40 se ve la microestructura de cortes longitudinales de las muestras extruidas a 460 °C y 400 °C, respectivamente.

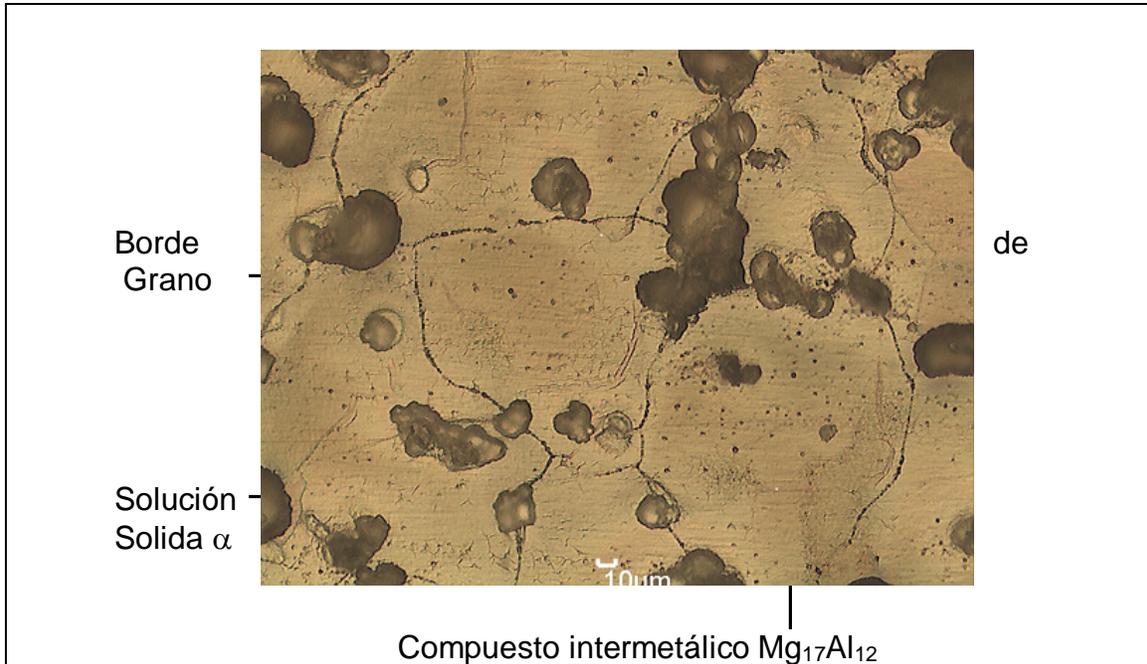


Figura N° 38: Microestructura del material inicial

Como se puede observar, la microestructura presenta granos gruesos en donde se encuentra el compuesto intermetálico  $Mg_{17}Al_{12}$ . A medida que desciende la temperatura de extrusión la solución sólida  $\alpha$  se va desdoblando y va formando el eutéctico  $\alpha + Mg_{17}Al_{12}$ .

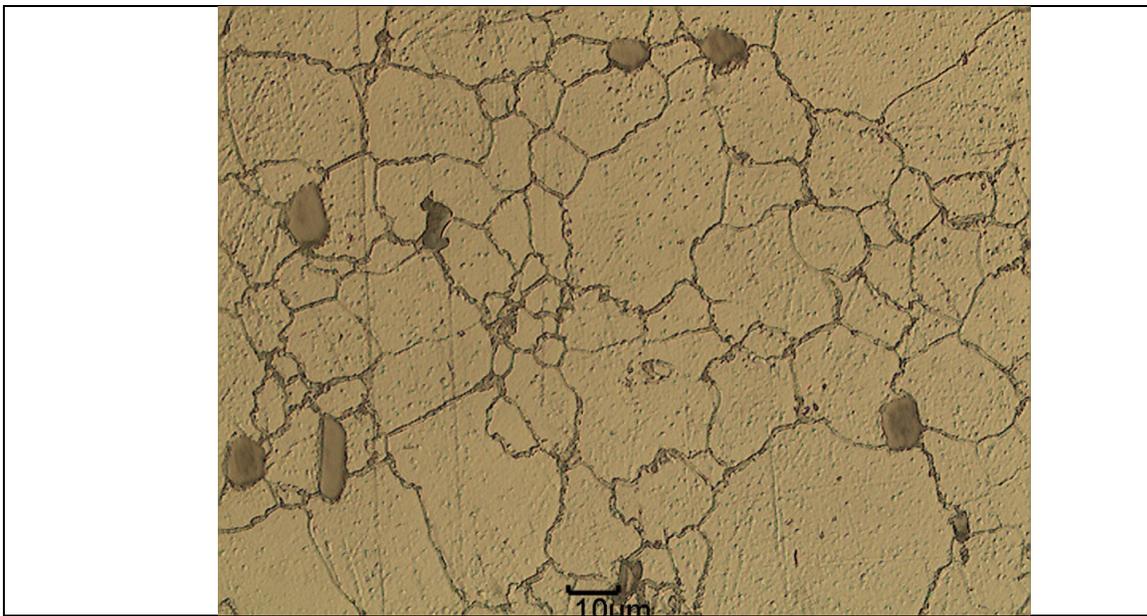


Figura N° 39: Microestructura de un corte longitudinal de la muestra extruida a 460 °C. X500

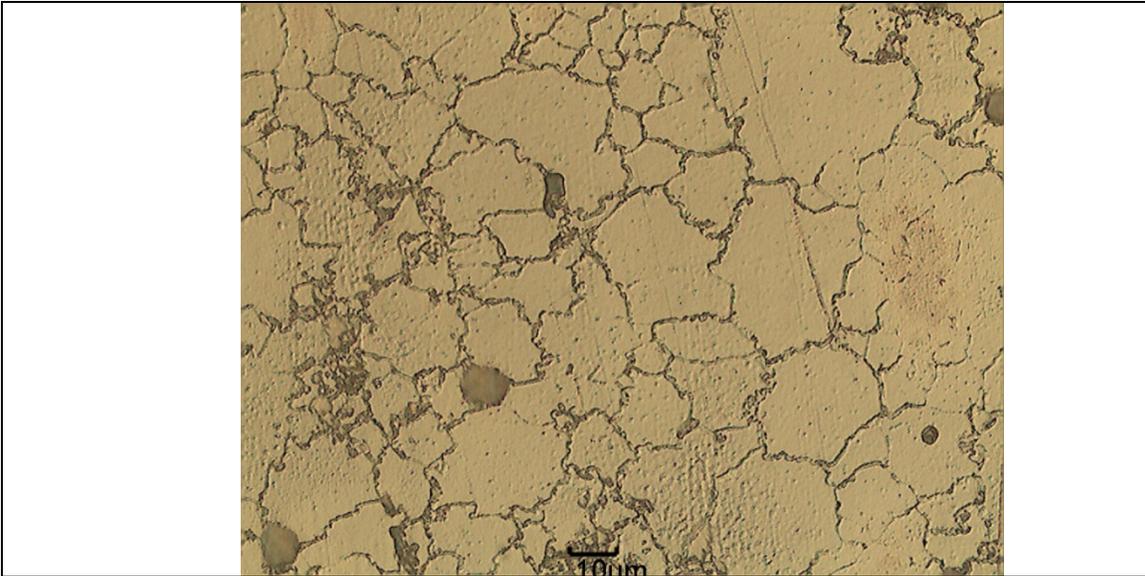


Figura N° 40: Microestructura de un corte longitudinal de la muestra extruida a 400 °C. X500

Comparando las figuras anteriores se puede ver que las microestructuras de las muestras extruidas no presentan modificación en el tamaño de grano ni alargamiento de los mismos por efecto de la deformación plástica. Esto se puede explicar por un proceso de recristalización que sufre el material durante la deformación y por efecto de la temperatura del proceso.

Sin embargo, observadas a menores aumentos se aprecia que se presentan zonas con tamaño de grano levemente mayor cercanos a la superficie y en el interior, mezclas zonales de tamaños de grano diversos. A pesar de esto, se puede observar que los granos no homogéneos, son equiaxiales. También se observa una orientación preferencial en la distribución del compuesto eutéctico (zonas oscuras), indicando la dirección de deformación plástica. Ver Figura N° 41.

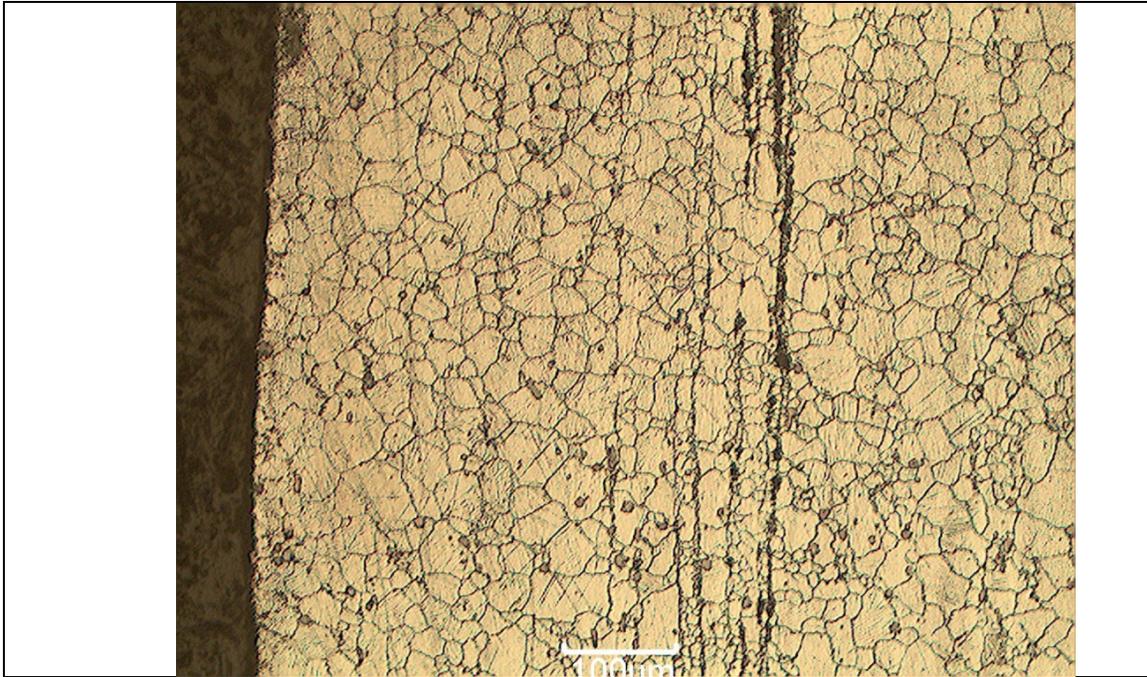


Figura N° 41: Microestructura de la muestra extruida a 460 °C. Se aprecia tamaño de grano homogéneo en el interior y tamaños homogéneos y mayores en la superficie. X100

### **8.3. Ensayos Mecánicos**

#### **8.3.1. Ensayo de Dureza**

Se realizaron ensayos de micro dureza Vickers con carga de 300 g, a las probetas: sin extruir y a la probeta extruida a 460 °C. En la Tabla 3 se ven los resultados obtenidos. A causa de la recristalización sufrida por el material extruido, se debería esperar que la dureza no varíe sustancialmente. Como se ve en la tabla 3 es esto lo que efectivamente sucede y se ve que la dureza aumenta.

Tabla 3: Comparación de los valores de dureza de las muestras extruidas

Muestra	Dureza (HV <sub>300</sub> )	Incertidumbre Expandida (HV <sub>300</sub> )
Sin Extruir	71	4
460°C	81	4

### 8.3.2. Ensayo de Tracción

Se realizaron ensayos de tracción a una probeta sin extruir (maquinada a partir del material de origen), a una probeta extruida a 400 °C y a una probeta extruida a 460 °C. Los valores de resistencia máxima obtenidos se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4: Comparación de los valores de resistencia a la tracción de las muestras extruidas

	Resistencia a la tracción (MPa)
Teórica (*)	230
Sin extrusión	220
Extruido a 460 °C	390

(\*) Extraído de ASM Metals Handbook. Vol. 02 Proprietary, Selections Nonferrous Alloys, and Special Purpose Materials.

La resistencia máxima teórica (\*), indica la tensión que soporta el material, obtenido de norma. Se debe recordar que este material es indicado para piezas inyectadas a presión, por lo que no debería llevar proceso de deformación plástica en estado sólido.

La probeta “sin extrusión” proviene del mecanizado del material reciclado por refusión. Se confeccionó una probeta de medidas similares a las obtenidas de los procesos de extrusión.

El valor obtenido del ensayo de tracción del material reciclado y no extruido es de 220 MPa que está muy próximo a lo solicitado por norma. El aumento de la resistencia a la tracción de las muestras extruidas hace que el material, a pesar de la recristalización, sufra un proceso de endurecimiento por precipitación continua. En él, las partículas secundarias comienzan a precipitar como solución sólida sobresaturada en forma espinodal, sobre los borde de granos que se ven gruesos como se observa en la metalografía de la Figuras 42 y 43. [23]

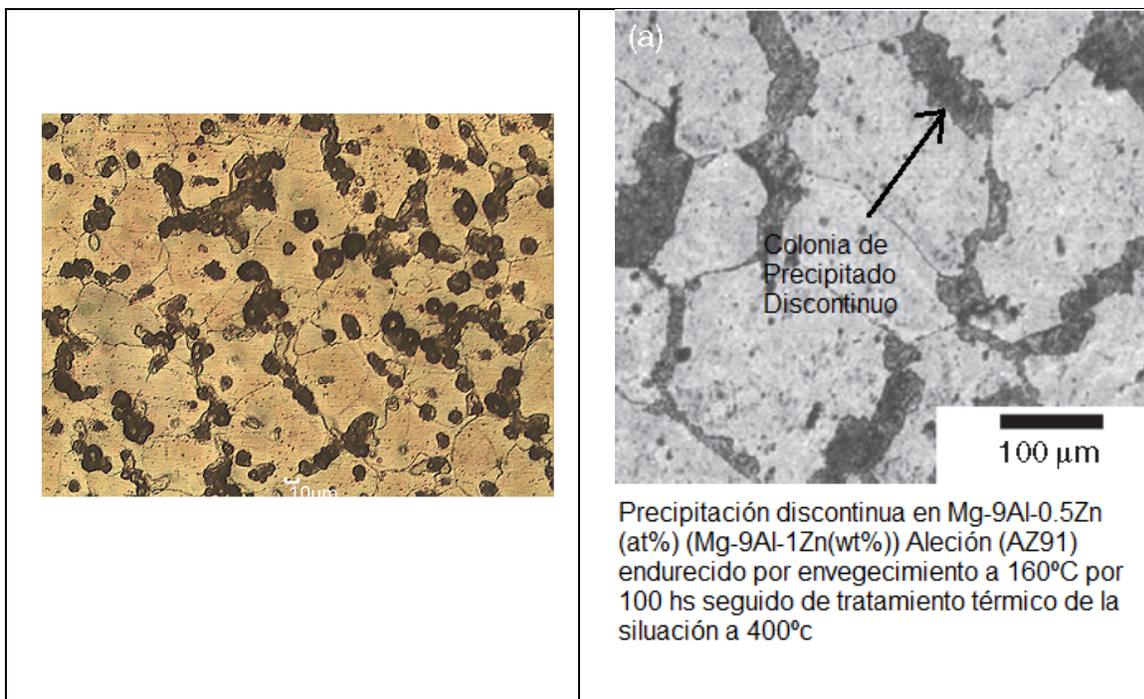


Figura N°42

Figura N° 43

El material extruido a 460 °C muestra una resistencia a la tracción superior al de la muestra sin extruír y al valor teórico y su valor es de 390 MPa. Esto se puede explicar porque se produce un endurecimiento por precipitación continua durante el enfriamiento de la aleación. Este fenómeno compite con los procesos de ablandamiento por recristalización por temperatura y dinámica que presenta el material.

## 9. Conclusiones

Luego del desarrollo de este trabajo, se puede concluir que:

- ❖ Es posible extruír en caliente la aleación obtenida por re fusión de virutas de mecanizado de aleación AZ91D.
- ❖ Se confeccionó un dispositivo de extrusión y se desarrolló un procedimiento de ensayo para el proceso.
- ❖ Se observó que el material extruido, tanto a 400 como a 460 °C, presenta una microestructura recristalizada.
- ❖ La resistencia a la tracción mejora por efecto de la extrusión (desde 260 a 390 MPa)
- ❖ Se presume que este aumento de la resistencia se debe al proceso de precipitación del compuesto  $Mg_{17}Al_{12}$  en borde de grano.

## 10. Referencias Bibliográficas

[1] [15] [16] [22] Dr. Roberto Lucci-Reciclado de magnesio: recuperación de la aleación AZ91 a partir de virutas de mecanizado-Edición 2.015.

[2], [8] Adrian P. Mouritz-Introduction to Aerospace Materials- Edición 2.012.

[3] Sam Zhang and Dongliang Zhao-Aerospace Materials Handbook-Edición 2.012.

[4] [6] Dr. Frank Czerwinski-Magnesium Injection Molding-Edición 2.008.

[5] [7] [10] [12] [14] [17] Horst E. Friedrich - Barry L.Mordike. Magnesium Technology: Metallurgy, Design Data, Applications. Edición 2.006.

[9] F.C. Campbell-Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials - Edición 2.006.

[11] E. Brandes- G, B Brook - Smithellsigth Metals Handbook- Edición 2.008,

[13] EscritoporAZoM Material.

[18] Vukota Boljanovic, Ph.D. - Metal Shaping Processes: Casting and Molding; Particulate Processing; Deformation Processes; and Metal Removal- Edition 2.010.

[19] [21]Pradip K. Saha- Aluminium Extrusión Technology-Edición 2.000.

[20] M. Bauser, G. Sauer, K. Siegert- Extrusión - Edición 2.006

[23] Metallography And Microestructure de ASM Handbook. Volumen 9 - Edición 1.985

[24] Mihriban O. Pekguleryuz, Karl U. Kainer and A. Arslan Kaya- Fundamentals of Magnesium Alloy Metallurgy- Edición 2.013

[25] Colleen Bettles and Matthew Barnett - Advances in Wrought Magnesium Alloys- Edition 2.013.

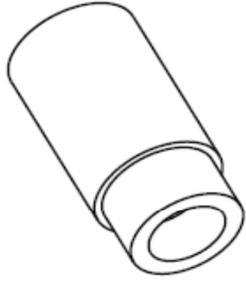
## 11. Trabajo futuro.

Al futuro se puede seguir estudiando con respecto a los siguientes casos:

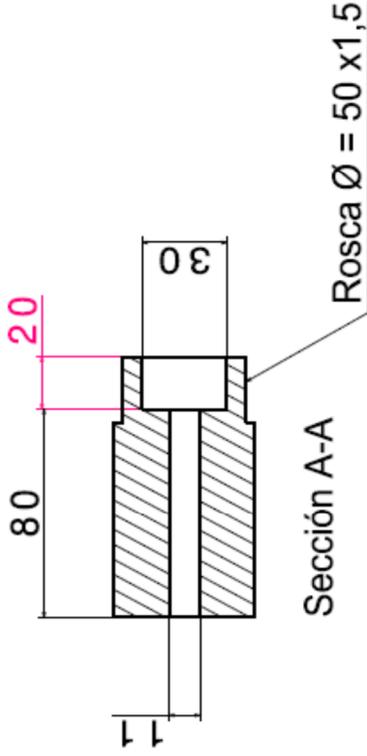
- Comportamiento de las propiedades mecánicas con el mecanismo de la recristalización dinámica y el mecanismo de endurecimiento por precipitación.
- Límites del proceso de extrusión para la Aleación de Magnesio AZ91D.
- Estudio completo de las propiedades mecánicas, del material extruido.
- Comparación de las propiedades mecánicas de la Aleación de Magnesio AZ91D extruida con las aleaciones de aluminio extruidas.
- Comportamiento de la aleación de magnesio AZ91D con respecto a la corrosión y al creep,
- Probabilidad de conseguir piezas de geometrías variables, distintas al redondo sólido.
- Posibilidad de soldabilidad de la aleación extruida.

## **Anexos.**

[Escribir texto]

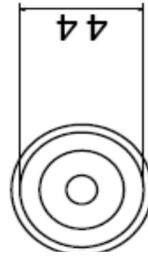


Vista Isométrica

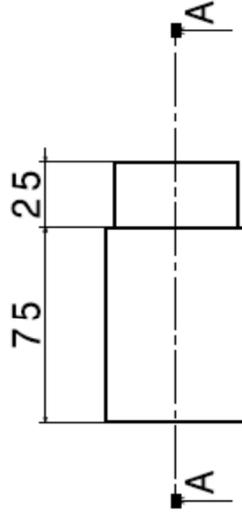


Sección A-A

Rosca Ø = 50 x 1,5



Vista Derecha



Vista Frontal

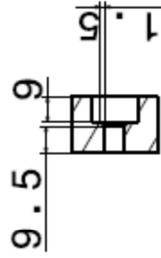


Vista Izquierda

Esquema 1

Escala 1:1  
Todas las medidas están en mm.

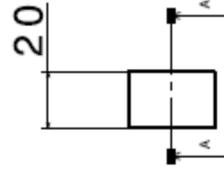
## Esquema 2



Sección A-A



Vista Isométrica



Vista Frontal



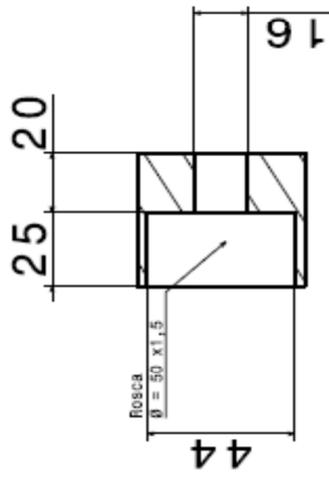
Vista Derecha



Vista Izquierda

Todas la Escaladas 1:1  
Todas las medidas están en mm.

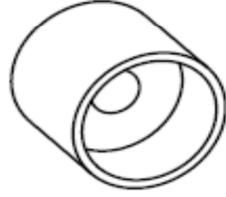
Esquema 3



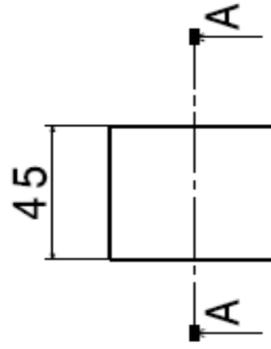
Sección A-A



Vista Derecha

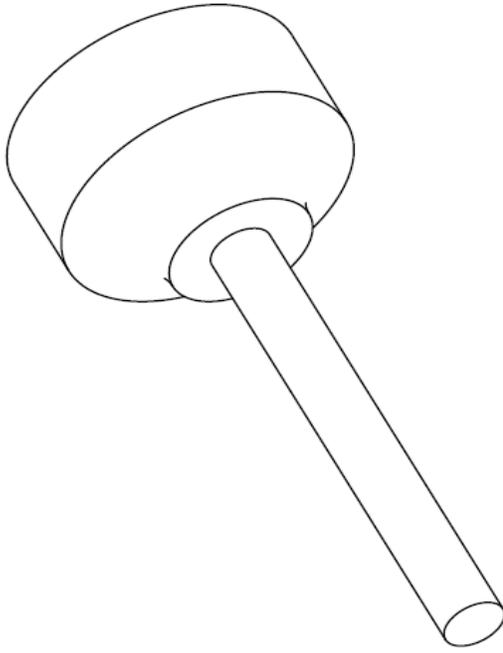


Vista Isometrica

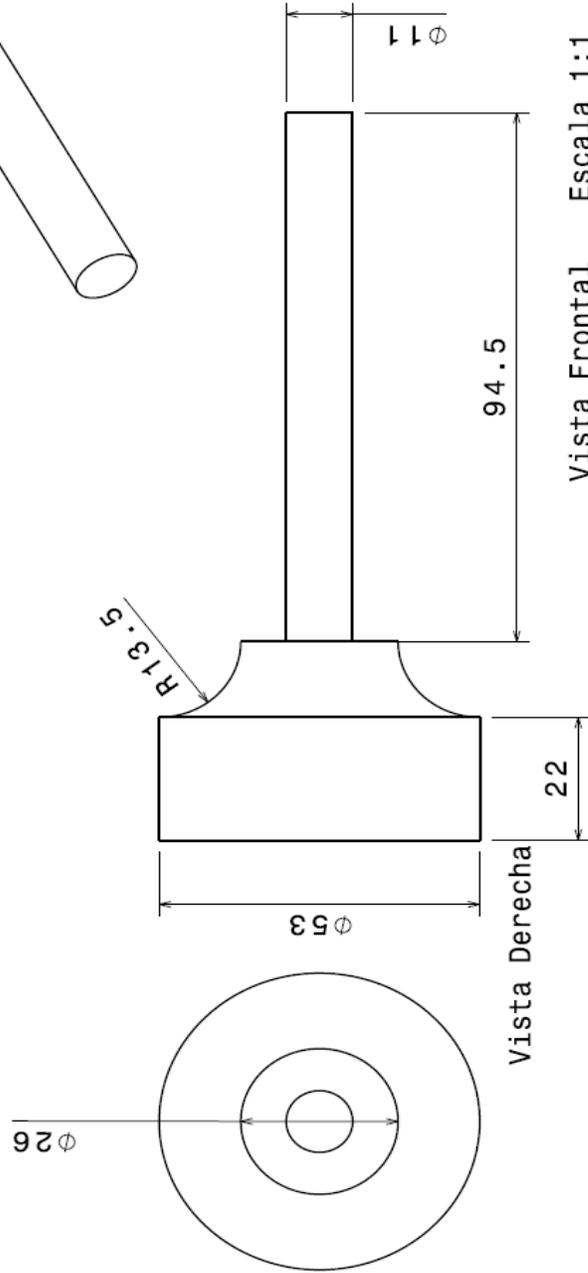


Vista Frontal

Escala 1:1  
Todas las medidas están en mm.



Vista Isométrica

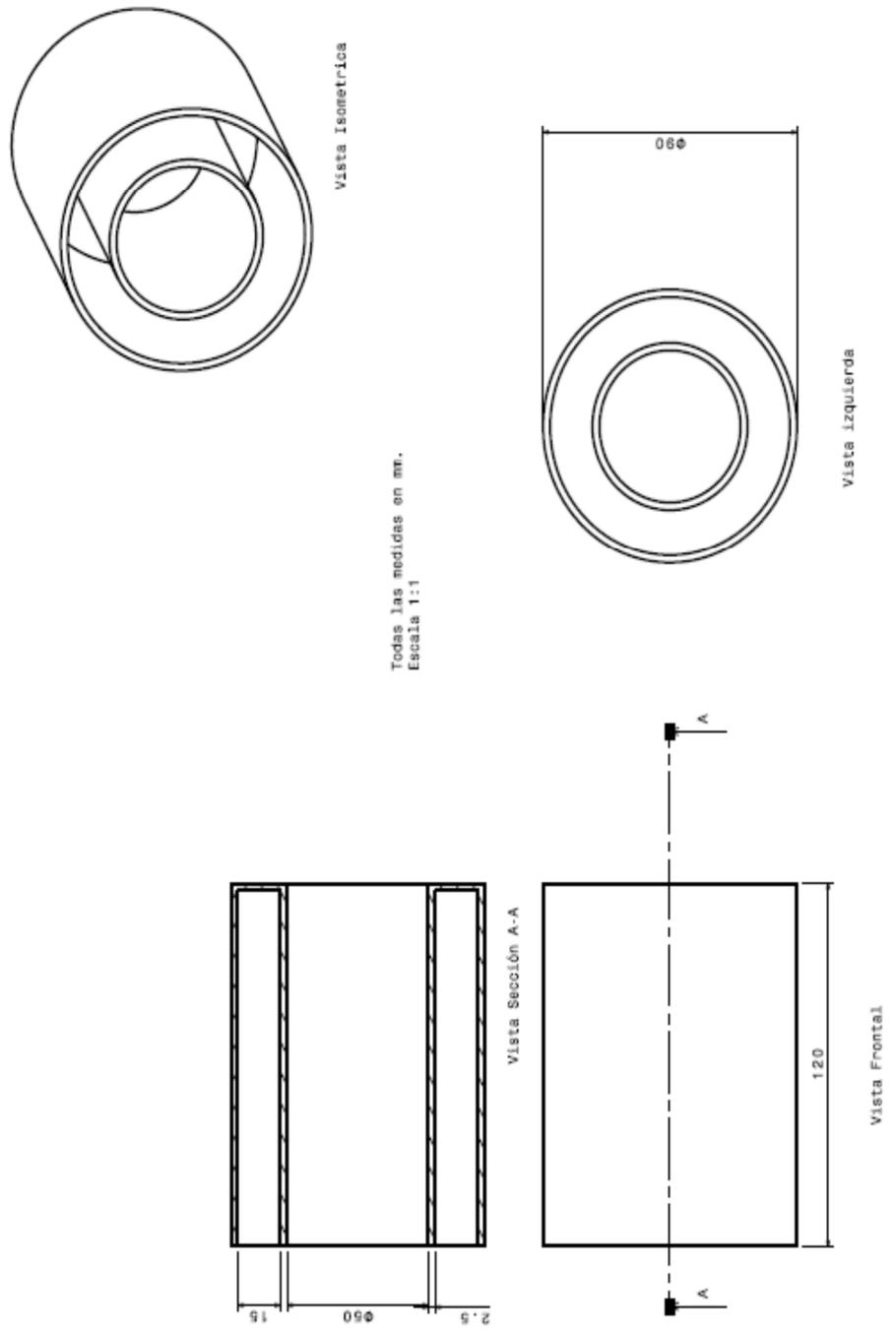


Vista Frontal Escala 1:1

Todas las medidas están en mm.

Esquema 4

# Esquema 5



## ANEXO 2

### Mecanismo de recristalización en magnesio y aleaciones de magnesio [25]

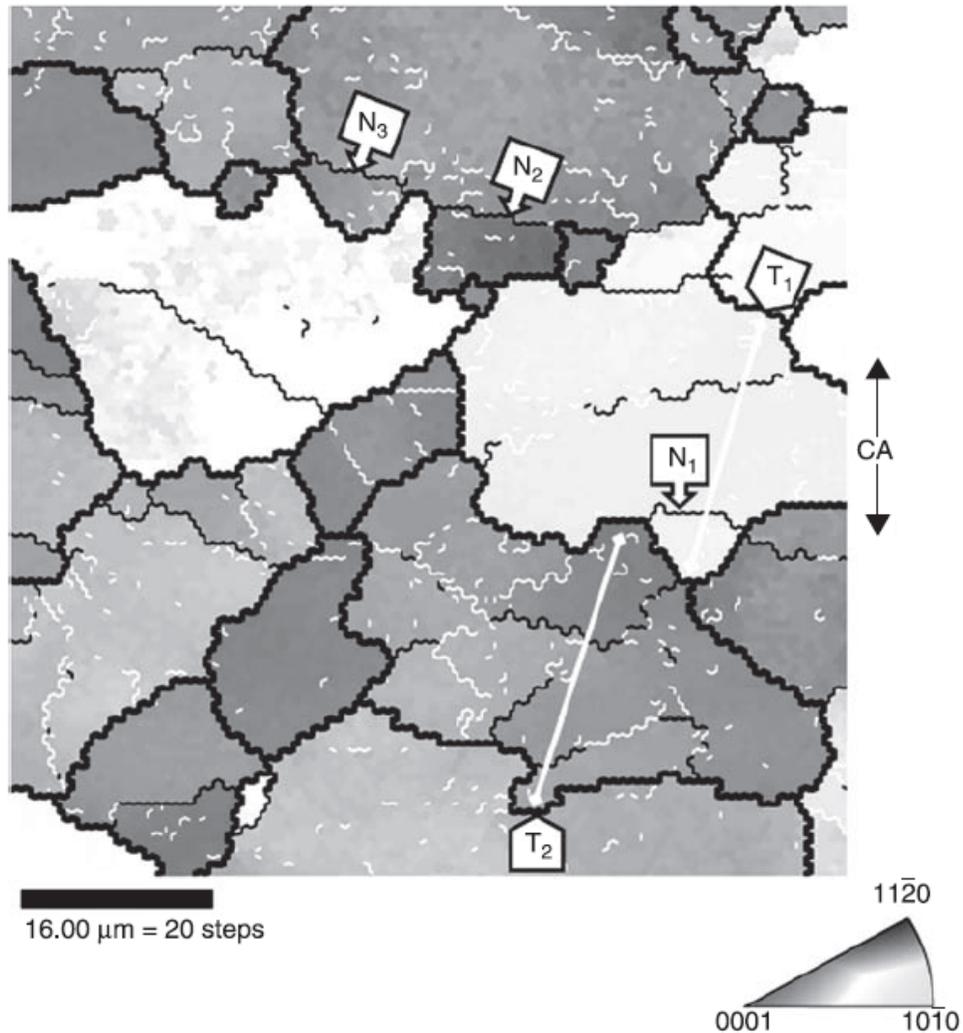
El magnesio recristaliza a una temperatura en el orden de los 300°C. Sin embargo, también sufre una recristalización por efecto de la deformación plástica conocida como recristalización dinámica inducida por deformación (DDRX) (**Discontinuous DRX (Dynamic recrystallization)**).

El mecanismo de recristalización dinámica se produce por efecto de la deformación siguiendo las siguientes etapas. Primero se desarrolla un grano recristalizado a partir de un límite de grano y por lo tanto, el curvamiento de los límites de grano es un prelude de DDRX, y está relacionado con la migración de los límites de grano inducido por la deformación. Bajo estas condiciones el límite inicial migrará en una dirección dictada por las fuerzas que actúan sobre él. La fuerza para la migración del borde de grano es proporcionada, por un lado, por la diferencia de energía almacenada sobre el límite, y por otro, surge otra fuerza por la propia interacción de las dislocaciones de la red con el límite del grano. Cuando las dislocaciones de red interactúan con un límite de grano, se disocian y son absorbidas por el límite de grano. Antes de completar el proceso de disociación, se acumula un campo de esfuerzo que ejerce una fuerza local sobre el límite del grano. A altas temperaturas, el reordenamiento de las dislocaciones de la red se produce fácilmente dentro de las zonas de acumulación de dislocaciones y de esta manera la fuerza que actúa se hace pequeña. Como resultado, el límite se sobresale hacia el grano con la densidad de dislocación más alta. A bajas temperaturas, la segunda fuerza es dominante debido al reordenamiento restringido de las dislocaciones de la red dentro de las acumulaciones y cuando se forma una protuberancia, sigue formando parte del grano original. La configuración abombada del límite inicial es inestable y suele estar anclada por los subgranos que evolucionan perpendicularmente al borde de grano inicial. En el magnesio y sus aleaciones estos lazos de dislocación (LAB) (**low-angle boundaries**), consisten usualmente en dislocaciones localizadas en planos basales.

Después de que un segmento de grano comienza a sobresalir, se forma una pared de dislocación puente y ancla el límite de grano ensanchado. Yang sugirió que los lugares N 1, N 2 Figura N° 44 se desarrollaron después del abombamiento del límite del grano. El LAB se convierte en el límite entre la región abultada y el grano parental y comienza a evolucionar un núcleo DDRX.

Los núcleos DDRX crecen y consumen dislocaciones de la red. Como resultado, la recristalización dinámica proporciona una disminución significativa de

la tensión, especialmente a temperaturas intermedias y bajas. Se ha informado que la aparición de granos producto de la recristalización dinámica inducida por deformación proporciona una mayor disminución en la densidad de dislocación de la red en comparación con la recristalización común. Los bordes de grano migrantes en la DDRX pueden atrapar casi todas las dislocaciones de la red, mientras que la recristalización por temperatura implica muy poca migración de límites.



Mapa de desorientación que indica la formación de núcleos DDRX (N 1, N 2, N 3) representados en la Fig. 5.6d, AZ31 sometidos a una tensión de 400 ° C hasta un 10%; CA = eje de compresión (Yang et al., 2003).

Figura N° 44: Formación de núcleos por recristalización dinámica inducida por deformación (DDRX) (Yang y col.)

PROCESO DE EXTRUSION DE LA ALEACIÓN DE MAGNESIO AZ91D  
COPYRIGHT©N°5323127 – TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS

