

01126
16

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO



FACULTAD DE INGENIERIA

ESTRUCTURA Y PROPIEDADES DE UNA PIEZA DE
ALUMINIO OBTENIDA POR FUNDICION PRENSADA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
(EN EL AREA DE INGENIERIA MECANICA)

P R E S E N T A :

ARTURO CRISTIANI REYES

DIRECTOR DE TESIS: DR. ANDRES HERRERA VAZQUEZ
CODIRECTOR: DR. ARTURO BARBA PINGARRON



MEXICO, D.F.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2003.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

DEDICATORIAS

Mamá y Papá

Con cariño les dedico esta tesis y de corazón les agradezco sus enseñanzas, consejos y apoyo. Comparto con ustedes la alegría de este logro del cual ustedes son parte.

Jorge

Recuerdo los bellos momentos que hemos vivido desde la infancia y me siento afortunado de que seas mi hermano y también mi amigo.

Lilia

De ti he aprendido mucho acerca del colorido mundo de los sentimientos y emociones. Tú me has enseñado la otra cara del Unicornio.

Gina

Hemos compartido momentos felices y me siento contento de saber que cuento con una amiga en todo momento.

Abuelita

Si hay alguien a quien admiro es a ti, por tu bondad, entereza y buenos sentimientos.

Rocío

Por los buenos momentos que hemos vivido y por ser mi compañera en las buenas y en las malas también te dedico la presente tesis. T.Q.Ch.

AGRADECIMIENTOS

En particular agradezco al Dr. Andrés Herrera Vázquez por la dirección de la presente tesis y por haber compartido conmigo su experiencia y conocimientos.

También agradezco a: Dr. Arturo Barba Pingarrón, Ing. Jesús Roviroza López, M.I. José Javier Cervantes Cabello, M.I. Magdalena Trujillo Barragán, por sus correcciones y valiosos comentarios.

Reconociendo su importante ayuda también quiero agradecer a: Dr. Luis F. Vasallo (Centro de Geociencias de la UNAM) por las facilidades prestadas para el uso del microscopio metalográfico. Dr. Juan Bosco (Facultad de Ingeniería, UAQ) por su ayuda en el desarrollo de las pruebas de tensión. Ing. Jaime González (CIATEQ) por su colaboración en el desarrollo de los ensayos de dureza y fotografías de superficies de fractura. Ing. Soraida Martínez Melo (FATA, UNAM) por su ayuda en las fotografías de la microestructura. Ing. Carmen Peza Ledesma (FATA, UNAM) por su ayuda en la preparación de los reactivos para los ensayos metalográficos.

Y muy especialmente agradezco a la Facultad de Ingeniería y a la Universidad Nacional Autónoma de México por la formación que he recibido como profesionista y como persona.

INDICE

Prólogo.....	I
Introducción.....	I

Investigación Teórica

Capítulo I

Generalidades Sobre Fundición de Aleaciones

1.1	El Proceso de la Fundición.....	5
1.1.1	Colada en Arena Verde.....	7
1.1.2	Colada en Molde Metálico.....	9
1.1.3	Fundición a Presión.....	10
1.1.4	Fundición Centrífuga.....	12
1.1.5	Fundición a Baja Presión.....	13
1.1.6	Fundición al Vacío.....	14
1.1.7	Fundición a la Cera Perdida.....	14
1.1.8	Fundición por Salpicado.....	16
1.2	La Fundición del Aluminio y sus Aleaciones.....	16
1.3	Hornos Comúnmente Usados en la Fundición de Aluminio.....	18
1.3.1	Hornos de Crisol.....	19
1.3.2	Hornos de Resistencia Eléctrica.....	20
1.3.3	Hornos de Inducción.....	21
1.3.4	Atmósferas de Fundición.....	24
1.4	Solidificación de Fundiciones.....	25
1.4.1	Reducción Volumétrica en Fundiciones.....	26
1.4.2	Solidificación de Metales Puros.....	26
1.4.3	Solidificación de Aleaciones.....	27
1.4.4	Crecimiento Dendrítico.....	28
1.4.5	Porosidad Interdendrítica.....	31

1.4.6	Segregación de Impurezas.....	33
1.4.7	Estructura de Grano.....	33
1.4.8	Gases en Metales Fundidos.....	36
1.4.9	Supresión de Gases en Fundiciones.....	40

Capítulo 2

Propiedades Mecánicas

2.1	Ensayos y Propiedades Mecánicas.....	43
2.2	Ensayo de Tensión.....	44
2.2.1	Esfuerzo de Cedencia.....	46
2.2.2	Resistencia a la Tensión.....	47
2.2.3	Módulo de Elasticidad.....	48
2.2.4	Relación de Poisson.....	48
2.2.5	Ductilidad.....	49
2.3	Ensayo de Dureza.....	50
2.3.1	Dureza Brinell.....	51
2.3.2	Dureza Rockwell.....	51
2.4	Propiedades Mecánicas del Aluminio.....	53

Capítulo 3

Metalografía

3.1	Metalografía.....	56
3.2	Inspección Microscópica.....	56
3.2.1	Selección de la Muestra.....	57
3.2.2	Montaje.....	58
3.2.3	Desbastado.....	58
3.2.4	Pulido.....	59
3.2.5	Ataque Químico.....	59
3.2.6	Microscopio Metalográfico.....	60

3.3	Inspección Macroscópica.....	61
3.4	Consideraciones Especiales para la Metalografía del Aluminio y sus Aleaciones...62	
3.4.1	Preparación para Observación Macroscópica.....	63
3.4.2	Preparación para Observación Microscópica.....	65

Capítulo 4

Generalidades del Proceso de Fundición Prensada

4.1	El Proceso de Fundición Prensada.....	69
4.2	Sistemas de Aplicación de Presión.....	71
4.3	Factores que Influyen en la Calidad de la Fundición Prensada.....	72
4.3.1	Impurezas en el Metal Fundido.....	73
4.3.2	Selección de la Aleación.....	76
4.3.3	Configuración y Holguras Molde – Dado.....	77
4.3.4	Agentes de Desmoldeo.....	78
4.3.5	Temperaturas de Operación del Molde y Dado.....	79
4.3.6	Tratamiento Térmico.....	79
4.4	Posibilidades de Aplicación de la Fundición Prensada.....	80
4.5	Aspectos Económicos de la Fundición Prensada.....	82
4.6	Control de la Micro y Macro Estructura.....	82

Desarrollo Experimental

Capítulo 5

Etapas del Desarrollo Experimental

5.1	Desarrollo Experimental.....	85
5.2	Resumen.....	85
5.3	Selección de la Aleación.....	86
5.4	Fusión de la Aleación.....	87
5.5	Preparación del Molde y Punzón.....	88

5.6	Vaciado del Metal en el Molde.....	92
5.7	Aplicación de la Presión.....	92
5.8	Obtención de las Muestras.....	93
5.9	Metalografía de Muestras para Análisis de Macroestructura.....	93
5.10	Maquinado de Microprobetas para Ensayos de Tensión.....	95
5.11	Ensayos de Tensión.....	99
5.12	Ensayos de Dureza.....	100
5.13	Metalografía de Microprobetas para Análisis de Microestructura.....	101

Resultados y Análisis

Capítulo 6

Resistencia a la Tracción, Dureza, Macroestructura, Microestructura

6.1	Resultados y Análisis.....	103
6.2	Ensayos de Tensión.....	103
6.3	Ensayos de Dureza.....	113
6.4	Macroestructura.....	114
6.5	Microestructura.....	118
6.6	Superficies de Fractura.....	121
6.7	Aspecto Superficial.....	123
6.8	Análisis de Resultados.....	123

Conclusiones y Recomendaciones

Capítulo 7

La Parte Final

7.1	Conclusiones.....	128
7.2	Recomendaciones para Futuros Trabajos.....	130
	Bibliografía.....	132

PROLOGO

Tanto la fundición como la forja son procesos de manufactura ampliamente utilizados desde hace varios siglos.

Pero es hasta finales del siglo XIX que se vislumbra la posibilidad de unir estos dos procesos en uno solo con el que se obtengan los beneficios de cada uno.

La presente tesis trata precisamente sobre dicha combinación del proceso de forja y del de colada por gravedad; a este proceso en inglés se le conoce como "squeeze casting" pero en español lo podemos denominar como fundición prensada.

El proceso consiste a grandes rasgos en introducir por gravedad en un molde un metal fundido al que se le aplicará presión durante toda la etapa de solidificación. El motivo por el que se aplica presión es para mejorar las propiedades mecánicas de la pieza.

De acuerdo con los estudios de fundición prensada, reportados por diferentes investigadores en el mundo, las piezas obtenidas de este modo muestran niveles de densidad y propiedades asociadas con la forja unido al bajo costo unitario característico de la fundición por gravedad.

La economía del proceso deriva del uso total del metal fundido eliminándose el material usado para los alimentadores de vertido, bebederos de alivio y compuertas usadas en la fundición por gravedad.

La fundición prensada es un proceso atractivo desde varios puntos de vista, por la calidad de las piezas producidas, por el mejoramiento de las propiedades mecánicas, por las posibilidades de automatizar el proceso, porque la maquinaria necesaria no es tan complicada ni costosa como la necesaria para la fundición a presión, y porque se trata de una alternativa técnica y económicamente viable.

Para la realización de esta tesis se eligió como material de trabajo una aleación de aluminio 356 (Si 7%, Mg 0.3%, Fe 0.3%, Al 92.4%), ya que el aluminio es uno de los metales que por sus propiedades físico-químicas es de los más utilizados en la industria mundial.

Hoy en día se cuenta con una gran variedad de aleaciones de aluminio que se usan para muchísimos propósitos que van desde la más delgada hoja metálica para envolver hasta las más complejas aplicaciones en aeronáutica, exploración espacial y electrónica.

El aluminio debe la mayoría de sus aplicaciones a su ligereza y a la resistencia relativamente elevada de sus aleaciones, aunque otros usos dependen de su resistencia a la corrosión, de sus buenas propiedades para ser trabajado o de sus propiedades eléctricas o térmicas.

La aleación Al 356 ha encontrado diversas aplicaciones por sus excelentes cualidades para fundirse y por su alta resistencia a la corrosión.

Esta aleación es una de las más utilizadas en la industria automotriz y como ejemplo de alguna de sus aplicaciones tenemos algunas partes de la transmisión, del motor, pistones y la fabricación de rines entre otros.

La importancia de la presente tesis radica en estudiar la posibilidad de mejorar las propiedades mecánicas en piezas producidas con Aluminio 356 mediante experimentos de solidificación a diferentes presiones.

En esta tesis la atención se centra en estudiar la variación de las propiedades mecánicas y de la microestructura como funciones de la presión aplicada durante la etapa de solidificación.

Los objetivos que se persiguieron al realizar este estudio fueron:

- 1) Obtener piezas sanas (con poca porosidad, sin rechupes, aspecto superficial terso) de grano fino y con estructuras metalúrgicas homogéneas.
- 2) Comparar las propiedades mecánicas de las piezas obtenidas por el proceso de fundición prensada con las reportadas en otras investigaciones sobre el tema.
- 3) Comprobar la factibilidad del proceso para su aplicación industrial.
- 4) Estudiar lo que sucede con la dureza, esfuerzo de fractura, macroestructura y microestructura de una pieza cilíndrica de Aluminio 356 producida por fundición prensada.

Por último cabe mencionar que un motivante adicional en la elaboración de esta tesis fué el de trabajar en un tema que a pesar de su potencialidad, no se ha escrito lo suficiente de él en nuestro país según pude constatar de la investigación bibliográfica.

PAGINACIÓN

DISCONTINUA

INTRODUCCIÓN

La fundición o colado es el proceso de formar objetos vertiendo metal líquido o material viscoso en un molde o forma preparados. Un colado es un objeto formado al permitir que el material se solidifique. Un molde es un recipiente que tiene la cavidad (o cavidades) de la forma que va a colarse.

La fundición es una de las industrias más antiguas en el campo del trabajo de los metales y se fecha aproximadamente en 4000 a.C., siendo desde aquellas épocas que se han desarrollado distintos métodos para colar diversos materiales.

La concepción del proceso de *fundición prensada* data de 1878 de acuerdo a un reporte de la Sociedad Metalúrgica del Imperio Ruso. Sin embargo no fue sino hasta 1937 que se realizaron los primeros experimentos del tema para la producción de cilindros de latón y bronce [1].

En el proceso de *fundición prensada* se combinan en una sola operación las ventajas tanto de la fundición como de la forja y consiste esencialmente en vaciar el metal líquido en la cavidad de un molde y aplicar posteriormente presión por medio de un vástago durante la solidificación de la pieza. Por lo anterior también es común que a este proceso se le conozca como *forja de metal líquido*.

La importancia de la *fundición prensada* radica en que las piezas obtenidas presentan buen acabado superficial (dado que el molde es metálico) con una reproducción fiel de los detalles del molde y tolerancias dimensionales muy cerradas con lo que se reducen las operaciones de acabado final lo que contribuye a la reducción de costos.

Aplicar presión al metal durante la etapa de solidificación repercute positivamente en las propiedades mecánicas ya que se reduce la porosidad y defectos como los "rechupes"

(encogimiento) lográndose además una estructura de grano fino debido a la eficiente transmisión de calor a través del molde metálico así como la presión aplicada.

No hay que perder de vista que los defectos tradicionales de la fundición por gravedad (como porosidad y cavidades) se forman durante la solidificación del metal, por lo que aplicar presión durante este periodo ayuda a la disminución en la porosidad lo que significa un aumento en la ductilidad y resistencia a la fatiga.

Adicionalmente las piezas producidas por "Squeeze Casting" pueden ser sometidas a un tratamiento térmico como el T6 (tratamiento térmico a 525 °C durante 3 horas, enfriamiento con agua y envejecimiento a 170 °C durante 4 horas), con lo que se obtienen propiedades mecánicas que rivalizan con las de piezas forjadas, soldadas, maquinadas, pintadas, anodizadas.

En general se obtiene una mejora en las propiedades mecánicas como la resistencia a la tracción, resistencia al impacto, dureza y resistencia a la fatiga [2,3].

El incremento de las propiedades mecánicas obtenidas por *fundición prensada* (comparando con la fundición sin aplicar presión) está correlacionado directamente con las siguientes variables:

- 1) Temperatura del molde. Se aconseja precalentar el molde para disminuir el choque térmico entre el metal y el molde.
- 2) Velocidad de vaciado del metal líquido. La velocidad de vaciado se procura que sea despacio para que el flujo sea lo menos turbulento posible y disminuir la cantidad de aire atrapado en la pieza.
- 3) Temperatura del metal fundido.
- 4) Velocidad del pistón que aplica la presión al metal en el molde.
- 5) Tiempo de espera antes de aplicar la presión.
- 6) Nivel de la presión aplicada por el pistón.
- 7) Tiempo de aplicación de la presión.

Los anteriores son los principales parámetros que influyen en la calidad de las piezas producidas por *fundición prensada*, pero habrán de considerarse en una eficiente producción industrial otros factores como las impurezas contenidas en el metal líquido, la holgura entre el molde hembra y el vástago, configuración del molde, composición química de la aleación.

Una vez que el metal es vertido en el molde comienza la solidificación y la capa de solidificación causada por la disipación de calor a través del molde es destruida por la presión aplicada. En esta etapa ocurre la eliminación de los gases en el metal fundido aunado a una reducción de volumen y aumento de la densidad [2].

La presión aplicada al metal líquido tiende a reducir o elimina el gas que de otra forma produciría porosidad. Esto es debido a que la presión incrementa la solubilidad de los gases en el líquido fundido de tal manera que se mantienen en solución y se dificulta la nucleación de burbujas debido a la presión [3].

Al mismo tiempo cuando las cavidades se están formando por encogimiento del metal líquido, el metal de los alrededores contiene mucho de la fase líquida, por lo que una aplicación constante de presión puede alimentar dicho metal dentro de las cavidades.

Con respecto a la magnitud de la presión aplicada se ha experimentado con presiones de 35 kN/cm² hasta 70 kN/cm², esta última presión es muy elevada y por tanto difícil de aplicar, pero se han mejorado las propiedades mecánicas en muchas aleaciones incluyendo la de aluminio 356 a partir de 7 kN/cm² de presión [4].

En otros estudios se han aplicado 68.96 kN/cm² de presión a una aleación A356, pero se llegó a concluir que aplicando solo 34.48 kN/cm² era suficiente para obtener propiedades similares a las muestras producidas a 68.96 kN/cm² [4].

De acuerdo a la experiencia recopilada durante la experimentación con este proceso se ha encontrado aconsejable la desgasificación de la fundición antes de vaciarla, las altas

presiones durante la solidificación refinan el grano y aplicando la presión rápidamente se mejora el centro de la pieza colada [4].

Con todo lo anterior se puede decir que el proceso de *fundición prensada* está comercialmente hablando en una etapa de despegue, ya que apenas en 1974 se usó comercialmente por primera vez este proceso, para aleaciones no ferrosas, en E.U. [5].

Por lo que con la presente tesis se pretende contribuir al estudio de la *fundición prensada*.

1.1 EL PROCESO DE LA FUNDICIÓN

Desde sus orígenes el proceso de la fundición ha consistido en la fabricación de piezas metálicas que se forman vertiendo el metal líquido dentro de un molde con la forma y dimensiones requeridas. La pieza final se obtiene al permitir la solidificación del material.

Una vez que el metal ha solidificado se procede a sacar la pieza del molde (desmoldeo) y realizar las operaciones de limpieza, maquinado y acabado pertinentes.

Hoy en día se cuenta con diversas técnicas de fundición como fundición en arena, fundición centrífuga, fundición a presión, fundición a la cera perdida, entre otras, pero a grandes rasgos las etapas necesarias en un proceso de fundición pueden resumirse en la figura 1.1 y son:

- Materias primas componentes de la aleación: Preparación de la aleación que se utilizará en la fabricación de la pieza.
- Fusión: Esta operación se lleva a cabo en un horno apropiado tanto para el tipo de material a fundir como de la cantidad de metal líquido requerido.
- Diseño de la pieza: Durante esta etapa se debe contemplar aspectos como la contracción por solidificación.
- Elaboración del modelo: Es el objeto que dará al molde la cavidad con la forma deseada. En el caso de los moldes permanentes este paso puede no ser necesario ya que la cavidad del molde se maquina directamente.
- Preparación del material de moldeo: En el caso de los moldes permanentes este paso no es necesario ya que se tiene un molde que servirá para todos los colados y no será necesario hacer uno nuevo en cada colado como en el caso de los moldes de arena.
- Moldeo: El fabricar el molde con las cavidades necesarias. El molde debe tener la forma y dimensiones de la pieza que será producida. Cuando el molde es metálico se le conoce como matriz, la cual tiene una mayor duración y permite lograr mejores acabados superficiales.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

- **Vaciado:** Es la operación de verter el metal líquido dentro del molde.
- **Solidificación:** Se debe al enfriamiento de la pieza. Para el diseño de las fundiciones deberá considerarse la contracción que sufre el metal al solidificarse.
- **Desmoldeo:** Extraer la pieza del molde. En el caso de los moldes permanentes retirar la pieza de la matriz puede ser una limitante en cuanto a la forma de la pieza que se va a producir.
- **Limpieza, maquinado y acabado.** Estas operaciones finales variarán dependiendo del acabado requerido así como del proceso de fundición empleado.

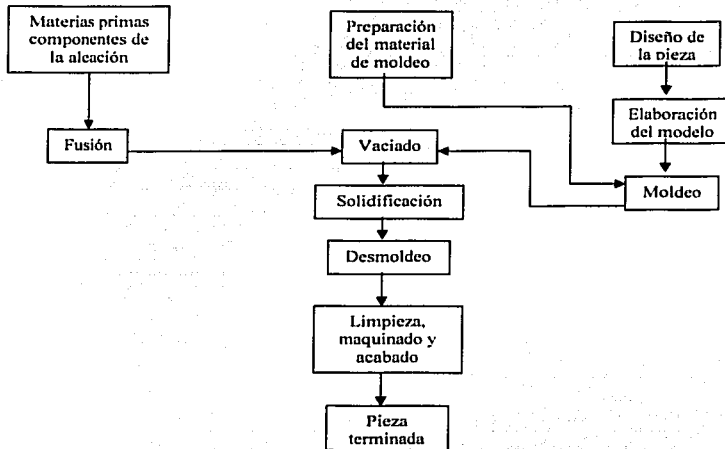


Figura 1.1 Etapas principales del proceso de fundición [7]

Como ya se había comentado existe una gran variedad de procesos de fundición, los cuales se pueden agrupar según la fuerza que provoca el llenado del molde:

Tabla 1.1 Clasificación de los proceso de fundición de acuerdo con las fuerzas que promueven el llenado del molde [7]

El llenado es por acción de fuerzas adicionales a la gravedad	El llenado es por acción de la fuerza de gravedad
Fundición a baja presión Fundición a presión Fundición centrifugada Fundición prensada	En la mayoría de los casos moldeo con arena

1.1.1 COLADA EN ARENA VERDE

La fundición en arena verde es muy popular por su versatilidad y porque la arena es un material relativamente barato y extraordinariamente adaptable al proceso del moldeo.

La arena de sílice (SiO_2) es la que más comúnmente se usa debido a su alta temperatura de fusión ($1700\text{ }^\circ\text{C}$) y por ser apta para el moldeo.

Adicionalmente se requiere de un agente aglutinante como la arcilla para unir entre sí a las partículas de arena. A la mezcla arena – arcilla se le agrega agua para lograr dicho aglutinamiento y obtener un material plástico que al moldearse muestre una adecuada resistencia mecánica.

A la mezcla de moldeo arena – arcilla – agua se le conoce como arena verde y contiene entre un 3 y 8% de humedad.

Para asegurar la obtención de colados de calidad las mezclas de moldeo deben presentar algunas características:

- Plasticidad. Facilidad para conformarse y reproducir con exactitud la geometría del modelo.

- Resistencia mecánica. Determinada por la cohesión entre los granos. Determina la capacidad del molde por conservar la forma de la cavidad y que la pieza fabricada tenga la geometría requerida. Es importante que el material de moldeo pueda resistir el contacto con el metal líquido sin modificar sus dimensiones apreciablemente.
- Poder refractario. Capacidad de la mezcla de moldeo de soportar el contacto con el metal líquido sin ser sinterizado por éste.
- Permeabilidad. Capacidad de dejar fluir los gases producidos durante el vaciado o del aire contenido previamente en la cavidad.
- Estabilidad física y química. Durante el vaciado la mezcla de moldeo no deberá sufrir transformaciones que alteren las dimensiones de la pieza, ni tampoco despedir subproductos que contaminen a la pieza, al medio ambiente o afecten la salud del fundidor.
- Facilidad de desmoldeo. Una vez que la pieza ha solidificado se requiere que la mezcla de moldeo se pueda separar con facilidad de ésta así como de las paredes de las cajas de moldeo.
- Tamaño de grano. Es un factor muy importante ya que afectará directamente la permeabilidad, plasticidad, poder refractario, y resistencia mecánica.

Entre las desventajas de la colada en arena verde se encuentra la liberación de hidrógeno debido a la humedad de la mezcla de moldeo.

Otra desventaja es que el material que solidifica en los alimentadores, corredores y mazarotas (sistema de alimentación) debe ser cortado de la pieza fundida lo que aumenta el costo de la mano de obra.

1.1.2 COLADA EN MOLDE METÁLICO

Los moldes metálicos se emplean tanto en colados por gravedad como en colados donde se aplican otras fuerzas para el llenado de las cavidades como en el caso de la fundición centrífuga, la fundición a presión o la fundición prensada.

Cuando la colada es en molde metálico y únicamente interviene la fuerza de gravedad al proceso se le conoce como colada en molde permanente.

El colado en un molde metálico da mejor acabado superficial, mayor precisión dimensional e inclusive costos más baratos en algunos casos que el colado en molde de arena.

Una de las ventajas de este método es que los moldes metálicos no se destruyen para extraer la pieza colada, como en los moldes de arena, y pueden usarse una y otra vez.

Los moldes metálicos se separan en 2 o más partes para liberar el colado solidificado y se fijan juntas durante el vaciado y solidificación.

Con respecto a los materiales usados para su manufactura se tienen principalmente aleaciones de hierro colado, o acero, las cuales deben de ser resistentes al calor y a los constantes cambios de temperatura.

El molde metálico debe cubrirse con un material refractario, siendo comunes los que son a base de grafito, para evitar que los colados se peguen al molde además de que promueven la fácil expulsión y prolongan la vida del molde.

El colado en molde metálico se destina principalmente a metales con temperaturas de fusión bajas y los que más comúnmente se funden en esta forma son el plomo, zinc, aluminio, aleaciones de magnesio, ciertos bronce y hierro colado.

Los colados pueden pesar cientos de kilogramos, pero la mayoría pesan menos de 25 kg. Algunos productos típicos obtenidos en molde metálico son: bloques de cilindros de compresor para refrigerador, cabezas de cilindros, bielas de conexión, placas planas de asiento de hierro, machotes de hierro colado para engranes de máquinas lavadoras, pistones automotrices, utensilios de cocina y partes de aluminio de máquinas de escribir [6].

Una característica interesante de los moldes metálicos es que su tasa de enfriamiento es más rápida que en los moldes de arena por lo que la microestructura y propiedades mecánicas se ven favorecidas debido a un tamaño de grano más fino.

Otra ventaja del colado en este tipo de moldes es que se puede adaptar el proceso para automatizarlo total o parcialmente.

El uso de los moldes metálicos ha demostrado su versatilidad y se usan en proceso como el de la *fundición prensada* donde un punzón o dado comprime y forja el metal mientras solidifica.

En el aspecto económico los moldes metálicos tienen un costo alto de fabricación, en comparación con los moldes de arena, entonces su uso es recomendado cuando la cantidad de las piezas a producir justifica la inversión en un molde metálico.

1.1.3 FUNDICIÓN A PRESIÓN

La fundición a presión, también conocida como fundición por inyección, emplea moldes metálicos, a los que en este proceso también se les conoce como dados, los cuales reciben a presión el metal líquido suministrado por una máquina de inyección. Al producto final se le llama colado en dado.

Este proceso se ha encontrado especialmente útil para metales con bajo punto de fusión como el zinc, aluminio, magnesio, cobre, plomo, estaño e inclusive hierro y acero en unos pocos casos [6].

Un automóvil puede tener de 20 a 70 kg de partes coladas a presión. Algunas piezas típicas producidas por este método son: velocímetros, partes de bocinas, cuerpos de carburadores y decoraciones entre otros. También se utiliza en utensilios domésticos, herrajes de cuartos de baño, motores fuera de borda, relojes, joyería y herramientas [6].

Con respecto a los dados, éstos deben ser pesados y resistentes para soportar las grandes cargas impuestas en ellos, por lo que la elección del acero a utilizar es un factor importante.

El acero para un dado depende principalmente del material colado, temperatura de operación y cantidad de piezas producidas, por ejemplo para colados de aleaciones de zinc con una temperatura de operación de 400 a 425 °C son adecuados los aceros ordinarios de baja aleación con tratamiento térmico.

Los aceros para herramientas y trabajo en caliente (con alto contenido de níquel, cromo y/o tungsteno) se recomiendan para temperaturas más altas y grandes cantidades de colado.

Muchos dados se enfrían con agua para acelerar la solidificación. Después de que el metal se ha solidificado el dado se abre y la pieza se expulsa con punzones accionados por un mecanismo.

El metal que entra a presión se comprime en todas las irregularidades del molde y la presión se mantiene mientras el metal solidifica para asegurar que la densidad de la pieza sea homogénea.

Debido a la turbulencia con la que entra el metal líquido y el atrapamiento de aire se tiene con frecuencia el problema de la porosidad, especialmente en las secciones gruesas.

También debido a la alta presión del metal líquido éste penetra en los claros alrededor de los corazones, punzones de extracción o a través de la línea de partición por lo que suele ser común la formación de rebabas.

La rebaba al igual que el metal excedente en bebederos, corredores, etc., debe eliminarse para terminar un colado, aunque lo más común es que el maquinado para el desbarbado sea mínimo.

Por sus características la fundición a presión se emplea principalmente en la industria de alta producción (de 100 a 800 piezas/hora) [6]. Es común que tengan que hacerse cientos o miles de piezas para pagar la alta inversión en dados además de costear la propia máquina de inyección.

Las máquinas para fundición a presión son costosas y solo se justifican económicamente para altos volúmenes de producción.

1.1.4 FUNDICIÓN CENTRÍFUGA

En este proceso de fundición el metal líquido se vierte en un molde giratorio y debido a la fuerza centrífuga el material es impulsado dentro del molde y forzado a comprimirse contra las paredes del mismo.

El metal fluye con facilidad dentro de las secciones delgadas y los colados obtenidos tienen muy buen acabado superficial reproduciendo de manera exacta los contornos del molde.

Los colados son densos y tienen una estructura de grano fina junto con buenas propiedades físicas. También se tienen menos variaciones direccionales de las propiedades físicas que en los colados estáticos [6].

En este proceso no se requieren compuertas ni bebederos para suministrar una columna de presión por lo que casi pueden eliminarse repercutiendo en un ahorro de material. Se ha encontrado que esto significa un ahorro de hasta 40% y más en metal vertido [6].

Una de las ventajas de este proceso es que casi todos los metales comunes pueden colarse por centrifugación en moldes de metal o cerámicos.

Como muestra de la exactitud dimensional que se puede lograr con este proceso, hay tubos de acero inoxidable de 5 metros de largo, que se utilizan en aceleradores de protones, que se cuelan por centrifugación con una desviación máxima en la superficie interior de 0.25 mm sobre el largo del tubo [6].

1.1.5 FUNDICIÓN A BAJA PRESIÓN

Dentro de un crisol cerrado hay dos tubos verticales, por uno se aplica presión mediante un gas y por el otro el metal líquido asciende por consecuencia de la presión aplicada dentro del crisol. El metal líquido llega hasta un molde fuera del crisol donde posteriormente solidificará.

Tanto el metal dentro del crisol como del contenido en el tubo que lo transporta al molde se mantiene líquido ya que se encuentra dentro de un horno.

El metal se enfría en el molde hasta el tubo y solidifica mientras se sostiene la presión dentro del crisol. Al eliminar la presión el metal todavía fundido en el tubo regresa al crisol.

Este proceso se usa principalmente para colar aluminio en moldes de yeso, hierro colado y acero.

El colado a baja presión se encuentra en una etapa intermedia entre el colado hidrostático (por gravedad) y el colado de alta presión en dado, tanto por el tamaño como por las características de los colados.

Con este proceso se obtienen secciones moderadamente delgadas y exactitud intermedia al igual que el acabado en la superficie, densidad y detalle.

Los costos del equipo y dado y las velocidades de producción están a la mitad entre el colado hidrostático y el colado de alta presión [6].

1.1.6 FUNDICIÓN AL VACÍO

Esta es una variante del proceso de fundición a baja presión. El metal se impulsa hacia arriba desde el crisol por la presión atmosférica conforme se hace vacío en el molde.

Una de las grandes ventajas del colado al vacío es que se extrae el aire del molde y la porosidad es baja y el acabado superficial es bueno, además de que debido a la carencia de aire en el dado el enfriamiento es rápido.

1.1.7 FUNDICIÓN A LA CERA PERDIDA

Este proceso, también se conoce como colado por inversión o colado de precisión, utiliza un modelo desechable de cera o plástico y se usa principalmente para producir pequeñas piezas fundidas de precisión.

Primero se hace una réplica en cera de la parte que se desea fundir y se vierte una mezcla fraguante alrededor de esta réplica obteniéndose un molde. Después de que ha secado dicha

mezcla se calienta el molde para derretir y eliminar la cera y se aprovecha para precalentar el molde.

Luego se vierte el metal líquido en la cavidad y por último cuando el metal ha solidificado se rompe el molde y se cortan o esmerilan bebederos e irregularidades.

El material de moldeo es principalmente una arena refractaria de sílice con un aglutinante químico como el silicato de sodio para formar un lodo [6].

Un método alterno es sumergir el modelo en una serie de lodos para acumular una cáscara en capas aproximadamente de 3 a 6 mm de espesor de granos sucesivamente más gruesos.

Los granos finos en la superficie interior del molde imparten un acabado liso en la superficie del colado.

Con esta variante no se necesitan cajas de moldeo y la cáscara delgada puede secarse en media hora o menos en comparación con horas para un molde completo [6].

El colado a la cera perdida tiene una ventaja en las tolerancias dimensionales y apariencia ya que pueden eliminarse la conicidad y líneas de partición de los moldes.

La fundición a la cera perdida se usa para obtener tolerancias estrechas, detalles finos y secciones delgadas. Muchas clases de piezas se cuelan por este método, la mayoría pesa desde algunos gramos hasta 5 kg, pero se han hecho algunas que pesan hasta 70 kg, y con secciones desde 0.75 hasta 1.5 mm siendo poco frecuentes espesores mayores a los 25 mm [6].

Este proceso se ha usado para rellenos dentales, instrumentos quirúrgicos, joyería, aspas, pernos, piezas para equipos de precisión, etc.

1.1.8 FUNDICIÓN POR SALPICADO

El metal fundido se vierte en un molde de metal. Después de que ha solidificado la cáscara (superficie en contacto con las paredes del molde), el molde se voltea para que salga el metal todavía líquido debajo de la cáscara.

A la cáscara delgada que queda se le llama colado salpicado y de esta forma se hacen juguetes y adornos de zinc, plomo o aleaciones de estaño.

Los costos de los dados son relativamente bajos para los colados salpicados y esta es una ventaja para producción de pequeñas cantidades.

1.2 LA FUNDICIÓN DEL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES

La mayoría de los metales no ferrosos y sus aleaciones se oxidan, absorben gases y forman escoria con facilidad cuando se funden.

En el caso particular del aluminio y sus aleaciones tienen una tendencia marcada para absorber hidrógeno cuando se calientan. Este gas se libera durante el enfriamiento y provoca pinchaduras y porosidad en los colados.

Por lo anterior debe evitarse la exposición a un medio promotor de hidrógeno, como pudiera ser el vapor de agua. Por lo mismo es importante que los materiales y herramientas que se usen durante la fundición estén limpios y secos.

Adicionalmente se tiene que el aluminio fundido reacciona con facilidad con el oxígeno y se forma una película en la superficie.

Afortunadamente la escoria sirve como un buen blindaje que evita la absorción de hidrógeno si no se rompe la capa [6]. Pero la escoria excesiva puede mezclarse con el metal, en particular si se agita y aparece como defecto en el colado final.

Tanto la cantidad de oxidación y la tendencia de absorber hidrógeno aumenta con la temperatura y el tiempo.

Sabiendo entonces cómo es que se comporta el aluminio cuando se funde es que se deben de seguir una serie de prácticas a fin de preservar la pureza y obtener buenos colados:

1. La temperatura del metal debe ser lo suficientemente alta para que el fluido se vierta con facilidad y rapidez.
2. El aluminio no debe calentarse más de 50°C arriba de la temperatura necesaria para el vertido. La temperatura excesiva provoca granos gruesos en los colados [6] lo que puede afectar las propiedades mecánicas. La temperatura se puede verificar con un pirómetro de inmersión.
3. El tiempo de fusión debe ser lo más corto y con la menor agitación posible.
4. El vertido debe hacerse en forma continua y a una velocidad uniforme hasta que el molde se llene para evitar que la escoria se asiente.

Normalmente el aluminio no requiere mucho fundente para protección debido a su película de óxido, pero suelen usarse fundentes sólidos que contengan cloruros de aluminio o zinc para secar la escoria y facilitar el desnatado del metal.

También es una práctica común que para reducir el gas u óxido en el metal se introducen burbujas de cloro o nitrógeno a través del metal fundido. Para eliminar el gas de la fundición del aluminio existen otros métodos que se comentarán en el apartado 1.4.9.

1.3 HORNOS COMÚNMENTE USADOS EN LA FUNDICIÓN DE ALUMINIO

La fundición del aluminio y sus aleaciones puede hacerse en casi todos los tipos de hornos pero dependiendo de aspectos como el volumen de piezas a producir y el tamaño de los colados es que debe elegirse la mejor opción en cuanto a hornos se refiere.

Primeramente podemos clasificar a los hornos de acuerdo con la fuente de energía que suministra el calor en:

- a) Hornos de combustible: de Crisol.
- b) Hornos eléctricos: de resistencia eléctrica e inducción.

Con respecto a los primeros éstos queman algún tipo de combustible fósil (líquido o gaseoso principalmente) lo que tiene el inconveniente de generar un ambiente de trabajo muy caluroso, humo y ruido, además de que se necesita una chimenea y dependiendo de las reglamentaciones ambientales locales pudiera necesitarse equipo recolector de humo y cenizas.

Por eso es cada vez más frecuente el uso de hornos eléctricos como los de inducción por razones de conveniencia, facilidad de operación y menos problemas ambientales.

Además la generación de calor por medio de la electricidad tiene otras ventajas como:

- 1) Precisión en el control del desarrollo de calor y su distribución.
- 2) El desarrollo del calor es independiente de la naturaleza de los gases que rodean la carga. Esto implica que la atmósfera puede seleccionarse a voluntad dependiendo de la naturaleza de la carga. Esta libertad es con frecuencia la principal razón para usar hornos eléctricos.

Pero también hay que tener en cuenta que los hornos eléctricos modernos suelen tener controles sofisticados y su servicio es costoso, además de que un horno eléctrico puede costar de 10 a 15 veces inicialmente lo que costaría uno que quemara gas o aceite [6].

1.3.1 HORNOS DE CRISOL

En este tipo de hornos un crisol es calentado por los productos de la combustión de algún combustible y se dividen en dos tipos:

- a) Horno de crisol estacionario.
- b) Horno de crisol de volteo.

El horno de crisol estacionario requiere que el crisol se suba y baje de la cámara de calentamiento durante el colado, ver figura 1.2:

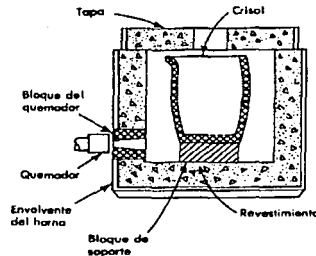


Figura. 1.2 Sección transversal de un horno de crisol del tipo estacionario [6]

Cuando un horno estacionario se instala en el piso se le conoce como horno de foso.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Un horno de crisol de volteo requiere un crisol con una boquilla apropiada para verter el metal cuando se inclina el horno, ver figura 1.3:

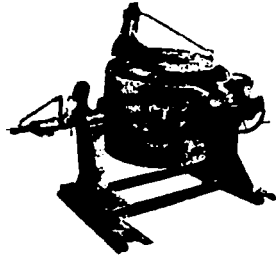


Figura 1.3 Horno de crisol del tipo inclinable [6]

1.3.2 HORNOS DE RESISTENCIA ELÉCTRICA

En estos hornos el calor es debido al paso de corriente eléctrica a través de resistencias eléctricas (unidades de calentamiento) las cuales se encuentran distribuidas en el interior del horno.

El resistor de un horno estándar está constituido por un devanado sinuoso montado sobre las superficies interiores de la cámara de calentamiento. La mayoría de dichos resistores se fabrican con una aleación compuesta de 80% Ni y 20% Cr. [8]

Los hornos estándares de resistores están diseñados para trabajar en el rango de temperaturas de 550 a 1200 °C principalmente [8].

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La cámara de calentamiento es un recinto cerrado con un revestimiento interior refractario, una capa circundante de aislamiento térmico y una envolvente exterior de plancha de acero, o para los hornos grandes una capa exterior de ladrillo o losa.

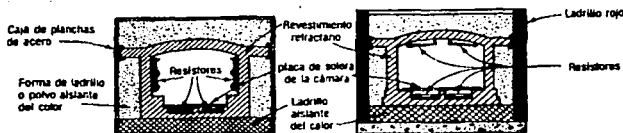


Figura 1.4 Cámara de calentamiento con resistores en las paredes laterales y en el hogar (izquierda). Cámara de calentamiento con resistores en el techo y hogar [8]

Con respecto a la corriente eléctrica utilizada los hornos pequeños se proyectan ordinariamente para 110 V, los medianos para 220 V y los mayores para 440 V [8].

En la práctica general se usan hornos monofásicos hasta 25 o 30 KW y trifásicos para potencias nominales mayores [8].

1.3.3 HORNOS DE INDUCCIÓN

Los hornos de inducción emplean el principio del transformador. El circuito de alto voltaje se acopla con el de bajo sin conectar directamente ambos circuitos. El elemento responsable de este acoplamiento es el campo magnético.

El calentamiento por inducción emplea la propiedad del campo magnético que permite que el calor sea transferido sin contacto directo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

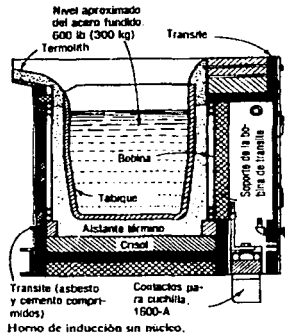
La superficie de la carga (material a fundir) se ve expuesta a un flujo magnético alterno lo que induce corrientes eléctricas que circulan por la masa de la carga y que producen su calentamiento. Por eso a este método de fundición también se le conoce como calentamiento por corrientes parásitas.

Por lo anterior se concluye que prácticamente cualquier metal que conduzca corriente eléctrica puede fundirse en un horno de inducción.

Básicamente existen dos tipos de hornos de inducción para fundir metales:

- a) Hornos de inducción sin núcleo.
- b) Hornos de inducción con núcleo.

Un horno del primer tipo consiste en un crisol refractario envuelto por una bobina de cobre refrigerada con agua, por la cual se hace pasar una corriente eléctrica de alta frecuencia, y un bastidor apoyado sobre soportes dispuestos de tal manera que permiten la inclinación del crisol para la colada, fig. 1.5



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 1.5 Horno de inducción sin núcleo [8]

La bobina actúa como el circuito primario de un transformador y la carga es el circuito secundario.

En el horno de inducción con núcleo se tienen unos componentes que se conocen como inductores los cuales son transformadores con núcleo de hierro o placas de acero y alambre enrollado alrededor y este conjunto actúa como el circuito primario. La bobina del inductor se protege con flujo de aire de enfriamiento, fig. 1.6

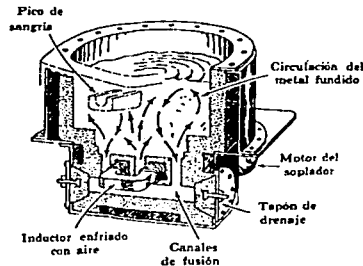


Figura 1.6 Sección transversal de un horno de inducción [9]

El circuito secundario está formado por un canal lleno del metal líquido en el interior del horno. Dicho canal de metal fundido actúa como anillo de corto circuito alrededor del transformador en la cámara de fusión.

En el metal contenido en el canal mencionado anteriormente se induce una corriente por el efecto del campo magnético fluctuante lo que produce su calentamiento y fundición.

En este tipo de hornos se suelen usar frecuencias menores a las usadas en los hornos de inducción sin núcleo por lo que también se le conoce como horno de baja frecuencia y a los segundos como hornos de alta frecuencia.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En los hornos de inducción con núcleo de acuerdo a la capacidad de fusión deseada se pueden colocar uno, dos o tres inductores en la envolvente del horno.

Los hornos de inducción con núcleo se usan generalmente para metales no ferrosos, como aluminio, cobre y zinc, y normalmente sirven como hornos de depósito para alimentar máquinas de moldeo por inyección. Mientras que los hornos de inducción sin núcleo se emplean para materiales ferrosos.

El horno de inducción con núcleo es tal vez el horno más eficaz ya que alcanza una eficiencia en el uso de la potencia del 95 al 98% [8].

1.3.4 ATMÓSFERAS DE FUNDICIÓN

La mezcla del aire y los gases desprendidos de la carga constituyen una atmósfera natural. Este tipo de atmósfera se emplea cuando no sea inconveniente la prolongada acción del oxígeno sobre la carga durante su calentamiento y fundición.

Pero también existen las atmósferas artificiales. En este tipo de atmósferas el objetivo es la eliminación del oxígeno (aire) de la cámara de calentamiento, sustituyéndolo por algún otro gas o mezcla de gases.

La mezcla de gases para una atmósfera artificial se elige en relación con la actividad química de dicha atmósfera sobre la carga a la temperatura a la que se someterá dicha carga.

Las atmósferas artificiales se dividen en:

- a) **Atmósferas activas o de proceso.** Cuando se desea una acción química definida, como la reducción de cualquier óxido metálico presente en la carga.

- b) **Atmósferas inactivas o protectoras.** Cuando se necesita que la atmósfera sea químicamente inactiva y que proteja contra la formación de óxidos o la reducción de algunos óxidos presentes que se desean dejar en la carga.

1.4 SOLIDIFICACIÓN DE FUNDICIONES

Para el diseño eficiente de una pieza colada se debe tener en cuenta las características de solidificación del metal con el que se fabricará la pieza y la contracción que experimentará durante su enfriamiento.

Un metal líquido se solidifica al enfriarse por debajo de su temperatura de solidificación. Las estructuras producidas durante esta etapa afectarán las propiedades mecánicas por eso es que conviene controlar la forma y el tamaño de los granos para obtener mejoras en las propiedades mecánicas de las piezas.

Durante la solidificación los átomos se arreglan en estructuras cristalinas que son la base de construcción de la estructura de la fundición. La solidificación requiere de dos pasos que son nucleación y crecimiento.

La nucleación ocurre cuando se forma una pequeña porción sólida dentro del líquido y el crecimiento del núcleo ocurre cuando los átomos del líquido se van uniendo al sólido hasta que se acabe el líquido.

1.4.1 REDUCCIÓN VOLUMÉTRICA EN FUNDICIONES

Cuando los metales o aleaciones fundidos se enfrían y solidifican siempre se presenta una contracción en su volumen (salvo la notable excepción del bismuto y alguna de sus aleaciones y del hierro gris) [10].

La reducción del volumen acontece en 3 etapas:

- 1) Contracción del metal líquido: Conforme este se enfría a la temperatura de solidificación.
- 2) Contracción durante la solidificación: Están presentes fases sólidas y líquidas y por motivo del enfriamiento continuo sigue habiendo reducción volumétrica.
- 3) Contracción del sólido: Mientras la pieza ya completamente sólida se enfría a la temperatura ambiente.

Debido a lo anterior es que debe considerarse una cantidad extra de metal líquido a todo momento durante la solidificación para alimentar los espacios producidos durante las dos primeras contracciones (líquido y solidificación), de otra forma se formarían cavidades (rechupes) en las piezas.

La contracción del sólido resulta en una pieza ligeramente más pequeña que la cavidad del molde por lo que los modelos deberán ser ligeramente más grandes que la pieza deseada.

1.4.2 SOLIDIFICACIÓN DEL ALUMINIO PURO

Esencialmente los metales puros, o de muy baja aleación, solidifican en la cavidad de un molde formando una capa sólida que crece progresivamente va avanzando desde el exterior hasta el interior de la pieza hasta que la fundición completa es sólida.

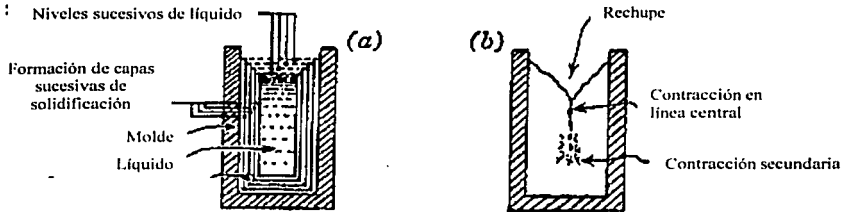


Figura 1.7 (a) Solidificación de un metal puro, (b) Zona central de baja densidad [10]

En la parte central de la pieza es común encontrar una zona de baja densidad que se conoce como línea central de encogimiento. Para reducir esa área de baja densidad se implementan alimentadores (mazarotas) que son depósitos adicionales de metal fundido que alimentarán todas las cavidades formadas durante la solidificación.

Pero solo en los metales extremadamente puros o de muy baja aleación se tiene una fina pared como interfase entre la capa de solidificación y el metal líquido, en el caso de las aleaciones la forma de solidificación es distinta.

1.4.3 SOLIDIFICACIÓN DE ALEACIONES

Cuando están presentes impurezas o elementos de aleación, estos tienden a ser rechazados por el metal solidificado hacia la interfase líquido - sólido [10].

Los elementos rechazados a la interfase sólido - líquido disminuyen el punto de fusión del líquido adyacente a la pared de enfriamiento y tienden a inhibir la solidificación [10].

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Entonces el enfriamiento y solidificación continúan a través del crecimiento de dendritas en el líquido no afectado por las impurezas (o elementos aleantes), con el resultado de que la interfase líquido - sólido se vuelve dentada o como una especie de cristales con la forma de pinos dentro del líquido. En los metales muy puros las dendritas no son muy sobresalientes.

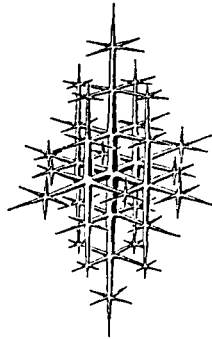


Figura 1.8 Crecimiento dendrítico [10]

1.4.4 CRECIMIENTO DENDRÍTICO

El siguiente esquema representa el crecimiento de las dendritas en el seno del metal fundido (para esta ejemplificación se muestran datos de una aleación de hierro - carbono pero los principios explicados a continuación son válidos para cualquier aleación).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

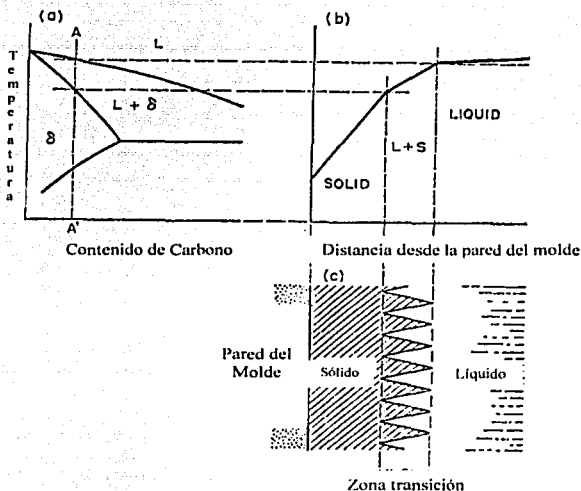


Figura 1.9 Solidificación de una aleación [10]

En la parte (a) del esquema está representada la porción izquierda superior de un diagrama de fase hierro - carbono. La línea AA' representa una composición de un acero con 0.05% de carbono.

Si las temperaturas en una fundición de acero son medidas en un tiempo particular durante la solidificación, se obtiene una distribución de las temperaturas como la que se muestra en el esquema (b).

Las porciones centrales de la fundición están por encima de la temperatura del *liquidus* y por supuesto están fundidas. La capa exterior de la fundición está por debajo de la temperatura de *sólidus* y por lo tanto es una zona sólida.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Entre estas dos zonas (sólido y líquido) existe una región estrecha donde la temperatura está entre *sólidus* y *liquidus*, en esta zona existe tanto líquido como sólido.

En esta zona de interfase líquido - sólido se forman las dendritas como se muestra esquemáticamente en (c).

La zona de interfase de un acero de bajo carbono es demasiado estrecha, este tipo de aceros solidifica de una manera semejante a los metales puros. Conforme el contenido de carbono es aumentado la zona de interfase es mayor y la solidificación es menos parecida a la de un metal puro.

En aceros de alto contenido de carbono, las dendritas pueden alcanzar el centro de la fundición antes de que se forme una capa sólida apreciable [10].

El anterior fenómeno puede explicarse con la ayuda de la figura 1.9. La amplitud de la zona de interfase de una fundición en solidificación depende del rango de solidificación (temperatura entre *liquidus* y *sólidus*).

Aleaciones que solidifican sobre un largo rango de temperaturas tienden a tener una zona de interfase más amplia [10].

Así como el rango de solidificación influye en la amplitud de la zona de interfase, también el gradiente de temperaturas juega un papel importante, por ejemplo, se puede alterar el gradiente de temperaturas dependiendo de la temperatura y material del molde. El efecto de un molde metálico es la reducción de la zona de interfase [10].

La mayoría de las aleaciones de fundición, distintas a las de acero, solidifican con zonas de interfase inclusive mayores que las del acero con alto contenido de carbono. Por ejemplo, algunas aleaciones de aluminio o magnesio llegan a solidificar (en moldes de arena) sin llegar a formar una capa de solidificación apreciable.

En aleaciones de aluminio las porciones centrales de una fundición son frecuentemente mayores al 90% de sólido antes de que la superficie esté completamente solidificada [10].

En la mayoría de las aleaciones la solidificación se da entre un rango de temperaturas y se forma una interfase entre el estado sólido y líquido donde conviven dendritas sólidas con líquido circundante.

En las etapas finales de la solidificación las dendritas alcanzan el líquido remanente y termina el crecimiento de estas, se entrelazan y empiezan a aumentar de espesor completándose así la solidificación [4].

1.4.5 POROSIDAD INTERDENDRÍTICA

Durante la formación de las dendritas se forman depósitos de metal líquido que queda atrapado entre las dendritas y entre sus ramas durante las etapas finales de la solidificación.

Si no hubiera canales y metal líquido para llenar estos espacios interdendríticos se formarían pequeños poros aislados a lo largo de la fundición.

La siguiente figura muestra la contracción durante la solidificación del aluminio puro y de una aleación de aluminio con 7% de silicio.

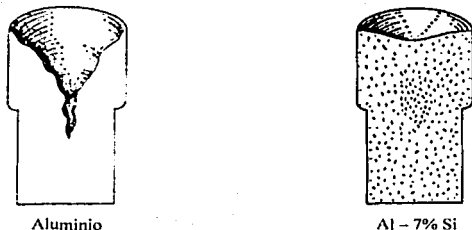


Figura 1.10 Contracción de fundición de aluminio puro (izq.) y porosidad interdendrítica aleación aluminio (der.) [10]

En el caso del aluminio puro se tiene una notable contracción ya que la contracción volumétrica para este metal puro es del orden del 6.6% [10].

La aleación de aluminio con 7% de silicio solidifica con una zona de interfase muy amplia (crecimiento dendrítico pronunciado). En este caso la reducción volumétrica total es muy baja (menor que la del aluminio puro) pero la fundición contiene contracciones interdendríticas (poros) que se pueden observar en una sección pulida de la fundición.

La porosidad interdendrítica también se presenta cuando el metal se enfría demasiado rápido y durante la solidificación el metal fundido no puede alimentar los espacios interdendríticos.

Debido a la contracción (rechupe) que acompaña al enfriamiento estos espacios permanecen como cavidades (porosidad) en el contorno de las dendritas sólidas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1.4.6 SEGREGACIÓN DE IMPUREZAS

Las primeras dendritas que se forman son casi de metal puro, esto hace que las impurezas se concentren en el líquido restante progresivamente y por lo tanto el metal que solidifica al final contenga el mayor porcentaje de impurezas.

Dichas impurezas se localizan en los extremos de los cristales o bien se sitúan entre las ramas dendríticas [4].

1.4.7 ESTRUCTURA DE GRANO

Cuando un metal fundido es vertido en un molde frío, la velocidad inicial de extracción de calor es muy alta, el líquido cercano a las paredes del molde es a menudo enfriado por debajo de su punto de solidificación (subenfriamiento).

Resultado de lo anterior es que se forme una estrecha zona superficial a la que se le conoce como zona de enfriamiento (o zona enfriada) en la que se forman muchas dendritas equiaxiales de tamaño pequeño.

Después del choque térmico inicial, aquellas dendritas con la orientación más favorable podrán crecer perpendicularmente a las paredes del molde para formar dendritas alargadas o mejor conocidas como columnares.

En el caso de las dendritas columnares el tamaño de grano aumenta con la distancia desde la pared del molde [9].

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Los metales puros, o en general metales que solidifican con una zona de interfase muy estrecha tendrán solamente estos dos tipos de granos: De enfriamiento y columnares, ver figura 1.11

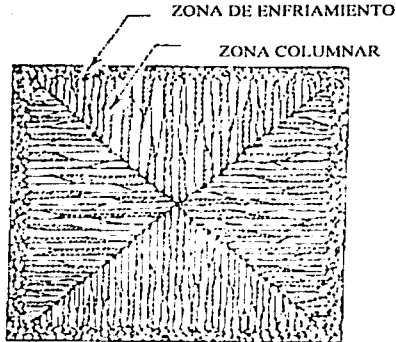


Figura 1.11 Estructura característica de un metal puro o casi puro [10]

Metales que solidifican con una mayor zona de interfase tienden a nuclear nuevos granos durante las etapas terminales de solidificación, en la región donde coexisten líquido y sólido.

Los nuevos granos que se forman son equiaxiales y la región donde se forman se le conoce como zona equiaxial, ver figura 1.12. Este esquema pudiera representar a una aleación como un acero de medio carbono donde se muestran los tres tipos de granos: de enfriamiento rápido, columnares, equiaxiales.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

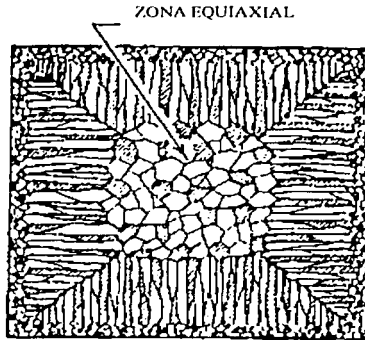


Figura 1.12 Estructura intermedia con los tres tipos de granos [10]

Los granos equiaxiales son casi esféricos y estos solo pueden crecer cuando el líquido en el centro del molde (zona equiaxial) se a enfriado por debajo de su temperatura de *liquidus* [9].

En la mayoría de las aleaciones no ferrosas la zona de interfase es suficientemente amplia por lo que una zona columnar es raramente observada, pero a su vez se encuentran finos granos equiaxiales que tienden a formarse a lo largo de toda la fundición [10].

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

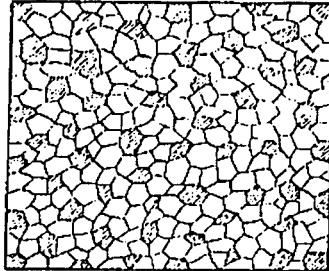
ESTRUCTURA EQUIAXIAL

Figura 1.13 Estructura característica de metales que solidifican con una zona de interfase amplia [10]

Ya vimos que en las fundiciones se pueden presentar las siguientes zonas: De enfriamiento, granos columnares, granos equiaxiales. Pero es importante mencionar que no todas estas estructuras están presentes en todas las fundiciones.

Su presencia o ausencia depende de la composición de la aleación, la velocidad de enfriamiento entre otros factores.

1.4.8 GASES EN METALES FUNDIDOS

El efecto de los gases en metales fundidos puede describirse muy fácilmente. Los gases son casi universalmente más solubles en metales líquidos que en metales sólidos [10].

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Conforme el metal líquido se enfría, y particularmente cuando solidifica, los gases disueltos tienden a ser expelidos de la solución y forman entonces burbujas.

Las burbujas de gas pueden adoptar diversas formas para dar lugar a cavidades alargadas, pequeños agujeros o microporosidad cuya magnitud dependerá de la cantidad de gas presente.

La porosidad por gases (en todas sus formas) afecta las propiedades mecánicas y la apariencia de la pieza [10], por lo que es necesario asegurarse en la medida de lo posible que el metal fundido esté libre de gases disueltos antes de ser vertido.

El gas disuelto en el metal no siempre está en forma de molécula (como H_2 , CO_2 , H_2O , etc.), sino como elementos químicos (como H, O, C, etc.).

Durante la solidificación, los elementos se pueden unir para formar gases moleculares y entonces formar hoyos o porosidad por gas.

En el caso de los gases diatómicos como H_2 , O_2 o N_2 , la cantidad de estos gases que se puede disolver en un metal líquido a cualquier temperatura puede ser expresada por la ecuación [10]:

$$V = K (P)^{1/2}$$

donde: V es el volumen del gas diatómico disuelto, K es una constante y P es la presión arriba y alrededor del metal.

La siguiente tabla muestra los principales elementos que se disuelven en algunas fundiciones comunes de metales, o sus aleaciones, y que se combinan para formar gases.

Tabla 1.2 Elementos disueltos en algunos metales, y sus aleaciones, y formación de gases durante la solidificación [10]

Metal	Elemento Disuelto	Gas Formado Durante la Solidificación
Mg	H	H ₂
Al	H	H ₂
Cu	H, C, O, S	SO, SO ₂ , H ₂ , H ₂ O, CO, CO ₂
Fe	H, O, N, C	H ₂ O, CO, CO ₂ , N ₂ , H ₂

El vapor de agua, hidrógeno y óxidos de carbono (CO y CO₂) son responsables de la mayoría de los defectos por burbujas en las fundiciones.

El hidrógeno es el más común de los elementos y el que más usualmente ocasiona problemas por gas en la fundición de metales [10], ya que es soluble en todos los metales en mayor o menor grado.

El hidrógeno, al igual que otros gases, es altamente soluble cuando metales, como el aluminio, están en su estado líquido.

Conforme la temperatura del metal decrece también disminuye la solubilidad del gas hasta que se alcanza la temperatura de solidificación. En este punto se produce un cambio discontinuo en la solubilidad de los gases y esta caída repentina en la solubilidad de los gases es la responsable de la porosidad por gas en las fundiciones, ver figura 1.14.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

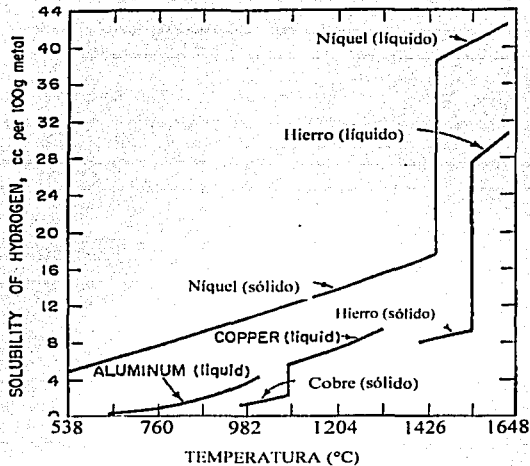


Figura 1.14 Efecto de la temperatura en la solubilidad del hidrógeno en varios metales [10]

Los metales fundidos absorben gases de las siguientes formas:

- 1) En los hornos, de las atmósferas.
- 2) De la humedad del metal a fundir, paredes mojadas en el interior del horno, herramientas mojadas en contacto con el metal, como el cucharón de vertido.
- 3) Por aireación, al verter del horno al cucharón o del cucharón al molde.
- 4) En el molde, debido a una atmósfera húmeda, exceso de humedad o materiales de moldeo volátiles.

De lo anterior se recomiendan los siguientes pasos para reducir la absorción de gases:

- 1) Fundir bajo atmósferas protectoras, sin remover la escoria protectora. Si el control de gases absorbidos es muy estricto se podría practicar la fundición al vacío.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

- 2) Mantener todas las herramientas y aditamentos que estarán en contacto con el metal, secos.
- 3) Fundir y verter a una temperatura tan baja como sea posible para disminuir la solubilidad de gases.
- 4) Manipular (remover, desnatar) el metal tan poco como sea posible.

Los gases en los metales líquidos son siempre un peligro potencial para la persona que efectúa la fundición por lo que, ésta deberá mantener la materia prima, crisoles y demás herramientas limpias y secas y debe fundir los metales bajo escoria o una atmósfera controlada.

De otra forma el metal líquido calentado, que tiende a absorber gases en proporción directa a la temperatura, es inapropiado para ser usado.

1.4.9 SUPRESIÓN DE GASES EN FUNDICIONES

Cuando no es posible prevenir la absorción de gases, se pueden seguir las siguientes estrategias para eliminarlos, o al menos reducirlos, y disminuir su efecto dañino en las fundiciones:

- 1) Remover el o los gases disueltos.
- 2) Remover o aislar uno o más de los elementos que forman los gases.

Un ejemplo del primer método se basa en el hecho de que la solubilidad de los gases disminuye con el enfriamiento, así los gases pueden eliminarse con una secuencia de fusión – enfriamiento - fusión.

Salvo en casos especiales este método es muy costoso y es muy tardado para ser usado normalmente en la práctica.

Otra alternativa para remover los gases disueltos es fundir y verter al vacío, pero también es un método costoso para producir fundiciones libres de gas.

Una variante del desgasificado por vacío es cuando el metal se funde en condiciones normales (presencia de aire) y después se coloca en una cámara de vacío antes de verter el metal para eliminar gases, y posteriormente el vertido se realiza a atmósfera abierta.

Otra estrategia en la eliminación de gases es la del chorro de gas inerte (flushing). En este caso un gas inerte se introduce en el seno del metal fundido. Este es el método más común de remoción de gases.

En el "flushing" el gas inerte es burbujeado dentro del metal fundido y los gases disueltos en el metal migran a las burbujas de gas inerte donde es colectado y sacado del metal líquido a la superficie.

El gas inerte simplemente es conducido desde los tanques de almacenamiento por tubos de grafito directamente hacia el interior del metal fundido.

Gases como el cloro, nitrógeno o argón son usados en la práctica para el desgasado de metales, especialmente en aleaciones de aluminio y magnesio [10].

Algunas veces también se usan desgasificadores sólidos como fuentes del gas inerte. Aquí un compuesto sólido, como C_2Cl_6 , colocado en el fondo del depósito del metal fundido, se descompone para proporcionar un flujo de burbujas de gas inerte.

La siguiente figura ilustra algunas de las técnicas de desgasificación descritas anteriormente:

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

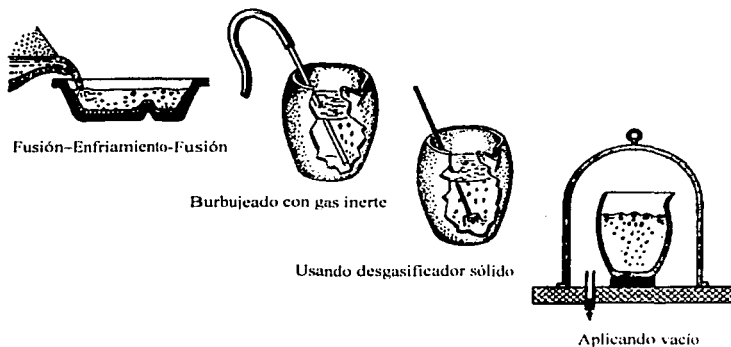


Figura 1.15 Algunos métodos para desgasificar metales [10]

La porosidad por gases también puede ser reducida removiendo o aislando uno o más de los componentes del gas dañino. Por ejemplo adicionando un compuesto de fósforo - cobre a aleaciones de cobre se captura el oxígeno disuelto.

Lo anterior se logra gracias a que el fósforo reacciona con el oxígeno disuelto para formar un sólido (P_2O_5) que flota fuera del seno del metal fundido (como escoria) y previene la combinación del oxígeno con el hidrógeno disuelto para formar vapor de agua [10].

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.1 ENSAYOS Y PROPIEDADES MECÁNICAS

Para medir la forma en que un material resiste una fuerza aplicada existen varios ensayos. Los resultados de estas pruebas o ensayos serán las propiedades mecánicas de dicho material.

Algunos de los ensayos que se utilizan para determinar las propiedades mecánicas de los materiales son:

- Ensayo de tensión: Mide la respuesta de un material a una fuerza uniaxial aplicada lentamente. De ahí se obtiene el esfuerzo de cedencia, la resistencia a la tensión, el módulo de elasticidad y la ductilidad del material.
- Ensayo de dureza: Mide la resistencia de un material a la penetración causada por un objeto (indentador). Los ensayos de dureza comunes son el Brinell, Rockwell, Vickers y Knoop.
- Ensayo de flexión: Aplicación de una fuerza en el centro de una barra soportada en cada uno de sus extremos para determinar la resistencia del material a una carga estática o aplicada lentamente.
- Ensayo de impacto: Mide la capacidad de un material para absorber la aplicación súbita de una carga sin romperse. El ensayo Charpy es muy común.
- Ensayo de fatiga: Mide la resistencia de un material a la fatiga, cuando se aplica de manera cíclica un esfuerzo por debajo del esfuerzo de cedencia.
- Ensayo de termofluencia: Mide la resistencia de un material en función de deformación y falla cuando está expuesto a una temperatura elevada y sujeto a una carga estática por debajo de su esfuerzo de cedencia.
- Ensayo de tenacidad a la fractura.

A continuación se abarcará en mayor detalle los ensayos de tensión y dureza por ser los que se efectuaron en la realización de este trabajo.

2.2 ENSAYO DE TENSIÓN

El ensayo de tensión mide la resistencia de un material a una fuerza estática o gradualmente aplicada, ver figura 2.1

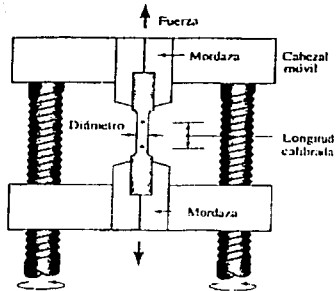


Figura 2.1 Mediante un cabezal móvil en la prueba de tensión se aplica una fuerza unidireccional a una probeta [11]

La probeta se coloca en la máquina de pruebas y se le aplica una fuerza F que se conoce como carga.

Para medir el alargamiento del material, causado por la aplicación de la fuerza, en la longitud calibrada de la probeta se utiliza un extensómetro.

La versatilidad de este ensayo es que para un material dado los resultados de un solo ensayo son aplicables a todo tamaño y forma de muestras si se convierte la fuerza en esfuerzo y la distancia entre marcas calibradas en deformación [11].

El esfuerzo y la deformación ingenieriles se definen por:

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

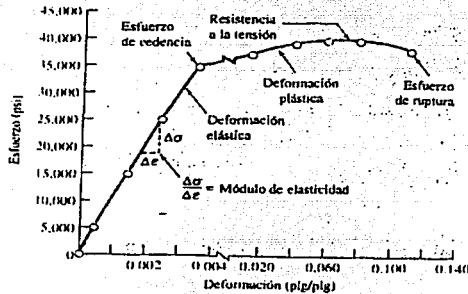
$$\text{Esfuerzo ingenieril} = \sigma = F/A_0$$

$$\text{Deformación ingenieril} = \epsilon = (l_f - l_0)/l_0$$

donde:

- F = Fuerza uniaxial aplicada a la probeta.
- A₀ = Área original de la sección transversal de la probeta antes de iniciarse el ensayo.
- l_f = Distancia entre las marcas calibradas después de haber aplicado la fuerza.
- l₀ = Distancia original entre las marcas calibradas.

Conociendo el esfuerzo aplicado y la deformación obtenida a diferentes intervalos de tiempo durante el ensayo de tensión se puede obtener la curva esfuerzo – deformación.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 2.2 Curva esfuerzo - deformación correspondiente a una aleación de aluminio [11]

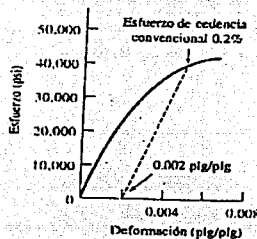
A partir de un ensayo de tensión se puede obtener información relacionada con la resistencia, rigidez y ductilidad de un material [11].

2.2.1 ESFUERZO DE CEDENCIA

El esfuerzo de cedencia (también se le conoce como límite elástico) es el esfuerzo que apenas comienza a crear una deformación plástica permanente. En los metales es por lo general el esfuerzo requerido para que las dislocaciones se deslicen [11].

El esfuerzo de cedencia es por lo tanto el esfuerzo que divide los comportamientos elástico y plástico del material.

En algunos materiales el esfuerzo al cual el material cambia su comportamiento de elástico a plástico no se detecta fácilmente. en este caso se determina un esfuerzo de cedencia convencional.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 2.3 Determinación del límite elástico convencional al 0.2% de deformación en el hierro fundido gris [11]

El esfuerzo de cedencia convencional se obtiene trazando una línea paralela a la porción de comportamiento elástico de la curva esfuerzo – deformación pero se desplaza 0.002 pul/pul (0.2%) del origen.

El esfuerzo de cedencia convencional de 0.2% es el esfuerzo al cual la anterior línea intersecta la curva esfuerzo – deformación.

2.2.2 RESISTENCIA A LA TENSION

La resistencia a la tensión es el esfuerzo obtenido de la fuerza más alta aplicada en el ensayo de tensión. Es el esfuerzo máximo de la curva esfuerzo – deformación ingenieril.

En muchos materiales dúctiles la deformación no se mantiene uniforme. En cierto momento una región se deforma más que otras y ocurre una reducción local de importancia en la sección recta.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 2.4 Deformación localizada durante el ensayo de tensión de un material dúctil produciendo una región de encuellamiento [11]

Esta región localmente deformada se conoce como zona de estricción (o encuellamiento). Dado que el área de la sección transversal en este punto se hace más pequeña, se requiere una fuerza menor para continuar su deformación, y se reduce el esfuerzo ingenieril, calculado a partir del área original A_0 .

La resistencia a la tensión es el esfuerzo a partir del cual se inicia este encuellamiento o estricción en materiales dúctiles.

2.2.3 MÓDULO DE ELASTICIDAD

El módulo de elasticidad (E), o módulo de Young, es la pendiente de la curva esfuerzo – deformación en su región elástica, este módulo es una variante de la ley de Hooke:

$$E = \sigma / \epsilon$$

El módulo de elasticidad es una medida de la rigidez del material y la rigidez se entiende como una medida cualitativa de la deformación elástica producida en un material. Un material rígido tiene un módulo de elasticidad elevado.

2.2.4 RELACIÓN DE POISSON

La relación de Poisson (μ) relaciona la deformación elástica longitudinal producida por un esfuerzo simple, a tensión o compresión, con la deformación lateral que ocurre simultáneamente, en general la relación de Poisson es de aproximadamente 0.3.

$$\mu = -\epsilon_{\text{lateral}} / \epsilon_{\text{longitudinal}}$$

2.2.5 DUCTILIDAD

La ductilidad se define como la capacidad de un material a deformarse de manera permanente sin romperse cuando se aplica una fuerza. Se puede medir la distancia entre las marcas calibradas en una probeta antes y después del ensayo.

El % de elongación representa la distancia que la probeta se alarga plásticamente antes de la fractura y se define por:

$$\% \text{ de elongación} = ((l_r - l_0) / l_0) \times 100$$

donde:

l_r = La distancia entre las marcas calibradas después de la ruptura del material.

l_0 = Distancia original entre las marcas calibradas.

Un segundo método para medir la ductilidad es calcular el cambio porcentual en el área de la sección transversal en el punto de fractura antes y después del ensayo.

El % de reducción en área expresa el adelgazamiento sufrido por el material durante el ensayo de tensión:

$$\% \text{ de reducción en área} = ((A_0 - A_f) / A_0) \times 100$$

donde:

A_0 = Área original de la sección transversal de la probeta antes de iniciarse el ensayo.

A_f = Área de la sección transversal en la superficie de la fractura.

2.3 ENSAYO DE DUREZA

El ensayo de dureza mide la resistencia de la superficie de un material a la penetración por un objeto duro (indentador).

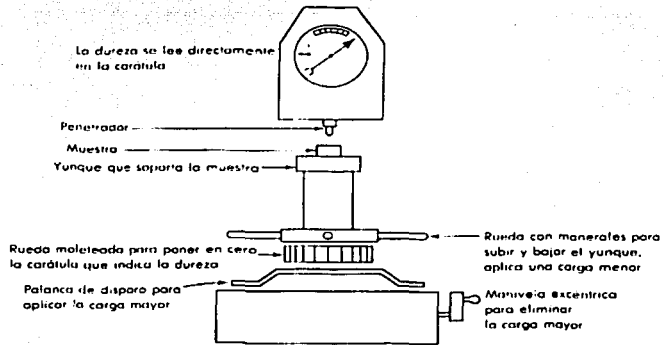


Figura 2.5 Diagrama esquemático de un probador de dureza Rockwell. Cuelgan atrás de la máquina pesos no mostrados [6]

Se han inventado varias pruebas para medir la dureza como los ensayos Brinell, Rockwell, Vickers y Knoop, pero los dos primeros son los de uso más común.

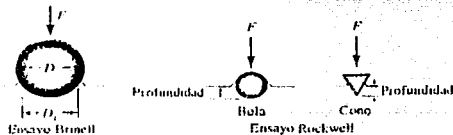


Figura 2.6 Ensayos de dureza Brinell y Rockwell [11]

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.3.1 DUREZA BRINELL

En el ensayo de dureza Brinell una esfera de acero duro (por lo general de 10 mm de diámetro) se oprime sobre la superficie del material a ensayar.

Luego se mide el diámetro de la impresión generada (comúnmente de 2 a 6 mm) y se calcula el número de dureza o índice de dureza Brinell (abreviado por sus siglas en inglés como HIB o BHN) a partir de la ecuación:

$$HB = F / [(\pi/2)(D)(D - (D^2 - D_i^2)^{1/2})]$$

donde:

- F = Carga aplicada (kg).
- D = Diámetro del indentador (mm).
- D_i = Diámetro de impresión (mm).

2.3.2 DUREZA ROCKWELL

El ensayo de dureza Rockwell utiliza una pequeña bola de acero como indentador para materiales blandos y un cono de diamante para materiales más duros.

La profundidad de la penetración es medida automáticamente por el instrumento y se convierte a un índice de dureza Rockwell (HR por sus siglas en inglés).

Se emplean diversas variantes del ensayo Rockwell, como se observa en la tabla 2.1. La escala Rockwell C (HRC) se utiliza para aceros duros, y para el aluminio es común la escala Rockwell F (HRF).

Tabla 2.1 Comparación de ensayos de dureza típicos [11]

Ensayo	Indentador	Carga (kg)	Aplicación
Brinell	Bola de 10 mm	3000	Hierro y aceros fundidos
Brinell	Bola de 10 mm	500	Aleaciones no ferrosas
Rockwell A	Cono de diamante	60	Materiales muy duros
Rockwell B	Bola de 1/16 pul	100	Latón, acero de baja resistencia
Rockwell C	Cono de diamante	150	Acero de alta resistencia
Rockwell D	Cono de diamante	100	Acero de alta resistencia
Rockwell E	Bola de 1/8 pul	100	Materiales muy suaves
Rockwell F	Bola de 1/16 pul	60	Aluminio, materiales suaves
Vickers	Pirámide de diamante	10	Materiales duros
Knoop	Pirámide de diamante	0.5	Todos los materiales

Los ensayos Vickers (HV) y Knoop (HK) son pruebas de microdureza, producen penetraciones tan pequeñas que se requiere de un microscopio para obtener su medición.

2.4 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ALUMINIO

Ya se han explicado las diferentes propiedades mecánicas y los tipos de ensayo necesarios para obtenerlas. En este apartado se mostrarán las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 356 que fue la que se utilizó en esta tesis.

Con respecto a la composición química de la aleación 356 se tiene: 0.25% Cu máximo, 0.20% a 0.45% Mg, 0.35% Mn máximo, 6.5% a 7.5% Si, 0.6% Fe máximo, 0.35% Zn máximo, 0.25% Ti máximo, 0.2% máximo de otros elementos, Al balance [32].

El exceder los anteriores límites de composición química tiene un efecto sobre las propiedades de la aleación 356, por ejemplo, altos contenidos de cobre o níquel disminuyen la ductilidad y resistencia a la corrosión mientras que altos contenidos de hierro disminuyen la resistencia a la tensión y ductilidad [32].

Las aleaciones de aluminio para fundición tienen las siguientes características favorables [32]:

- Buena fluidez para el llenado de secciones delgadas.
- Punto de fusión relativamente bajo comparando con otros metales como el hierro.
- Rápida transferencia de calor del aluminio líquido a hacia el molde, lo que reduce los ciclos de fundición.
- A pesar de que el hidrógeno es altamente soluble en el aluminio líquido, éste puede ser controlado en gran medida con alguna de las técnicas que se vieron en el capítulo anterior.
- Estabilidad química.
- Facilidad para obtener superficies lustrosas.

Es por estas características que la aleación de aluminio 356 ha encontrado uso en partes para sistemas de bombeo en aviones, diversas partes de control, estructurales y accesorios en aviones, rines, pistones y diversas partes automotrices, entre otras aplicaciones [32].

A continuación se mostrarán varias tablas con distintas propiedades del aluminio 356 y en algunas de ellas se pone al aluminio puro como material de referencia.

Tabla 2.2 Propiedades físicas del aluminio 356 y aluminio puro [32]

Tipo Al	Densidad (kg/m ³)	Rango de fundición (°C)	Conductividad térmica a 25°C (cal/cm.s.°C)
Puro*	2713	660.2-660.2	0.57
356	2685	560-615	0.40

* 99.996% Al.

Tabla 2.3 Valores típicos de propiedades a tensión en aluminio 356 y aluminio puro [32]

Tipo Al	Resistencia a la tensión (Mpa)	Esfuerzo de cedencia al 0.2% deformación	Elongación en 50 mm (%)
Puro*	70	40	20
356	164	124	6

* 99.996% Al.

Tabla 2.4 Dureza típica en aluminio 356 [32]

Tipo Al	Dureza Brinell*
356	60

* Indentador de bola con diámetro de 10mm y carga de 500 kgf

Tabla 2.5 Diversas propiedades del aluminio 356 [32]

Relación de Poisson	0.33
Módulo de Elasticidad en Tensión	72.4 GPa
Módulo de elasticidad al Corte	27.2 GPa
Resistencia al Corte	138 MPa
Resistencia a la Fatiga *	55 MPa
Temperatura de <i>Liquidus</i>	615 °C
Temperatura de <i>Solidus</i>	555 °C

* Resistencia para 5×10^8 ciclos con la prueba R.R.Moore de eje rotante.

3.1 METALOGRAFÍA

La metalografía esencialmente es el estudio de las características estructurales o constitución de un metal o aleación en relación con sus propiedades físicas y mecánicas.

Para lograrlo debe prepararse la muestra de material mediante pulido y ataque químico de forma que su estructura puede ser examinada utilizando un microscopio.

En la inspección microscópica de un espécimen preparado adecuadamente se emplean microscopios ópticos con aumentos desde 50X hasta 2000X [12].

Pero también existe una variante de la metalografía conocida como inspección macroscópica de la estructura de un metal y consiste en la observación a simple vista, o con la ayuda de un microscopio de bajo poder o lupas (con menos de 10X) [12].

3.2 INSPECCIÓN MICROSCÓPICA

Con la inspección microscópica se pueden definir características estructurales como tamaño de grano, forma de grano, distribución de fases secundarias, inclusiones no metálicas y segregaciones, características que afectan las propiedades y desempeño de un metal.

Para realizar una inspección microscópica la superficie a ser examinada debe primero prepararse adecuadamente.

La preparación de las muestras es de gran importancia. Una preparación inadecuada puede representar la pérdida de información importante como remover inclusiones, erosionar límites de grano o modificar superficialmente la estructura.

Con respecto a la posible modificación de la estructura de la superficie puede llegarse a una situación donde la estructura que se observa en el microscopio aparecerá diferente a aquella que es verdaderamente representativa y característica del metal [12].

En general el procedimiento para la preparación de especímenes para observación microscópica consiste en:

- 1) Obtener una superficie plana, semipulida para lo cual se lija la muestra en una serie de lijas que van decreciendo en su tamaño de grano.
- 2) Pulido fino sobre uno o más paños para pulido.
- 3) Ataque de la superficie pulida con reactivo que revele la estructura cristalina.

3.2.1 SELECCIÓN DE LA MUESTRA

Las muestras deben provenir del área que sea de interés de la pieza que se está estudiando. Por ejemplo pudiera necesitarse estudiar la causa de la falla de un componente mecánico, entonces la muestra debería de tomarse de la parte afectada de dicho componente.

La muestra debe cortarse a un tamaño fácil de manejar, se recomienda un tamaño de probeta de aproximadamente 2 cm de diámetro (o de 2 cm por lado en el caso de muestras cuadradas) [4].

En el caso de que la muestra sea muy pequeña debe ser montada como más adelante se explica para poderla manejar con mayor facilidad.

3.2.2 MONTAJE

El objetivo del montaje es facilitar el manejo de la muestra. Básicamente hay dos tipos de montaje: 1) en resina autofraguante, 2) en termoplástico.

En el caso de que se use resina autofraguante, se coloca la muestra sobre una superficie plana, luego se coloca alrededor un anillo de plástico con un tamaño acorde al tamaño de la muestra. Por último se agrega la resina autofraguante y esperar a que solidifique.

En el caso de usar un termoplástico como la baquelita, la muestra deberá colocarse en un molde al que se le verterá el termoplástico y se aplicará presión con una prensa, para lograr que las caras del montaje sean paralelas, y calor para que catalice el termoplástico.

3.2.3 DESBASTADO

Antes de empezar el lijado puede ser necesario limar la muestra para eliminar las marcas del corte con segueta, después hay que lavar con agua para eliminar limaduras y evitar que ensucie el papel lija.

Posteriormente la probeta pasa por una serie de lijas que progresivamente van teniendo un menor tamaño de grano con el fin de ir eliminando las rayas dejadas por el papel lija anterior.

Durante el desbastado con el papel lija se debe agregar un flujo continuo de agua que funciona como refrigerante y para eliminar de la lija los residuos del abrasivo y de la misma probeta.

En cada cambio de papel lija se debe lavar la probeta con agua así como girarla 90° para ir eliminando las rayas anteriores.

Esta operación puede hacerse directamente sobre el papel lija acomodado sobre una mesa inclinada o con la ayuda de algún dispositivo mecanizado como bandas desbastadoras o discos giratorios sobre los que se coloca la lija.

3.2.4 PULIDO

El pulido se lleva a cabo en un plato giratorio (pulidora de disco) sobre el que se coloca un paño de pulido. El paño se moja con agua y se agrega el agente pulidor en suspensión, por ejemplo alúmina.

Dependiendo del grado de pulido que se requiera se pueden emplear agentes pulidores con tamaño de partícula progresivamente más pequeña. Para esto deberán emplearse diferentes paños para cada tamaño de partícula del agente pulidor.

El pulido finaliza cuando la probeta, después de ser lavada, se observa y está plana, libre de rayas y la superficie tiene un acabado espejo.

Esta es la condición que debe tener la superficie del espécimen antes de que pueda ser atacado y la estructura metalográfica se revele apropiadamente.

3.2.5 ATAQUE QUÍMICO

Para revelar la estructura cristalina es necesario atacar la probeta con un reactivo adecuado el cual dependerá del tipo de material con el que se esté trabajando.

Pero antes de atacar a la probeta ésta deberá estar limpia y para eso se usa un líquido volátil como la acetona o alcohol con lo que se remueven suciedad y grasa, por lo que una vez limpia la superficie no se debe tocar con los dedos.

Entonces la superficie de la probeta se sumerge en el reactivo y para que el ataque químico sea más efectivo se recomienda agitar la probeta durante varios segundos [4].

Si el ataque fué satisfactorio la superficie se verá ligeramente opaca, pero si la superficie es brillante es posible que se necesite un ataque químico más prolongado.

El tiempo en que la superficie de la probeta estará en contacto con el reactivo dependerá tanto del material usado como del reactivo.

Por último la probeta se lava con agua para eliminar el reactivo excedente y se procede al secado con aire caliente. Éste debe realizarse de manera rápida y uniforme para evitar que se formen manchas en la superficie de la probeta.

3.2.6 MICROSCOPIO METALOGRAFICO

El microscopio metalográfico es similar a cualquier otro en cuanto a sus principios ópticos, pero la gran diferencia en comparación con los que se usan en biología es su forma de iluminación.

Mientras que los microscopios para uso biológico se iluminan con una fuente de luz atrás de la placa con la muestra (la cual es traslúcida), en los microscopios metalúrgicos la fuente de luz debe estar dentro del tubo ya que las muestras son opacas y la imagen se capta por reflexión de la luz.

3.3 INSPECCIÓN MACROSCÓPICA

Con frecuencia se lleva a cabo este tipo de inspección para obtener información de la estructura sin utilizar el microscopio, ya que a simple vista, o con muy pocos aumentos (menos de 10X) [12], se puede tener una idea del tamaño de granos, disposición de granos y nivel de macro - porosidad.

Para realizar un examen macroscópico se debe preparar el espécimen en forma muy similar al empleado para la inspección microscópica:

1. Limado y lijado fino.
2. No es necesario pulir la probeta, o solo ligeramente.
3. Lavado de probeta.
4. Ataque con reactivo. Generalmente estos ataques son más prolongados en comparación con los requeridos para examen microscópico [4].
5. Lavado con agua para eliminar excedentes de reactivo.
6. Secado uniforme con aire caliente.

La observación deberá practicarse en un área bien iluminada para poder revelar con mayor facilidad la información que proporciona la probeta.

3.4 CONSIDERACIONES ESPECIALES PARA LA METALOGRAFÍA DEL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES.

En los puntos anteriores se han tratado aspectos generales de la metalografía, aunque existen algunas consideraciones especiales para el aluminio que se tratarán a continuación.

Las aleaciones de aluminio son muy diversas en cuanto a su composición química y en cuanto a sus durezas, por consiguiente las técnicas requeridas para la preparación metalográfica de las muestras pueden variar.

Por ejemplo, las aleaciones con mayor dureza son en general más fáciles de preparar mientras que las aleaciones suaves de aluminio son por lo general más difícil de pulir mecánicamente debido a: (1) deformación causada durante el corte o el proceso de lijado y/o pulido, (2) Incrustación de las partículas de pulido en la superficie del metal. [31]

Por lo anterior aparte de las prácticas metalográficas que se han desarrollado para todos los metales se han desarrollado técnicas especiales para el aluminio y sus aleaciones y debe tomarse en cuenta además de la dureza de la aleación, el efecto de la temperatura sobre la muestra (generada por el corte, lijado y pulido).

Pueden ocurrir cambios en la microestructura (que pocas veces se aprecian con microscopio óptico pero que se observan con microscopio electrónico) que se producen a temperaturas relativamente bajas (150 a 250 °C) [31], por lo que ha de cuidarse el no sobrecalentar las muestras durante su preparación.

3.4.1 PREPARACIÓN PARA OBSERVACIÓN MACROSCÓPICA.

Las aleaciones de aluminio requieren los mismos principios de preparación para observación macroscópica que la mayoría de los metales [31] aunque se recomienda:

- Observar minuciosamente la superficie a ser examinada antes del ataque con ácido (para revelar la estructura), ya que las superficies de fractura deberán ser preservadas de la abrasión o contaminación.
- Pulir la superficie a ser observada para que después del ataque químico sea posible observar la estructura con mayor detalle. Algunas veces se puede practicar el ataque químico sobre una superficie con cierto grado de rugosidad [31] aunque se necesitarán mayores cantidades de reactivo lo que podría dificultar la observación de la macroestructura.
- Remover contaminantes como aceites de corte u otros contaminantes grasos de la superficie del aluminio antes del ataque químico puede ser de ayuda, aunque no siempre es necesario. La tabla 3.1 muestra algunos reactivos así como métodos de aplicación que son apropiados para preparar muestras para observación macroscópica.
- Enjuagar los residuos del reactivo con agua tibia y aplicar aire seco y limpio para tener la muestra lista para observación.

Tabla 3.1 Reactivos para observación macroscópica de aleaciones de aluminio [31].

Composición del reactivo	Procedimiento de uso	Recomendado para:
10 g NaOH por cada 90 ml de H ₂ O.	Sumergir la muestra de 5-15 min en el reactivo calentado a 60-70°C, enjuagar en agua y secar.	-Aluminio puro comercial. Series 1xxx. -Todas las aleaciones de cobre. Series 2xxx y aleaciones de fundición. -Aleaciones Al-Mn. Series 3xxx. -Aleaciones Al-Mg. Series 5xxx y aleaciones de fundición.

		<ul style="list-style-type: none"> -Aleaciones Al-Mg-Si. Series 6xxx y aleaciones de fundición. -Aleaciones Al-Cu-Mg-Zn. Series 7xxx y aleaciones de fundición.
45 ml HCl, 15 ml HNO ₃ , 15 ml HF (48%), 25 ml H ₂ O.	Sumergir la muestra de 10-15 s, enjuagar en agua tibia, examinar si se reveló adecuadamente la estructura, repetir hasta que se obtenga la superficie deseada.	<ul style="list-style-type: none"> -Aluminio puro comercial. Series 1xxx. -Aleaciones Al-Mn. Series 3xxx. -Aleaciones Al-Si. Series 4xxx y aleaciones de fundición. -Aleaciones Al-Mg. Series 5xxx y aleaciones de fundición. -Aleaciones Al-Mg-Si. Series 6xxx y aleaciones de fundición.
1 ml HF (48%), 9 ml H ₂ O	La muestra requiere un buen nivel de pulido, sumergir hasta obtener el efecto deseado, enjuagar en agua caliente, secar.	-Aleaciones Al-Si. Series 4xxx y aleaciones de fundición.
12 ml HCl, 6 ml HNO ₃ , 1ml HF (48%), 1 ml H ₂ O	Practicar una inmersión breve de 2-5 s, enjuagar en agua fría.	<ul style="list-style-type: none"> -Aluminio de alta pureza. -Aluminio puro comercial. Series 1xxx. -Aleaciones Al-Mn. Series 3xxx. -Aleaciones Al-Si. Series 4xxx y aleaciones de fundición. -Aleaciones Al-Mg. Series 5xxx y aleaciones de fundición. -Aleaciones Al-Mg-Si. Series 6xxx y aleaciones de fundición.
50 ml HCl, 15 ml HNO ₃ , 3 ml HF (48%), 5 ml FeCl ₃ solución.	Enfriar el reactivo a 10-15 °C, sumergir la muestra pocos segundos (2-5 s), enjuagar con agua fría, repetir hasta que se logre el efecto deseado.	-Aluminio de alta pureza.
10 ml HCl, 30 ml HNO ₃ , 20 ml H ₂ O, 5 g FeCl ₃	Sumergir la muestra por pocos segundos (2-5 s), enjuagar en agua fría, repetir hasta que se tiene el efecto deseado.	<ul style="list-style-type: none"> -Todas las aleaciones de cobre. Series 2xxx y aleaciones de fundición. -Aleaciones Al-Mn. Series 3xxx. -Aleaciones Al-Mg. Series 5xxx y aleaciones de fundición. -Aleaciones Al-Mg-Si. Series

		6xxx y aleaciones de fundición. -Aleaciones Al-Cu-Mg-Zn. Series 7xxx y aleaciones de fundición.
60 ml HCl, 40 ml HNO ₃	Sumergir la muestra por pocos segundos (2-5 s), enjuagar en agua fría, secar, examinar. Repetir hasta lograrse el efecto deseado.	-Todas las aleaciones de cobre. Series 2xxx y aleaciones de fundición.
20 g CuCl ₂ , 100 ml H ₂ O	Sumergir la muestra por pocos segundos (2-5 s), remover el depósito de cobre con una mezcla de 6 partes de HNO ₃ y una parte de HF. Repetir hasta obtener el efecto deseado. Limpiar con la mezcla de HNO ₃ -HF y enjuagar en agua.	-Aleaciones Al-Si. Series 4xxx y aleaciones de fundición.

3.4.2 PREPARACIÓN PARA OBSERVACIÓN MICROSCÓPICA.

El procedimiento óptimo para la observación microscópica está determinado usando las mismas consideraciones que para la observación macroscópica, solo que el área examinada será más pequeña [31].

Seccionado. Las aleaciones de aluminio pueden seccionarse por cualquier método de corte estándar siempre y cuando dicho método no altere la estructura del espécimen en el plano que será observado al microscopio.

Debido a que muchas aleaciones de aluminio son suaves, el corte debe ser hecho distancia del plano que desea observarse (para evitar deformaciones en el plano que desea ser observado), posteriormente el exceso de material se removerá con un lijado húmedo y con pulido.

Deberá tenerse cuidado que la temperatura generada durante el corte no afecte adversamente los resultados de la observación.

Montaje. Montar las piezas en un medio plástico para formar piezas cilíndricas es el procedimiento más aceptado a menos que el espécimen utilizado sea lo suficientemente grande para manipularlo con facilidad durante el lijado y pulido

El medio de montaje no deberá ser tan duro que inhiba el pulido de la superficie de aluminios suaves o tan suave que permita que el redondeado de las esquinas del metal. Los bordes de las muestras cuya forma debe ser preservada no deberán colocarse cerca de los límites del anillo de montaje.

Lijado. Las aleaciones de aluminio pueden ser lijadas usando las mismas técnicas generales que se usan para todos los metales [31]. Generalmente el lijado se realiza con una serie sucesiva de lijas de carburo de silicio de los números 180, 220, 320, 400 y 600. Antes de pasar a una lija más fina se deberá lavar la muestra con agua para remover partículas que pudieran rayar la superficie.

Si se usa un lijador mecánico deberá tenerse cuidado en prevenir el sobrecalentamiento de la muestra por lo que deberá enfriarse constantemente la muestra con agua fría. Además debido a que en aleaciones suaves de aluminio es fácil que algunas partículas de abrasivo o aluminio se incrusten en la superficie de estudio se recomienda aplicar una presión moderada para disminuir el riesgo de estas incrustaciones, además del uso de un flujo constante de agua.

Pulido mecánico simple. Se logra con una suspensión de alúmina (Al_2O_3) del número 600 (comercial) y agua destilada, en una proporción de 50g de alúmina por 500 ml de H_2O sobre el paño de pulido que se encuentra sobre el disco de rotativo [31].

El anterior abrasivo es excelente para remover la fina capa de metal, que se produce durante el lijado, que se introduce en grietas finas y porosidad, sin embargo si se aplica una presión excesiva o durante un tiempo excesivo se tendrán bordes redondeados en las muestras [31].

Para obtener un mejor acabado se puede usar un abrasivo de diamante de $1\ \mu\text{m}$ que se puede aplicar como una pasta o como spray. Mientras se usa el pulidor de diamante debe usarse un lubricante a base de queroseno o propileno-glicol [31].

Las velocidades de la rueda de pulido se recomiendan de 500 a 700 rpm y el tiempo de pulido deberá estar en el rango de 1 a 2 min [31].

Los especímenes deberán lavarse minuciosamente o limpiados ultrasónicamente para remover todo el abrasivo antes de practicar este tipo de pulido.

Pulido mecánico fino. Generalmente se usa como pulidor polvo de óxido de magnesio (MgO) con agua destilada sobre un paño de pulido. También se puede trabajar con el dióxido de silicio (SiO_2) con tamaño de partícula de $0.04\ \mu\text{m}$ en agua destilada. Una ventaja del óxido de silicio es su habilidad para permanecer en suspensión.

Se pueden usar distintas velocidades para la rueda rotativa para obtener distintos efectos de pulido, aunque una velocidad de 350 rpm o menos da buenos resultados [31].

Para los primeros minutos del pulido deberá aplicarse una considerable presión con las manos, misma que deberá disminuirse paulatinamente mientras que se aplica un flujo constante de agua para limpiar la muestra. Al final del pulido se recomienda aumentar la cantidad de agua [31]. Finalmente la limpieza de la muestra se realiza con agua tibia y se seca soplando aire limpio.

El tiempo para este pulido es de 5 a 15 min [31] dependiendo de la habilidad del operador, la aleación, y la preparación previa de la muestra.

Pulido químico y electrolítico. Ambos tipos de pulido se emplean cuando la aleación es tan suave que es muy difícil pulir mecánicamente.

Pulido químico. La rugosidad superficial lograda no es tan buena como el electropulido pero se emplea para pulir áreas más grandes. Un método de pulido químico es el siguiente [31]:

- **Solución:** 1 parte concentrada de ácido nítrico (HNO_3), 1 parte de etanol. Agregar 1% o menos de una solución al 30% de peróxido de hidrógeno (H_2O_2). La óptima concentración de H_2O_2 depende de la aleación a ser pulida.
- **Temperatura:** 0°C . Se puede meter el contenedor de la solución en una cuba con hielos.
- **Sumergir la muestra en la solución de 10 a 30 min** (usando un revolver mecánico).
- **Comentario:** La pieza antes de someterse al pulido químico deberá haber sido lijada por lo menos hasta la lija 600.

Pulido electrolítico. Puede ser desarrollado usando equipo y soluciones comercialmente disponibles. Aunque el pulido electrolítico pudiera variar dependiendo del equipo y soluciones utilizadas, las condiciones típicas son [31]:

- **Electrolito:** 62 ml de una solución al 70% de HClO_4 , 700 ml de etanol, 100 ml 2-butoxyetanol (también conocido como etanol glicol monobutil éter) y 137 ml de agua destilada.
- **Densidad de corriente:** 3.85 A/cm^2 . La muestra es el ánodo.
- **Tiempo:** 20 s.
- **Comentarios:** Enjuagar en agua tibia y posteriormente alcohol. Secar con aire caliente.

Otro electrolito comúnmente usado para el pulido electrolítico del aluminio es una solución de 25 ml de HNO_3 concentrado y 75 ml de metanol [31].

4.1 EL PROCESO DE LA FUNDICIÓN PRENSADA

El Proceso de *fundición prensada* consiste básicamente en verter el metal líquido en la cavidad de un molde y aplicar presión por medio de una contraparte “macho” de dicho molde (dado) durante el proceso de solidificación.

Debido a que muchos de los problemas de las fundiciones se producen durante el vaciado del metal dentro del molde y durante la solidificación, es recomendable realizar el vaciado de una manera lenta procurando en todo momento que el flujo sea lo más laminar posible y aplicar la presión durante el período de la solidificación.

Con el proceso de *fundición prensada* se ha encontrado un incremento en las propiedades mecánicas de las fundiciones particularmente en su elongación, resistencia al impacto y resistencia a la fatiga [2].

Se puede considerar a la *fundición prensada* como un proceso híbrido que combina las características tanto de la fundición como de la forja en una sola operación.

Es un proceso que con el tiempo ha ido consolidándose y a manera de ejemplo se tiene a Toyota que actualmente produce rines de aluminio A356 usando el proceso de *fundición prensada* con una máquina con capacidad de 1500 tons produciendo 25 rines por hora [2].

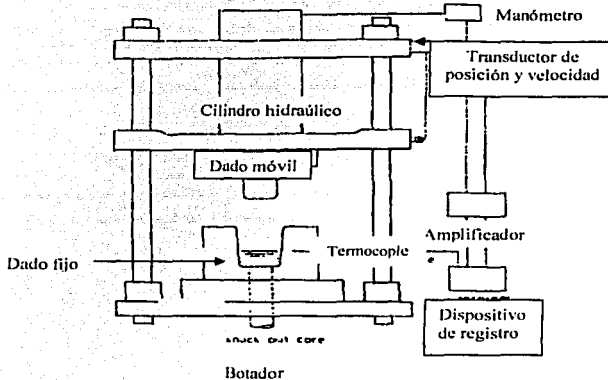


Figura 4.1 Sistema para aplicación de presión

Como punto de referencia tenemos la fundición a presión (Die Casting) el cual es uno de los procesos más importantes para obtener fundiciones de contorno exacto con un excelente acabado superficial. Sin embargo este proceso no es adecuado para componentes que tenga paredes con un espesor mayor a 6 mm o en general para piezas voluminosas y pesadas [2].

En cambio la *fundición prensada* es más conveniente para producir piezas más pesadas o que tengan un espesor de pared mayor que el de las piezas que se pueden obtener con la fundición a presión [2].

En el proceso de la *fundición prensada* deben controlarse una serie de parámetros que incluyen: la temperatura del metal líquido, el tiempo que precede a la aplicación de la presión después del vaciado, el tiempo de aplicación de la presión, y el nivel de la presión.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4.2 SISTEMAS DE APLICACIÓN DE PRESIÓN

En general existen 3 métodos de aplicación de la presión en el proceso de *fundición prensada* como se ilustra en la figura 4.2. En el sistema 1 la presión es aplicada por un pistón y la parte superior del molde es cilíndrica para recibir al pistón. En el sistema 2 el dado que aplica la presión tiene un contorno alrededor del cual el metal se acomodará para dar forma a piezas huecas. En el sistema 3 la presión es aplicada de una forma indirecta.

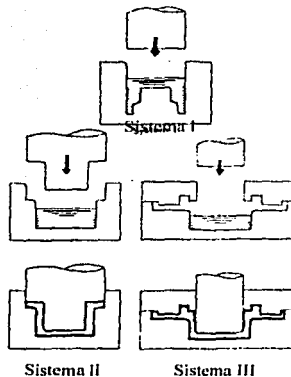


Figura 4.2 Sistemas de aplicación de presión empleados en fundición prensada [2].

En cada uno de los sistemas de aplicación de presión la solidificación del metal comienza después de que el metal es vertido en el molde, y la capa de solidificación, formada por el gradiente de temperaturas con las paredes del molde, es destruida por la aplicación de la presión. En esta etapa se presenta liberación de gases al mismo tiempo que una reducción de volumen.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Debido a la solidificación del metal hay una tendencia a la formación de cavidades (rechupes), pero mientras esto sucede, alrededor de la cavidad en formación aún hay metal con gran cantidad de líquido el cual debido a la presión aplicada pasa a rellenar las cavidades. De ahí la importancia de aplicar la presión que permite rellenar dichas cavidades.

Dado que los defectos de las fundiciones se forman durante la solidificación del metal, es mejor aplicar la presión durante este periodo.

En el sistema 2 no hay necesidad de un sistema de compuertas como tendría que aplicarse en la fundición a presión debido a que el metal se vierte en las cantidades necesarias para que ocupe el espacio entre el dado y el molde el cual estará determinado por la posición relativa del dado y el molde.

En todos los sistemas descritos en la figura 2 se tiene la ventaja de que al verter el metal de una forma lenta se reduce la cantidad de aire atrapado lo cual representa una ventaja contra el método de fundición a presión.

4.3 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CALIDAD DE LA FUNDICIÓN PRENSADA

Como ya se había comentado existen variables en el proceso que deben ser controladas para asegurar la producción de fundiciones de calidad, entre dichos parámetros habíamos mencionado la temperatura del metal vaciado, la temperatura del molde y el dado, el tiempo que se deja pasar después de vaciado antes de aplicar la presión, el tiempo de aplicación de la presión, y el nivel de la presión aplicada.

Los valores de todos estos parámetros están involucrados para la obtención de una fundición de calidad. Pero también hay que considerar otros factores del proceso que

también influyen en la calidad de la fundición como las impurezas en el metal fundido, el claro entre el dado y el molde, la selección apropiada de las aleaciones, la configuración del molde, composición química de las aleaciones, agente desmoldeador utilizado.

4.3.1 IMPUREZAS EN EL METAL FUNDIDO

La influencia de los gases en el metal fundido así como de inclusión de óxidos no metálicos principalmente representan una disminución de las propiedades de las fundiciones.

Se ha encontrado que tanto los gases como las inclusiones de óxido no metálicos influyen negativamente en las propiedades mecánicas del las fundiciones [2].

Para ilustrar lo anterior se tienen las investigaciones realizadas por Kaneko [2]. En los experimentos realizados utilizó una aleación pura de aluminio JIS AC4D (porcentajes en peso: 1.18% Cu, 5.02% Si, 0.51% Mg, 0.25% Fe, 0.01% Ni, 0.02% Mn, 0.02% Zn, 0.10% Ti, balance Al) de la cual se eliminó la escoria por flujo (fluxing) (muestra 1), y una aleación impura del mismo material donde la escoria se mezcló en la fundición (muestra 2).

Tabla 4.1 Tratamiento al metal fundido en una aleación JIS AC4D [2]

Muestra	Eliminación Gases	"Fluxing"	Remoción Escoria
1	Sí	Sí	Sí
2	No	No	No

En dicho estudio se investigó sobre la resistencia a la tensión, elongación, valor de impacto charpy y resistencia a la fatiga en muestras obtenidas por *fundición prensada* bajo los tratamientos 1 y 2 de la Tabla 4.1 y se comparó con piezas obtenidas bajo los mismos tratamientos pero producidas sin la aplicación de presión. Las condiciones que se usaron para los experimentos fueron:

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla 4.2 Condiciones de los experimentos de Kaneko [2]

Temperatura del metal vaciado	750 °C
Temperatura del molde y dado	200 - 250 °C
Presión específica	1000 kg/cm ²
Tiempo de aplicación de presión	30 seg
Tiempo antes de aplicar la presión después del vaciado	6 seg
Tratamiento Térmico (T6)	520 °C x 3 hr ---- Enfriamiento Agua. 170 °C x 4 hr ---- Envejecimiento en Aire.

Los resultados que obtuvieron se muestran en las figuras 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7.

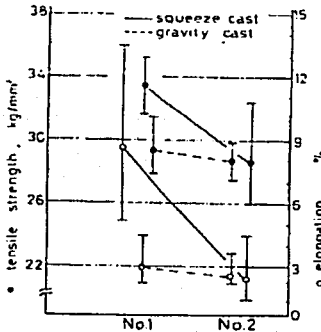


Figura 4.3 Resistencia a la tensión [2]

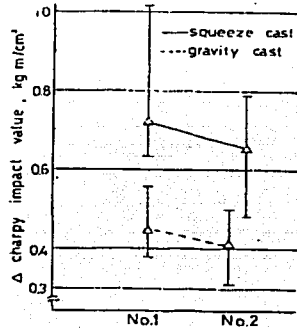


Figura 4.4 Resistencia al impacto [2]

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

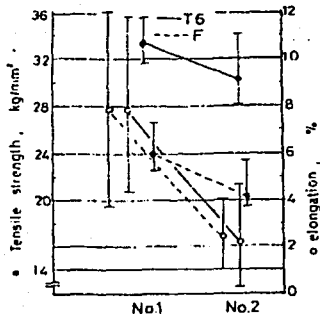


Figura 4.5 Resistencia a la Tensión [2]

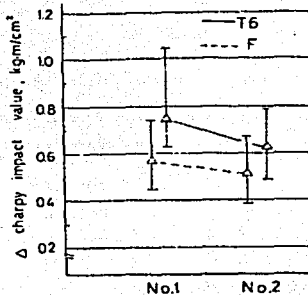


Figura 4.6 Resistencia al impacto [2]

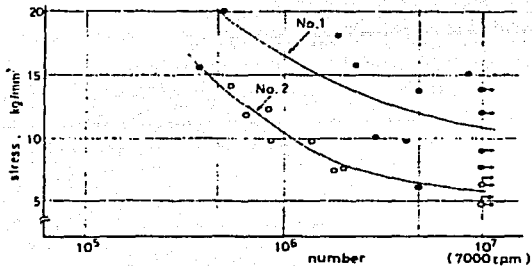


Figura 4.7 Resistencia a la fatiga [2]

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

De los resultados obtenidos se aprecia que las piezas obtenidas por *fundición prensada* tienen una elongación mayor comparando con las fundiciones obtenidas sin la aplicación de presión.

Pero también se manifiesta que si no se pone atención al tratamiento del metal líquido, se pierden las características favorables de la *fundición prensada*. Se observa que el uso de un metal puro (libre de gases y escoria) es una condición básica para la obtención de piezas de calidad por el método de *fundición prensada*.

4.3.2 SELECCIÓN DE LA ALEACIÓN

La selección de la aleación es muy importante en el *fundición prensada* según se muestra a continuación. En la tabla 4.3 se muestra la composición química de las aleaciones usadas por Kaneko [2] en sus experimentos de *fundición prensada*, y en la figura 4.8 se muestran los resultados obtenidos de la resistencia a la tensión de dichas aleaciones.

Tabla 4.3 Composición química de las aleaciones usadas por Kaneko [2] (los porcentajes son en peso y el balance de cada aleación es aluminio)

	Cu	Si	Mg	Fe	Ni	Mn	Zn	Ti
JIS AC1A	4.07	0.20	0.25	0.14	0.01	0.02	0.02	0.05
AC2B	3.00	5.85	0.03	0.20	0.02	0.02	0.03	0.05
AC3A	0.01	12.00	0.20	0.15	0.01	0.01	0.01	0.10
AC4C	0.01	6.75	0.24	0.18	0.01	0.02	0.01	0.15
AC4D	1.18	5.02	0.51	0.25	0.01	0.02	0.02	0.10
AC7A	0.01	0.05	4.00	0.10	0.02	0.02	0.02	0.08
AC8A	0.95	11.00	0.30	0.15	1.00	0.02	0.01	0.10
AC8B	3.00	9.55	1.07	0.19	1.00	0.02	0.01	0.12
ADC12	2.00	11.09	0.04	0.70	0.08	0.10	0.05	0.09
2N01	2.27	1.13	2.10	1.08	1.02	0.03	0.02	0.01
NU - 1	4.50	0.11	0.50	0.12	0.01	0.01	3.10	0.15
Al-Zn-Mg	0.93	0.12	2.06	0.02	0.01	0.02	4.56	0.08

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

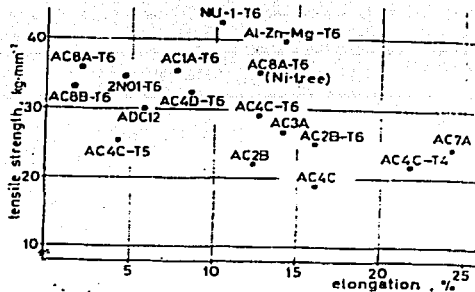


Figura 4.8 Propiedades mecánicas de distintas aleaciones de aluminio usadas para producir muestras por fundición prensada[2]

El empleo de aleaciones Al-Si-Mg, Al-Mg y Al-Si-Cu-Mg son efectivas para la *fundición prensada*. Una selección inadecuada de la aleación repercute en una pérdida de las ventajas de las fundiciones obtenidas por *fundición prensada*.

4.3.3 CONFIGURACIÓN Y HOLGURAS MOLDE - DADO

La presión aplicada al dado es transmitida al metal fundido en la cavidad del molde. Las pérdidas de presión por fricción están en función de la holgura existente entre el diámetro del dado y el diámetro interno del molde.

Cuando se tiene mucha holgura se tiene problemas de flujo de metal líquido entre el dado y el molde y se tiene un flujo excesivo de metal que dejará de formar parte de la pieza y se convertirá en rebaba.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Por otra parte si la holgura es demasiado pequeña, se tendrá una mayor fricción y se necesitará una mayor presión proporcionada por la prensa hidráulica.

La magnitud de la holgura debe determinarse considerando la influencia que el calor tendrá sobre el dado y el molde, el ensamblado molde - dado y la temperatura de precalentamiento del molde - dado. Ordinariamente el valor de la holgura recomendado es de 0.15 mm a temperatura ambiente. Pero durante la producción, la holgura tiende a cero como resultado de la expansión térmica y la deformación plástica del dado [2].

Cuando se ha terminado de aplicar la presión y se retira el dado se recomienda introducir agua de enfriamiento en el dado con el fin de aumentar su vida.

Los problemas de corrosión que algunas veces se encuentran en los moldes usados en fundición a presión no se encuentran en el proceso de *fundición prensada* debido al lento vaciado en el molde.

Para reducir la presión de los gases también se recomienda el incluir líneas de partición o ventilas de escape con la finalidad de facilitar la salida de los mismos.

4.3.4 AGENTE DE DESMOLDEO

En la práctica se usa una solución con base en agua de grafito en forma de spray el cual se aplica sobre el dado y el molde antes de cada ciclo de vaciado.

En el vaciado por gravedad el espesor de la capa de agente desmoldante puede controlar la solidificación de la fundición. En la *fundición prensada* no es posible controlar la solidificación con el recubrimiento del molde ya que la alta presión aplicada al metal fundido arrastra el recubrimiento del molde causando que se mezcle como una impureza.

Para prevenir lo anterior se utiliza un agente de desmoldeo que permita formar una capa de 50 micras de espesor [2].

4.3.5 TEMPERATURA DE OPERACIÓN DEL DADO Y EL MOLDE

La temperatura de operación del dado y el molde debe alcanzar un balance entre la necesidad de contar con una temperatura suficientemente alta como para prevenir la solidificación prematura (antes de la aplicación de la presión). Por otra parte con temperaturas superiores a 316°C se llega a dar una fusión entre la pieza y el molde [5].

4.3.6 TRATAMIENTO TÉRMICO

Para obtener una mejora en las propiedades mecánicas, se recomienda el tratamiento T6 (tratamiento térmico de solución y endurecimiento por envejecimiento)

En el método de fundición a presión es inherente al proceso la porosidad debido al uso de compuertas estrechas y altas presiones de llenado del molde. Pero en el proceso de *fundición prensada* el problema del aire atrapado se reduce notablemente debido al lento llenado a baja presión de los moldes.

Las condiciones del tratamiento térmico T6 son calentamiento a 525°C durante tres horas y enfriado en agua. Posteriormente se calienta a 170°C durante 4 horas para el "envejecimiento."

4.4 POSIBILIDADES DE APLICACIÓN DE LA FUNDICIÓN PENSADA

La fundición y la forja son procesos de conformado de metales que tienen muchas ventajas pero también desventajas. La *fundición prensada* ha sido desarrollada para eliminar algunas de estas desventajas. La figura 4.9 muestra un esbozo de sus relaciones.

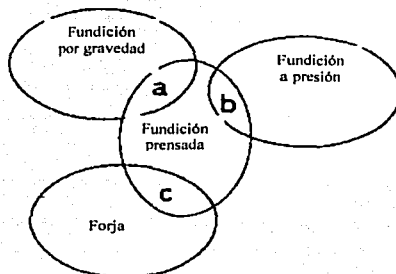


Figura 4.9 Comparación entre fundición por gravedad, fundición a presión, forja y *fundición prensada* [2]

Tabla 4.4 Comparación entre fundición por gravedad, fundición a presión, forja y *fundición prensada* [2]

	Fundición por gravedad	Fundición a presión	Forja	<i>Fundición prensada</i>
Economía	C	A	D	B
Fiabilidad	C	D	A	B
Flexibilidad Diseño	A	C	D	B
Complejidad Piezas	C	A	D	B

A: Superior, D: Inferior.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Algunos ejemplos de componentes automotrices que pueden fabricarse por *fundición prensada*:

Tabla 4.5 Diversos componentes automotrices producidos por fundición prensada [2]

A	Pistones, cilindros, caja de engranes, ruedas.
B	Tambor de frenos, alojamiento clutch, bloque de motor.
C	Barra de conexión, brazo de suspensión, pistón.

La selección de *fundición prensada* dependerá de la configuración y uso de las partes a producir. Por ejemplo, los componentes fabricados con *fundición prensada* muestran mejor reproducción de detalles y acabado superficial comparado con la forja o fundición por gravedad, pero no con el grado de complejidad que se puede lograr con la fundición a presión.

Con respecto a la flexibilidad del diseño, en la forja no se tiene mucha flexibilidad a un costo razonable. La gama de componentes de la tabla anterior pueden ser producidos por *fundición prensada*.

Los componentes fabricados con *fundición prensada* exhiben un aumento en sus propiedades mecánicas, especialmente en elongación, resistencia al impacto, y resistencia a la fatiga. Por ejemplo los rines de automotriz y otros elementos del chasis demandan un alto grado de solidez con el fin de evitar problemas secundarios en una colisión. Con el proceso de *fundición prensada* se tiene ventajas al producir varios de estos componentes a un costo razonable.

A manera de ejemplo se tienen los rines de aluminio los cuales requieren de gran ductilidad para prevenir efectos secundarios después de una colisión por lo que la *fundición prensada* es un método ventajoso de producción (desde 1979 Toyota Motor Co. fabrica rines de aluminio bajo este proceso) [2].

También cabe mencionar que las piezas de aleaciones de aluminio producidas por *fundición prensada* pueden recibir tratamiento térmico, acabado superficial y pueden ser soldadas, maquinadas, pintadas, anodizadas y sujetas a otros procesos secundarios [5].

4.5 ASPECTOS ECONÓMICOS DE LA FUNDICIÓN PRENSADA

Existen ventajas económicas con el uso de la *fundición prensada* debido al alto nivel de utilización del metal fundido, a diferencia de la fundición a presión donde el material de los alimentadores y compuertas no forma parte de la pieza o de la fundición por gravedad donde el material solidificado en los alimentadores y mazaratos es un desperdicio, en el *fundición prensada* prácticamente todo el metal vertido en el molde formará parte de la pieza.

Por otra parte la posibilidad de automatización del proceso y la relativa simplicidad de las máquinas utilizadas comparando con las necesarias en la fundición a presión, contribuye a la reducción de costos tanto de operación como de mantenimiento.

4.6 CONTROL DE LA MICRO Y MACRO ESTRUCTURA

Debido a que la solidificación tiene lugar bajo una alta presión específica, se tiene una rápido índice de extracción de calor a través de las paredes del molde lo que produce un tamaño de grano refinado. Lo anterior es más notorio en piezas con una alta relación superficie/volumen.

Existe una relación muy estrecha entre las condiciones de proceso, principalmente la temperatura de vaciado y la presión específica aplicada, y la macroestructura. Alterando

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

estos dos factores se puede llegar a establecer una relación que muestre la transición de la macroestructura de un tamaño de grano burdo a uno refinado.

Experimentos al respecto han sido desarrollados por Lynch [5], entre otros, y las conclusiones a las que llega se muestran en la siguiente figura donde se muestra la correlación de la temperatura de vaciado y la presión específica aplicada con la macroestructura en una pieza producida con aleación de aluminio A380 (7.5-9.5% Si, 1.3% Fe, 3.0-4.0% Cu, 0.5% Mn, 0.1% Mg, 0.5% Ni, 3.0% Zn, 0.35% Sn, balance Al).

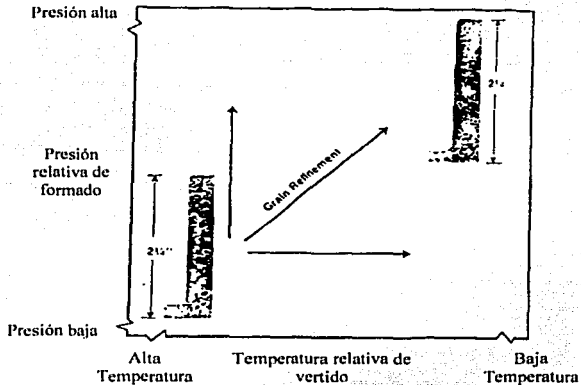


Figura 4.10 Relación entre condiciones de proceso y macroestructura para una aleación de aluminio A380 [5]

Resulta interesante que el refinamiento de grano se logra tanto con un incremento de la presión específica desde 15.86 Mpa (2300 psi) a 58.61 Mpa (8500 psi) como con una disminución en la temperatura de vaciado desde 700 a 650 °C [5].

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

También cabe mencionar que variaciones de tamaño de grano, pueden ocurrir desde la superficie hasta el centro de las piezas producidas, y lo mismo es válido de una sección a otra de la misma pieza. Esto es debido principalmente por las velocidades de enfriamiento en las distintas partes de la fundición.

De lo anterior se concluye que dichas variaciones estructurales se pueden minimizar a través de un diseño apropiado de los moldes.

5.1 DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este capítulo se explican tanto la metodología como los criterios utilizados durante el desarrollo experimental de la presente tesis. Se expone paso a paso cada una de las etapas que se requirieron para la elaboración de las probetas así como los ensayos realizados con ellas.

La fabricación de los lingotes, el análisis de la macroestructura y la metalografía se llevaron a cabo en el Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada de la UNAM (FATA-Campús Juriquilla, Querétaro). La inspección metalográfica microscópica se realizó en el Centro de Geociencias de la UNAM (Campús Juriquilla, Querétaro). Los ensayos de tensión en la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ). Los ensayos de dureza se practicaron en el Centro de Investigación y Asistencia Técnica del Estado de Querétaro (CIATEQ). Y el maquinado de las microprobetas se efectuó en un taller metal-mecánico particular.

5.2 RESUMEN

El objetivo de esta etapa experimental fue producir probetas cónico-cilíndricas (diámetro inferior: 39.5 mm, diámetro superior: 47.8 mm, altura: 122 mm) mediante fundición prensada, con una aleación de aluminio 356 (Si 7%, Mg 0.3%, Fe 0.3%, Al 92.4%), y estudiar la relación existente entre algunas propiedades mecánicas y la microestructura en función con la presión aplicada durante la solidificación de las muestras.

Tabla 5.1. Condiciones de fabricación de lingotes

Cantidad lingotes	Presión aplicada durante solidificación (Mpa)	Temperatura del metal vaciado (°C)	Tiempo de aplicación de la presión (s)
6	0	715	90
5	110	715	90

5	220	715	90
4	275	715	90
4	330	715	90
4	440	715	90
13	550	715	90

Para la determinación de las propiedades mecánicas se fabricaron microprobetas con las dimensiones de la figura 5.13. a las que se les practicaron ensayos de tensión y ensayos de dureza.

El diseño de las microprobetas para los ensayos de tensión es una propuesta que se determinó de acuerdo a las dimensiones originales del lingote y de que se consideró investigar las propiedades mecánicas en diferentes partes del lingote esperando encontrar diferencia en las propiedades como una función de la estructura metalúrgica ya que se esperaba que esta última fuera una función de la distribución de la presión aplicada en el metal en solidificación (considerándolo un sólido no homogéneo y no continuo). No se encontró alguna norma para probetas que se ajustara a las dimensiones requeridas en esta investigación.

Para la determinación de la microestructura se utilizaron las técnicas de la metalografía y la inspección macroscópica y microscópica.

5.3 SELECCIÓN DE LA ALEACIÓN

Se decidió utilizar la aleación de aluminio 356 por las siguientes razones:

1. Por sus propiedades físico-químicas es de las aleaciones más utilizados en la industria automotriz (se utiliza comúnmente en rines, pistones y partes de la transmisión) [8].

2. Es una aleación adecuada para la fundición y posee alta resistencia a la corrosión.

5.4 FUSIÓN DE LA ALEACIÓN

A partir de lingotes de aleación de aluminio 356 se cortaron pequeños pedazos para alimentar a un crisol de carburo de silicio de aproximadamente 350 ml. Posteriormente el crisol fue introducido en un horno de resistencia eléctrica.

La temperatura se midió a través de termopares tipo K (Cromel – Alumel) conectados a un controlador de temperatura encendido-apagado. La temperatura a la que se calentó el metal fundido fue de 715 °C y la atmósfera de la fundición fue aire convencional.

Se tuvo especial cuidado en que tanto el crisol como las paredes internas del horno se encontraran libres de humedad para prevenir la formación de gas hidrógeno. No se practicó ningún método de desgasificado a la aleación líquida.

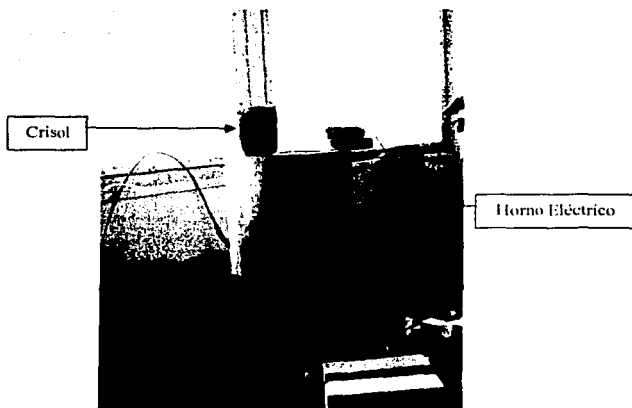


Figura 5.1 Fotografía del horno y crisol utilizados

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

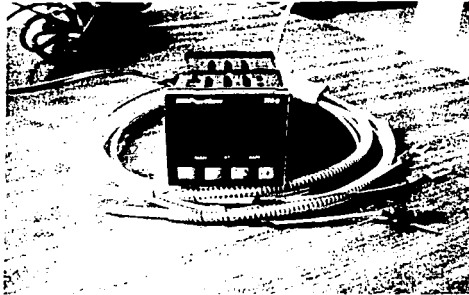


Figura 5.2 Fotografía de controlador de temperatura y termopares utilizados

5.5 PREPARACIÓN DEL MOLDE Y PUNZÓN

Se utilizó un molde de acero H-13 para trabajo en caliente (este acero es frecuentemente utilizado en la fabricación de dados para colado u otras herramientas para trabajo en caliente por su resistencia a las altas temperaturas por su bajo contenido de carbono. Un acero con mayor contenido de carbono se agrietaría trabajando en estas condiciones) y tanto el punzón como el botador se fabricaron con el mismo material. Para facilitar el desmoldeo se recubrió la parte interna del molde y el punzón con una pintura a base de grafito y agua.

Para reducir los efectos de un choque térmico del molde y punzón con el metal vertido se practicó un precalentamiento con la flama de soplete de gas butano. El precalentamiento fue practicado con el molde y punzón ya instalados en la prensa hidráulica con capacidad de 60,000 lb como se ilustra en la siguiente figura.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

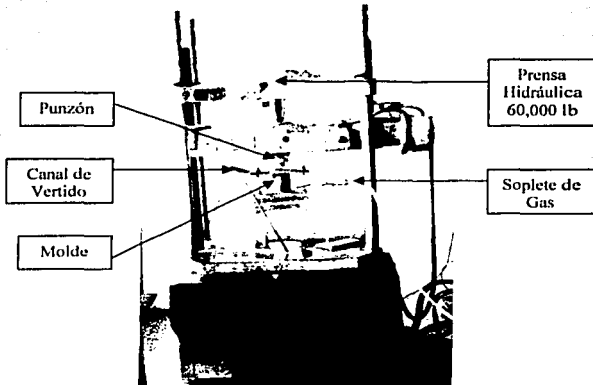


Figura 5.3 Montaje del molde, botador y punzón en la prensa hidráulica

La temperatura superficial del molde se registró con el controlador de temperatura y los termopares que se pusieron en contacto con la pared exterior del molde. Se procuró mantener la temperatura en la parte central del molde entre 250 y 300 °C.

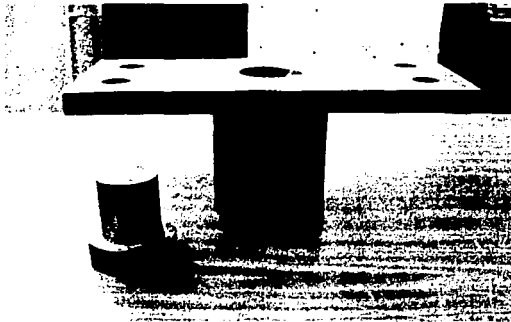


Figura 5.4 Fotografía del molde y botador utilizados

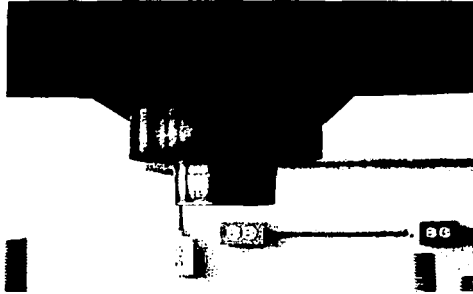
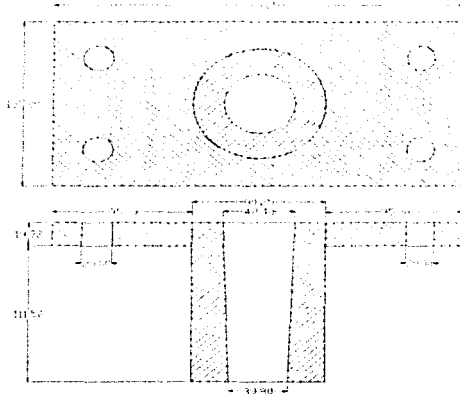


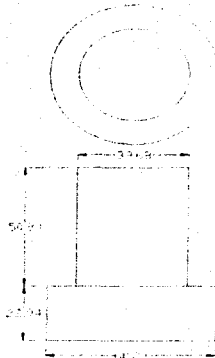
Figura 5.5 Fotografía del punzón instalado en la prensa



Cotas: [mm]

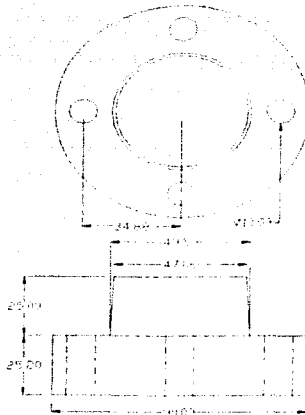
Figura 5.6 Diagrama del molde utilizado

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Cotas: [mm]

5.7 Diagrama del botador utilizado



Cotas:[mm]

Figura 5.8 Diagrama del punzón utilizado

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

5.6 VACIADO DEL METAL EN EL MOLDE

Con el metal fundido a 715 °C y con el molde y punzón precalentados entre 250 y 300 °C se procedió al vaciado del metal líquido dentro del molde para lo cual se usó un canal de acero previamente precalentado con el soplete de gas, y recubierto con pintura refractaria (ver figura 5.3).

Se procuró que el vaciado fuera lo más uniforme y laminar posible para reducir el atrapamiento de aire.

5.7 APLICACIÓN DE LA PRESIÓN

Tan pronto como se terminaba de verter el metal en el molde se hacía descender el punzón para la aplicación de la presión. El tiempo estimado que transcurría entre el final del vaciado y el momento en que el punzón entraba en contacto con el metal líquido fue de aproximadamente 20 segundos.

La presión aplicada en cada uno de los lingotes (ver tabla 5.1.) durante su solidificación se mantuvo durante aproximadamente 90 segundos.

La presión aplicada se controló a través de un manómetro instalado en derivación entre la bomba hidráulica y el pistón.

Se produjeron probetas a diferentes presiones; 0 Mpa (6 probetas), 110 Mpa (5 probetas), 220 Mpa (5 probetas), 275 Mpa (4 probetas), 330 Mpa (4 probetas), 440 Mpa (4 probetas) y 550 Mpa (13 probetas), Total: 41 probetas.

5.8 OBTENCIÓN DE LAS MUESTRAS

Una vez que el metal solidificó dentro del molde se procedió a la extracción de la pieza fundida con la ayuda del botador de acero colocado en la parte inferior del molde. Las piezas terminaron de enfriarse a temperatura ambiente.



Figura 5.9 Fotografía de algunas probetas obtenidas

5.9 METALOGRAFÍA DE MUESTRAS PARA ANÁLISIS DE MACROESTRUCTURA

Una vez que se obtuvieron las muestras cilíndricas, como las mostradas en la figura anterior, se seleccionó un espécimen por presión aplicada y se cortó a la mitad.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Una de las mitades se usaría para análisis macroscópico y la otra mitad para la obtención de microprobetas para los ensayos de tensión y dureza.

Se obtuvieron 7 mitades de pieza cilíndrica cada una de las cuales correspondía a una presión aplicada durante su fabricación (0, 110, 220, 275, 330, 440, 550 Mpa).

Las mitades seleccionadas fueron lijadas y pulidas para practicar un análisis macroscópico y tomar las fotografías correspondientes. Para ello se empleó una máquina de desbaste – pulidora de disco.

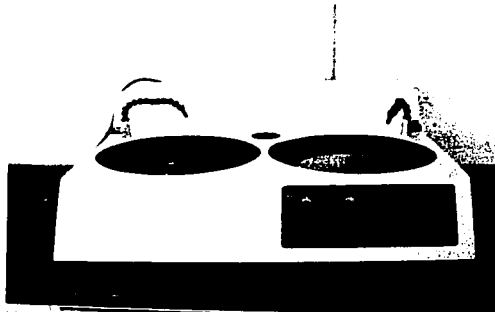


Figura 5.10 Máquina utilizada para el desbaste y pulido de las probetas

El proceso de desbaste se practicó con las siguientes lijas: 180, 220, 240, 280, 320, 360 y 400 en ese orden. Entre cada etapa del desbaste la probeta se giró 90° para ir eliminando las marcas dejadas por el anterior papel lija.

Después del proceso de desbaste con papel lija se empleó un paño de pulido al que se le agregó una suspensión de alúmina de 5 micras en agua destilada, con lo que se obtuvo una superficie con acabado espejo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Durante el desbaste y el pulido se mantuvo un chorro constante de agua para limpiar la superficie del disco y como enfriador de las piezas.

Una vez que se obtuvo una superficie plana, con acabado espejo y libre de rayaduras se procedió al ataque químico con una solución de ácido fluorhídrico al 0.5 % (0.5% ácido fluorhídrico y 99.5% agua destilada).

El tiempo de ataque químico fue entre 60 y 80 segundos y se detuvo hasta que se obtuvo una superficie ligeramente opaca. Entonces se procedió al lavado con agua corriente para remover los excesos de ácido y posteriormente con alcohol y secado con aire caliente.

A las muestras preparadas les fueron tomadas fotografías para obtener una imagen de su macroestructura (ver el apartado 6.4 para ver los resultados).

5.10 MAQUINADO DE MICROPROBETAS PARA ENSAYOS DE TENSIÓN

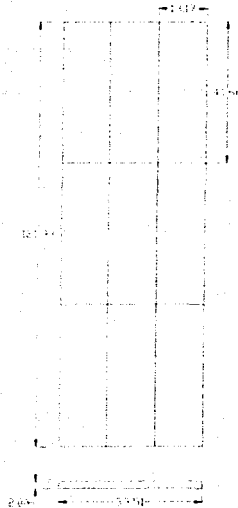
En la sección anterior se mencionó que se seleccionaron 7 probetas (una por presión aplicada) y se cortaron a la mitad. Una de las mitades se utilizó para el análisis macroscópico y la otra mitad se utilizó para la fabricación de las microprobetas destinadas a los ensayos de tensión y dureza.

De cada una de las mitades de la muestra cilíndrica se cortaron con sierra cinta 2 rebanadas, una de 39.51 mm de ancho por 121.98 mm de alto y 2 mm de espesor de las que se obtuvieron 9 secciones longitudinales (a la aplicación de la presión) de 13.17 mm de ancho por 40.66 mm alto (ver figura 5.11).

De la rebanada inferior de 39.51 mm de ancho por 118.53 mm de alto se obtuvieron 9 secciones transversales (a la aplicación de la presión) con 13.17 mm de ancho y 39.51 mm de alto (ver figura 5.12).

En total se obtuvieron 63 secciones longitudinales (9 por cada una de las 7 probeta fabricadas a 0, 110, 220, 275, 330, 440 y 550 Mpa) y 63 secciones transversales (9 por cada una de las 7 probeta fabricadas a 0, 110, 220, 275, 330, 440 y 550 Mpa).

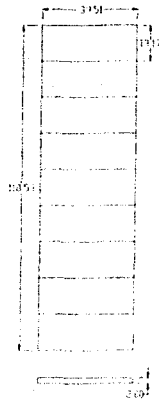
Cada una de las 126 secciones obtenidas fue maquinada para obtener una microbroteta, como la que se ilustra en la figura 5.13, para los ensayos de tensión. El maquinado fue realizado con una fresadora vertical convencional.



Cotas: [mm]

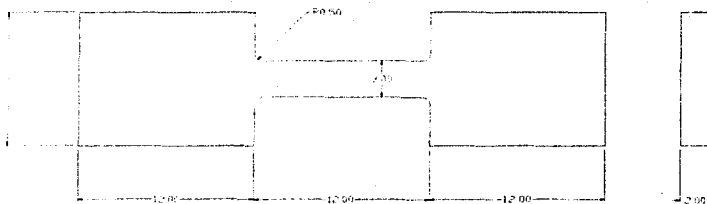
Figura 5.11 Rebanada superior dividida longitudinalmente en 9 secciones

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Cotas: [mm]

Figura 5.12 Rebanada inferior dividida transversalmente en 9 secciones



Cotas: [mm]

Figura 5.13 Dimensiones de las microprobetas maquinadas a partir de las secciones obtenidas en las dos figuras anteriores

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

5.11 ENSAYOS DE TENSIÓN

Se utilizó una máquina universal de ensayos (Adamel/Lhomargy mod. DY.22) para la realización de los ensayos de tensión para las 126 microprobetas. La información que proporciona dicha máquina es: Carga de ruptura (deca-Newtons, daN), elongación (mm) y velocidad de aplicación de la fuerza (mm/min).

Conociendo la carga de ruptura y la sección transversal de la microprobeta se determinó el esfuerzo de ruptura. Con el valor de la elongación antes de la ruptura se tiene también una idea de la ductilidad de las muestras.

Los resultados pueden consultarse en el apartado 6.2.

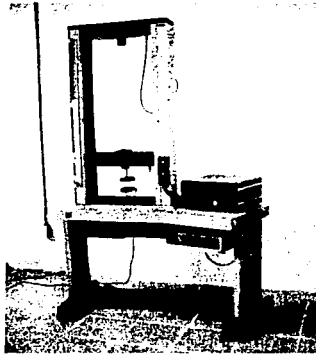


Figura 5.14 Fotografía de la máquina DY.22 con capacidad de 5000 N para ensayos de tensión utilizada

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

5.12 ENSAYOS DE DUREZA

Se utilizó un durómetro Rockwell (Mitutoyo ATK-F3000) para los ensayos de dureza. Se practicó el ensayo de dureza Rockwell F (con indentador de bola de acero de 1/16 de pulgada de diámetro y una carga de 60 kg).

Se seleccionaron 7 mitades de las microprobetas fracturadas en los ensayos de tensión correspondientes a la misma sección en las muestras cilíndricas, una muestra por cada una de las presiones estudiadas (0, 110, 220, 275, 330, 440, 550 Mpa).

A cada una de las 7 muestras se le practicaron 3 ensayos de dureza con el fin de obtener un promedio representativo por cada muestra.

Los resultados pueden consultarse en el apartado 6.3.

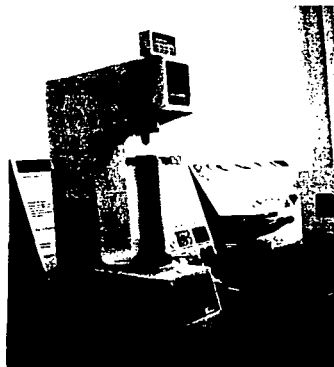


Figura 5.15 Fotografía de la máquina utilizada para los ensayos de dureza

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

5.13 METALOGRAFÍA DE MICROPROBETAS PARA ANÁLISIS DE MICROESTRUCTURA

En la sección anterior se menciona que para los ensayos de dureza se seleccionaron 7 mitades de las microprebetas fracturadas en los ensayos de tensión.

La otra mitad de estas microprobetas se montaron en resina para practicarles las técnicas de la metalografía y observación de su microestructura.

Nuevamente los especímenes fueron lijados y pulidos en la máquina de desbaste – pulidora de disco mostrada en la figura 5.10.

Para el proceso de desbaste se utilizaron las lijas: 180, 220, 240, 280, 320, 360 y 400 en ese orden. Entre cada etapa del desbaste la probeta se giró 90° para ir eliminando las marcas dejadas por el anterior papel lija.

Después del proceso de desbaste con papel lija las muestras pasaron por tres etapas de pulido con paños a los que se les agregó como abrasivo una suspensión de alúmina en agua destilada con un tamaño de partícula progresivamente menor.

Los tamaños de partícula de la alúmina utilizada fueron de 5, 1 y 0.3 micras en ese orden hasta que se obtuvo una superficie con acabado espejo.

También en este proceso durante el desbaste y el pulido se mantuvo un chorro constante de agua para limpiar la superficie del disco y como enfriador de las piezas.

Una vez que se obtuvo una superficie plana, con acabado espejo y libre de rayaduras se procedió al ataque químico con el reactivo Keller (HF 1%, HCl 1.5%, HNO₃ 2.5%, H₂O 95%).

El tiempo de ataque químico fue entre 60 y 100 segundos y se detuvo hasta que se obtuvo una superficie ligeramente opaca. Entonces se procedió al lavado con agua corriente para remover los excesos de ácido, limpieza con alcohol y al secado con aire caliente.

Las probetas así preparadas fueron inspeccionadas con la ayuda de un microscopio metalográfico, a diferentes aumentos, con el que se tomaron fotografías de la microestructura. Las fotografías pueden verse en el apartado 6.5



Figura 5.16 Fotografía de las probetas montadas en resina autofraguante

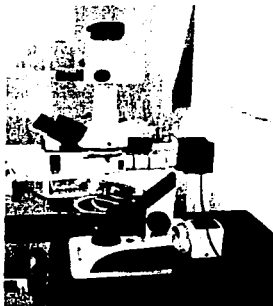


Figura 5.17 Fotografía del microscopio metalográfico binocular (Nikon) utilizado.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

6.1 RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de tensión y dureza y se presentan las fotografías tanto de la macroestructura como de la microestructura, la superficie de fractura y un comparativo de apariencia superficial.

También se realiza un análisis de resultados para dar significado a la información obtenida de los experimentos y tratar de establecer la relación existente entre las propiedades mecánicas estudiadas y la presión aplicada a las probetas durante su solidificación.

6.2 ENSAYOS DE TENSIÓN

Como se mencionó en el apartado 5.11 la máquina universal de ensayos utilizada proporcionó información de la carga de ruptura (daN), elongación al momento de la ruptura y velocidad con la que se aplicó la carga. Con estos datos se calculó el esfuerzo de ruptura (Mpa) y con la elongación antes de la ruptura se tuvo una idea de la ductilidad de las muestras.

Para los ensayos se utilizó una velocidad de aplicación de la carga de 1 mm/min aunque en algunas de las pruebas por una inadecuada calibración de la máquina los ensayos se realizaron a velocidades de hasta 40 mm/min, en estos casos los resultados se presentan pero no se incluyen en el análisis.

Como nomenclatura para las microprobetas se tiene que las longitudinales incluyen una letra y un número (A1, A2, A3, B1, B2, B3, C1, C2, C3) y las transversales solo tienen un número (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9).

Tabla 6.1 Datos del ensayo de tensión en las 18 microprobetas correspondientes a una muestra cilíndrica obtenida sin aplicar presión durante la solidificación (0 Mpa)

Ensayos de Tensión 1							
Probeta No. 02							
Presión de Fundición: 0 Mpa							
Sección	Carga Ruptura (daN)	Elongación (mm)	Velocidad (mm/min)	L₀ (mm)	E₀ (mm)	Área (m²)	Esfuerzo Ruptura (Mpa)
A1*	48.90	0.82	40.00	3.00	2.00	0.0000060	81.33
A2*	38.40	0.46	40.00	3.00	2.00	0.0000060	64.00
A3	81.20	1.41	1.00	3.00	2.00	0.0000060	135.33
B1	104.60	1.64	1.00	3.00	2.00	0.0000060	174.33
B2	94.50	1.31	1.00	3.00	2.00	0.0000060	157.50
B3	90.30	1.52	1.00	3.00	2.00	0.0000060	150.50
C1	94.60	1.65	1.00	3.00	2.00	0.0000060	157.67
C2	99.10	1.99	1.00	3.20	2.00	0.0000064	154.84
C3	100.50	2.78	1.00	3.50	2.00	0.0000070	143.57
Promedios	94.97	1.76					153.39
1	44.00	0.71	1.00	3.50	2.00	0.0000070	62.86
2	65.00	0.91	1.00	3.40	2.00	0.0000068	95.59
3	75.60	1.15	1.00	3.50	2.00	0.0000070	108.00
4	63.30	1.03	1.00	3.50	2.00	0.0000070	90.43
5	68.00	1.14	1.00	3.40	2.00	0.0000068	100.00
6	87.20	1.71	1.00	3.70	2.00	0.0000074	117.84
7	74.10	1.34	1.00	3.20	2.00	0.0000064	115.78
8	74.10	1.85	1.00	3.30	2.00	0.0000066	112.27
9	72.90	1.33	1.00	3.30	2.00	0.0000066	110.45
Promedios	69.36	1.24					101.47

* Los datos de A1 y A2 no se usaron para los promedios porque por accidente la velocidad de aplicación de la carga fue 40 veces mayor a la requerida.

Tabla 6.2 Datos del ensayo de tensión en las 18 microprobetas correspondientes a una muestra cilíndrica obtenida aplicando una presión de 110 Mpa durante la solidificación

Ensayos de Tensión 2							
Probeta No. 22							
Presión de Fundición: 110 Mpa							
Sección	Carga Ruptura (daN)	Elongación (mm)	Velocidad (mm/min)	L₀ (mm)	E₀ (mm)	Área (m²)	Esfuerzo Ruptura (Mpa)
A1	55.40	2.22	1.00	3.00	2.00	0.0000060	92.33
A2	62.50	1.72	1.00	3.00	2.00	0.0000060	104.17
A3	53.20	1.78	1.00	3.00	2.00	0.0000060	88.67
B1	61.30	1.53	1.00	3.00	2.00	0.0000060	102.17
B2	62.70	1.91	1.00	3.00	2.00	0.0000060	104.50
B3	60.80	1.21	1.00	3.00	2.00	0.0000060	101.33
C1	65.90	1.84	1.00	3.00	2.00	0.0000060	109.83
C2	56.60	1.56	1.00	3.00	2.00	0.0000060	94.33
C3	55.60	1.93	1.00	3.00	2.00	0.0000060	92.67
Promedios	59.33	1.74					98.89
1	54.50	1.02	1.00	3.00	2.00	0.0000060	90.83
2	59.10	2.35	1.00	3.00	2.00	0.0000060	98.50
3	49.90	1.73	1.00	3.00	2.00	0.0000060	83.17
4	62.00	2.13	1.00	3.00	2.00	0.0000060	103.33
5	57.60	1.50	1.00	3.00	2.00	0.0000060	96.00
6	49.50	1.31	1.00	3.00	2.00	0.0000060	82.50
7	56.40	1.90	1.00	3.00	2.00	0.0000060	94.00
8	54.00	2.05	1.00	3.00	2.00	0.0000060	90.00
9	60.70	1.63	1.00	3.00	2.00	0.0000060	101.17
Promedios	55.97	1.74					93.28

Tabla 6.3 Datos del ensayo de tensión en las 18 microprobetas correspondientes a una muestra cilíndrica obtenida aplicando una presión de 220 Mpa durante la solidificación

Ensayos de Tensión 3							
Probeta No. 13							
Presión de Fundición: 220 Mpa							
Sección	Carga Ruptura (daN)	Elongación (mm)	Velocidad (mm/min)	L₀ (mm)	E₀ (mm)	Area (m²)	Esfuerzo Ruptura (Mpa)
A1	49.50	1.75	1.00	3.00	2.00	0.0000060	82.50
A2	57.70	2.59	1.00	3.00	2.00	0.0000060	96.17
A3	48.80	1.66	1.00	3.00	2.00	0.0000060	81.33
B1	59.90	1.58	1.00	3.00	2.00	0.0000060	99.83
B2	56.60	1.17	1.00	3.00	2.00	0.0000060	94.33
B3	48.90	1.58	1.00	3.00	2.00	0.0000060	81.50
C1	55.00	1.42	1.00	2.50	2.00	0.0000050	110.00
C2	59.40	1.24	1.00	3.00	2.00	0.0000060	99.00
C3	55.20	1.49	1.00	3.00	2.00	0.0000060	92.00
Promedios	54.56	1.61					92.96

1	27.30	0.66	1.00	3.00	2.00	0.0000060	45.50
2	56.80	4.55	1.00	3.00	2.00	0.0000060	94.67
3	63.10	1.90	1.00	3.00	2.00	0.0000060	105.17
4	53.50	1.10	1.00	3.00	2.00	0.0000060	89.17
5	55.00	1.20	1.00	3.00	2.00	0.0000060	91.67
6	58.40	1.19	1.00	3.00	2.00	0.0000060	97.33
7	56.40	1.03	1.00	3.00	2.00	0.0000060	94.00
8	60.40	1.19	1.00	3.00	2.00	0.0000060	100.67
9	64.90	1.64	1.00	3.00	2.00	0.0000060	108.17
Promedios	55.09	1.61					91.81

Tabla 6.4 Datos del ensayo de tensión en las 18 microprobetas correspondientes a una muestra cilíndrica obtenida aplicando una presión de 275 Mpa durante la solidificación

Ensayos de Tensión 4							
Probeta No. 08							
Presión de Fundición: 275 Mpa							
Sección	Carga Ruptura (daN)	Elongación (mm)	Velocidad (mm/min)	L₀ (mm)	E₀ (mm)	Area (m²)	Esfuerzo Ruptura (Mpa)
A1	77.20	1.39	1.00	3.00	2.00	0.0000060	128.67
A2	63.60	0.99	1.00	3.00	2.00	0.0000060	106.00
A3	69.70	1.26	1.00	3.00	2.00	0.0000060	116.17
B1	69.00	1.46	1.00	3.00	2.00	0.0000060	115.00
B2	68.40	1.28	1.00	3.00	2.00	0.0000060	114.00
B3	66.30	1.48	1.00	3.00	2.00	0.0000060	110.50
C1	72.90	1.51	1.00	3.00	2.00	0.0000060	121.50
C2	63.40	1.39	1.00	3.00	2.00	0.0000060	105.67
C3	62.40	1.70	1.00	3.00	2.00	0.0000060	104.00
Promedios	68.10	1.38					113.50
1	65.20	1.47	1.00	3.00	2.00	0.0000060	108.67
2	55.20	1.81	1.00	3.00	2.00	0.0000060	92.00
3	61.10	1.24	1.00	3.00	2.00	0.0000060	101.83
4	62.10	1.34	1.00	3.00	2.00	0.0000060	103.50
5	57.80	1.38	1.00	3.00	2.00	0.0000060	96.33
6	48.80	1.46	1.00	3.00	2.00	0.0000060	81.33
7	49.40	1.25	1.00	3.00	2.00	0.0000060	82.33
8	55.50	1.20	1.00	3.00	2.00	0.0000060	92.50
9	53.30	1.27	1.00	3.00	2.00	0.0000060	88.83
Promedios	56.49	1.38					94.15

Tabla 6.5 Datos del ensayo de tensión en las 18 microprobetas correspondientes a una muestra cilíndrica obtenida aplicando una presión de 330 Mpa durante la solidificación

Ensayos de Tensión 5							
Probeta No. 18							
Presión de Fundición: 330 Mpa							
Sección	Carga Ruptura (daN)	Elongación (mm)	Velocidad (mm/mín)	L₀ (mm)	E₀ (mm)	Área (m²)	Esfuerzo Ruptura (Mpa)
A1	51.50	1.06	1.00	2.80	2.00	0.0000056	91.96
A2	57.60	1.49	1.00	2.80	2.00	0.0000056	102.86
A3	61.20	1.69	1.00	3.00	2.00	0.0000060	102.00
B1	60.40	1.29	1.00	3.00	2.00	0.0000060	100.67
B2	60.20	1.21	1.00	3.00	2.00	0.0000060	100.33
B3	54.10	1.73	1.00	3.00	2.00	0.0000060	90.17
C1	60.30	1.71	1.00	2.70	2.00	0.0000054	111.67
C2	57.80	1.38	1.00	2.80	2.00	0.0000056	103.21
C3	65.40	1.83	1.00	2.80	2.00	0.0000056	116.79
Promedios	58.72	1.49					102.18
1*	ND	ND	ND	2.80	2.00	0.0000056	ND
2	60.90	2.28	1.00	2.80	2.00	0.0000056	108.75
3	65.20	1.53	1.00	3.00	2.00	0.0000060	108.67
4	62.40	1.33	1.00	3.00	2.00	0.0000060	104.00
5	59.60	1.31	1.00	2.80	2.00	0.0000056	106.43
6	59.60	1.35	1.00	2.80	2.00	0.0000056	106.43
7	55.30	1.29	1.00	2.50	2.00	0.0000050	110.60
8	50.90	1.07	1.00	2.40	2.00	0.0000048	106.04
9	63.50	1.66	1.00	2.50	2.00	0.0000050	127.00
Promedios	59.68	1.48					109.74

* Datos no disponibles para la sección uno de la probeta 18 por lo que no se usan para promediar.

Tabla 6.6 Datos del ensayo de tensión en las 18 microprobetas correspondientes a una muestra cilíndrica obtenida aplicando una presión de 440 Mpa durante la solidificación

Ensayos de Tensión 6							
Probeta No. 16							
Presión de Fundición: 440 Mpa							
Sección	Carga Ruptura (daN)	Elongación (mm)	Velocidad (mm/min)	L ₀ (mm)	E ₀ (mm)	Área (m ²)	Esfuerzo Ruptura (Mpa)
A1*	75 20	0 85	50 00	3 00	2 00	0 0000060	125 35
A2*				3 00	2 00	0 0000060	
A3*	38 70	0 91	40 00	3 00	2 00	0 0000060	64 50
B1*	38 80	1 20	40 00	3 00	2 00	0 0000060	64 67
B2*	41 70	0 81	40 00	3 00	2 00	0 0000060	69 50
B3*				3 00	2 00	0 0000060	
C1*	32 70	1 58	40 00	3 00	2 00	0 0000060	54 50
C2*	28 80	2 02	40 00	3 00	2 00	0 0000060	48 00
C3*				3 00	2 00	0 0000060	
Promedios	42.65	1.23					71.08
1*	53 20	0 60	40 00	3 00	2 00	0 0000060	88 67
2*	65 00	0 91	40 00	3 00	2 00	0 0000060	108 33
3*	54 10	0 66	40 00	3 00	2 00	0 0000060	90 17
4*				3 00	2 00	0 0000060	
5*				3 00	2 00	0 0000060	
6*	75 50	1 30	40 00	3 00	2 00	0 0000060	125 83
7*	24 70	0 37	40 00	3 00	2 00	0 0000060	41 17
8*	75 10	1 26	40 00	3 00	2 00	0 0000060	125 17
9*				3 00	2 00	0 0000060	
Promedios	57.93	0.85					96.56

* Datos no contemplados para el estudio porque por errores de calibración de la máquina los velocidades de aplicación de la carga resultaron muy altas.

Tabla 6.7 Datos del ensayo de tensión en las 18 microprobetas correspondientes a una muestra cilíndrica obtenida aplicando una presión de 550 Mpa durante la solidificación

Ensayos de Tensión 7							
Probeta No. 06							
Presión de Fundición: 550 Mpa							
Sección	Carga Ruptura (daN)	Elongación (mm)	Velocidad (mm/min)	L₀ (mm)	E₀ (mm)	Área (m²)	Esfuerzo Ruptura (Mpa)
A1	81.30	1.53	1.00	2.90	2.00	0.0000058	140.17
A2	51.20	0.82	1.00	3.00	2.00	0.0000060	85.33
A3	79.60	1.95	1.00	2.60	2.00	0.0000052	153.08
B1	67.60	1.38	1.00	3.00	2.00	0.0000060	112.67
B2	63.30	1.27	1.00	3.00	2.00	0.0000060	105.50
B3	69.80	1.48	1.00	3.00	2.00	0.0000060	116.33
C1	74.70	1.56	1.00	3.00	2.00	0.0000060	124.50
C2	71.60	1.59	1.00	3.20	2.00	0.0000064	111.88
C3	75.00	1.56	1.00	3.00	2.00	0.0000060	125.00
Promedios	70.46	1.46					119.38

1	52.10	0.69	1.00	3.00	2.00	0.0000060	86.83
2	43.00	0.59	1.00	3.00	2.00	0.0000060	71.67
3	85.30	2.08	1.00	3.00	2.00	0.0000060	142.17
4	69.90	1.52	1.00	3.00	2.00	0.0000060	116.50
5	77.90	1.26	1.00	2.90	2.00	0.0000058	134.31
6	74.30	1.20	1.00	3.00	2.00	0.0000060	123.83
7	65.10	1.22	1.00	3.00	2.00	0.0000060	108.50
8	75.50	1.31	1.00	3.00	2.00	0.0000060	125.83
9	80.70	2.02	1.00	3.00	2.00	0.0000060	134.50
Promedios	69.31	1.32					116.02

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

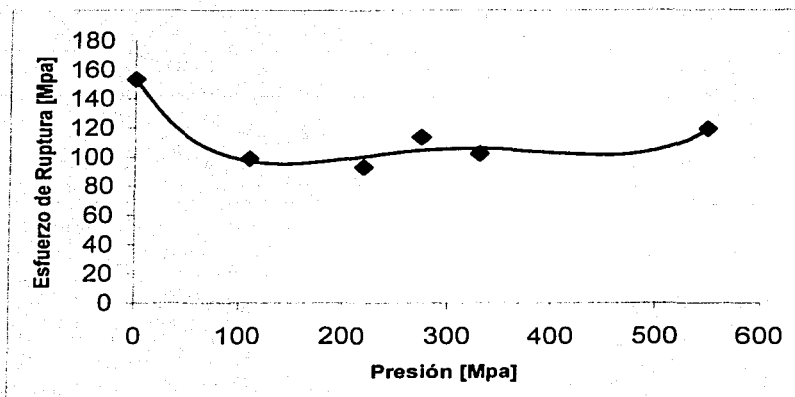


Figura 6.1 Esfuerzo de ruptura vs presión de solidificación (microprobetas longitudinales)

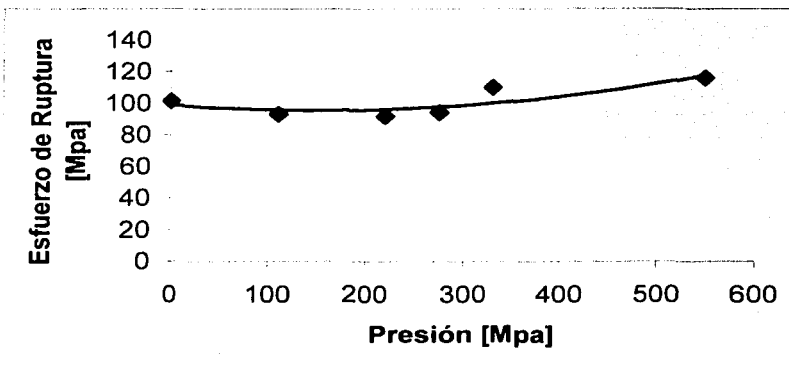


Figura 6.2 Esfuerzo de ruptura vs presión de solidificación (microprobetas transversales)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

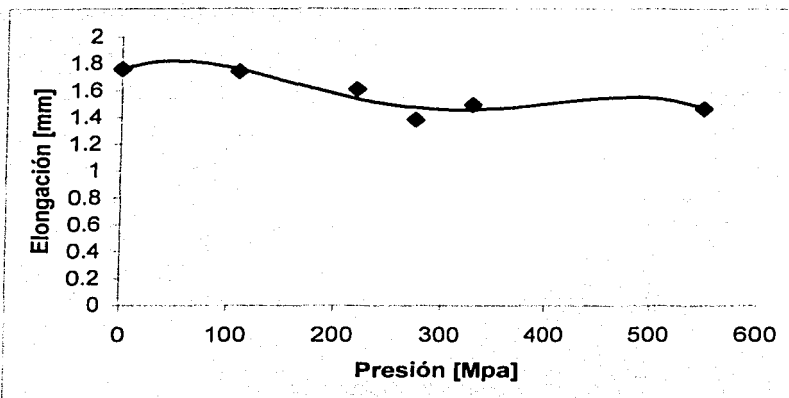


Figura 6.3 Elongación vs presión de solidificación (microprobetas longitudinales)

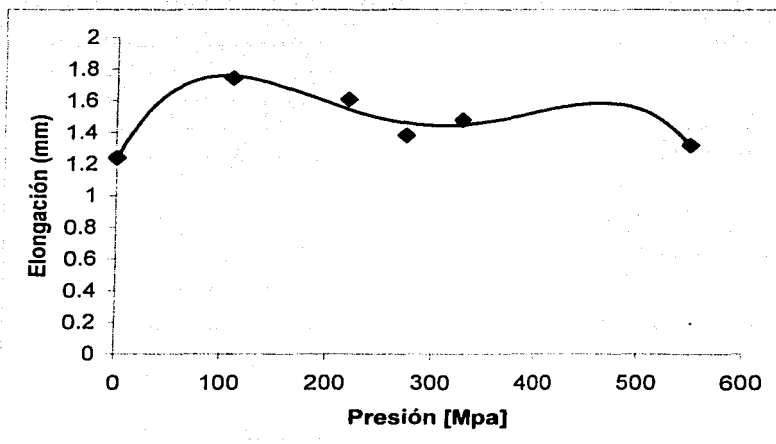


Figura 6.4 Elongación vs presión de solidificación (microprobetas transversales)

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

6.3 ENSAYOS DE DUREZA

Como se mencionó en el apartado 5.12 se midió la dureza Rockwell F (con indentador de bola de acero de 1/16 de pulgada de diámetro y una carga de 60 kg) y se practicaron tres ensayos por probeta para obtener un promedio representativo por cada muestra.

Tabla 6.8 Mediciones de dureza

No. Probeta	Presión solidificación (Mpa)	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio Dureza
P02-A2	0	71.8	74.8	74.2	73.60
P22-A2	110	62.7	61.1	60.5	61.43
P13-A2	220	58.4	60.2	58.7	59.10
P08-A2	275	47.3	55.7	49.8	50.93
P18-A2	330	64	62.2	64.5	63.57
P16-A2	440	68.7	71.2	69	69.63
P06-A2	550	67.9	66	67	66.97

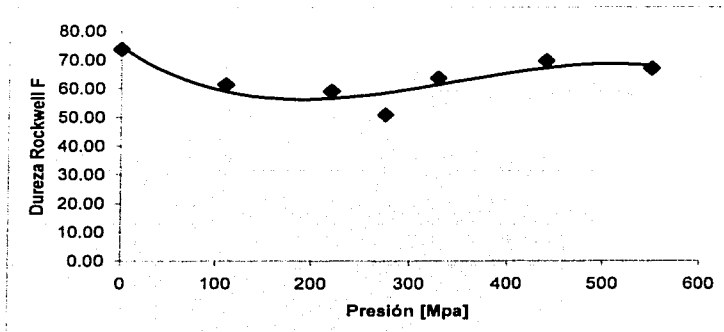


Figura 6.5 Dureza vs presión de solidificación

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

6.4 MACROESTRUCTURA

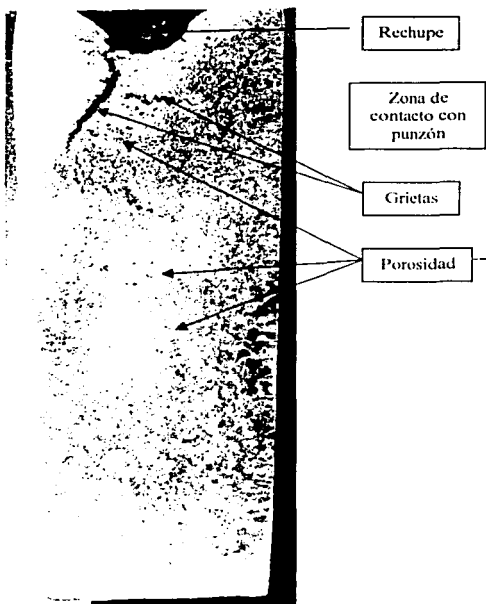


Figura 6.6 Macroestructura de probeta producida a 0 Mpa

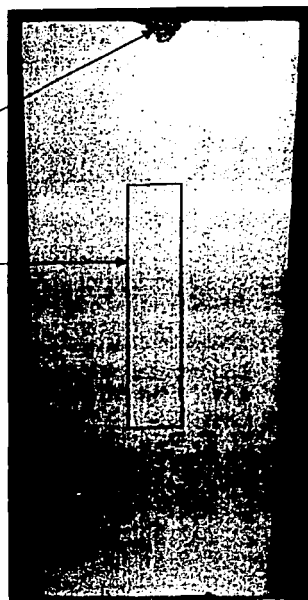


Figura 6.7 Macroestructura de probeta producida a 110 Mpa

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

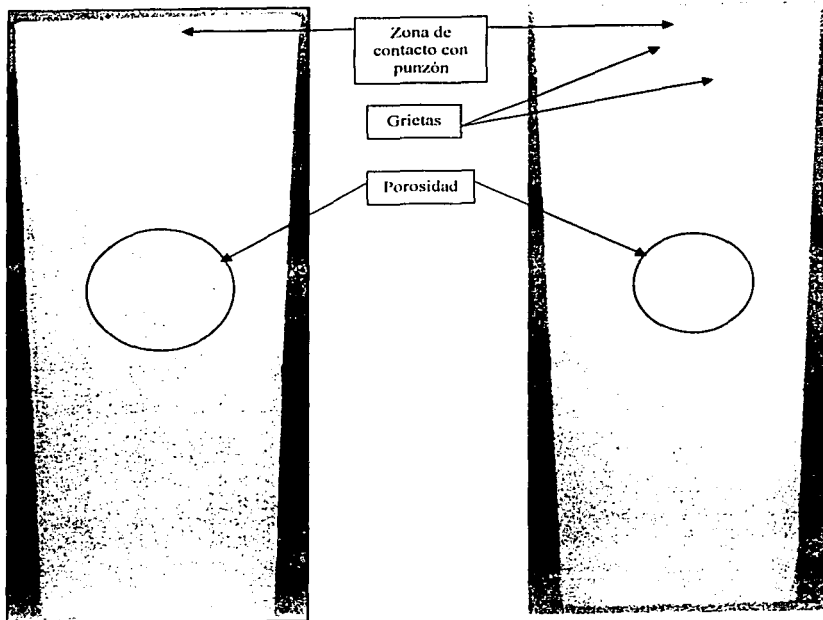


Figura 6.8 Macroestructura de probeta
producida a 220 Mpa

Figura 6.9 Macroestructura de probeta
producida a 275 Mpa

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

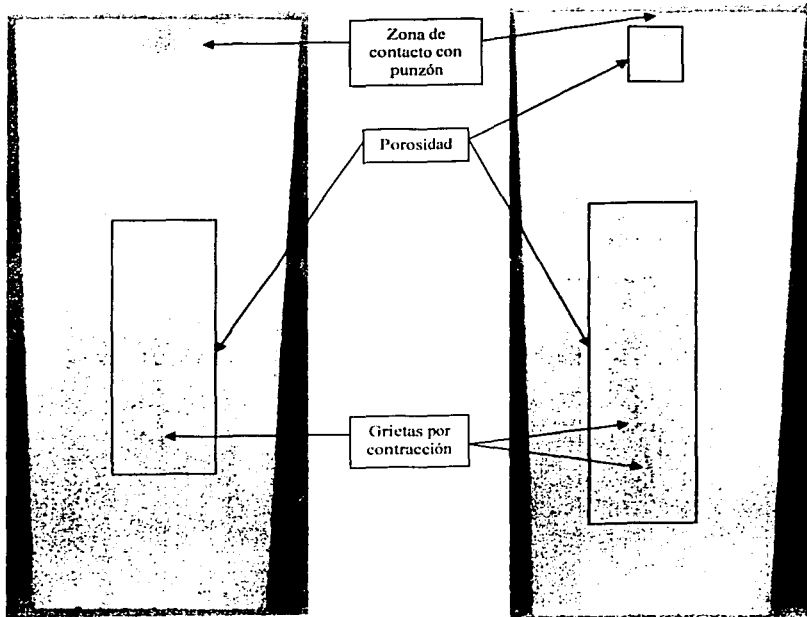


Figura 6.10 Macroestructura de probeta producida a 330 Mpa

Figura 6.11 Macroestructura de probeta producida a 440 Mpa

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

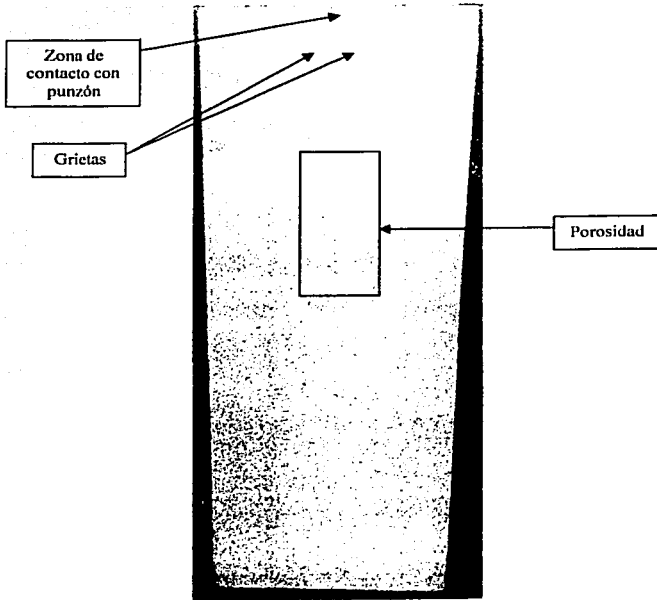


Figura 6.12 Macroestructura de probeta producida a 550 Mpa

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

6.5 MICROESTRUCTURA

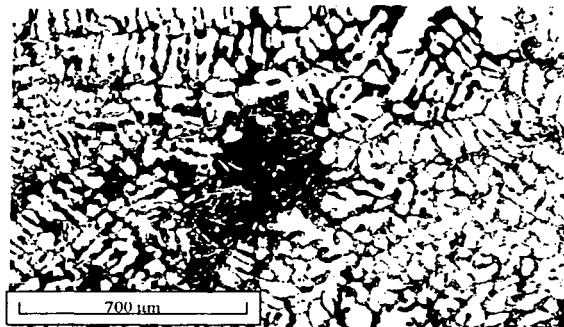


Figura 6.13 Foto a 100 X de probeta producida a 0 Mpa. Ataque con reactivo Keller.

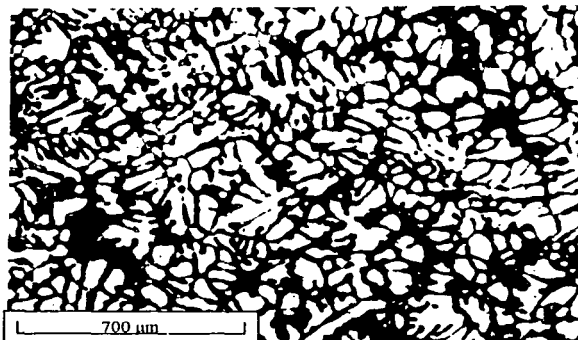


Figura 6.14 Foto a 100 X de probeta producida a 110 Mpa. Ataque con reactivo Keller.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

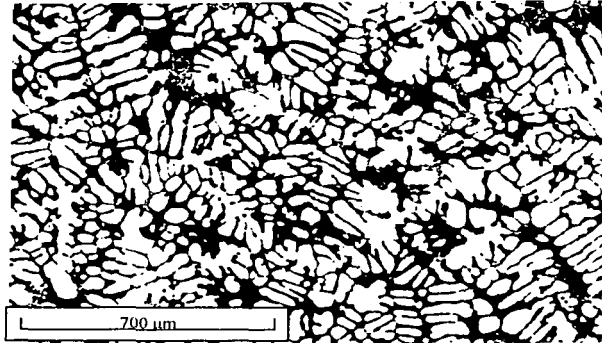


Figura 6.15 Foto a 100 X de probeta producida a 220 Mpa. Ataque con reactivo Keller.

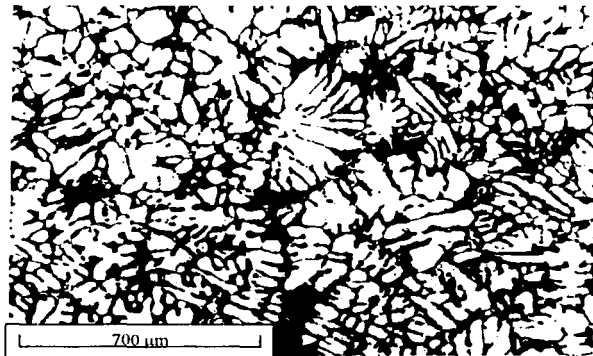


Figura 6.16 Foto a 100 X de probeta producida a 275 Mpa. Ataque con reactivo Keller.

ENSAYO CON
FALLA DE ORIGEN

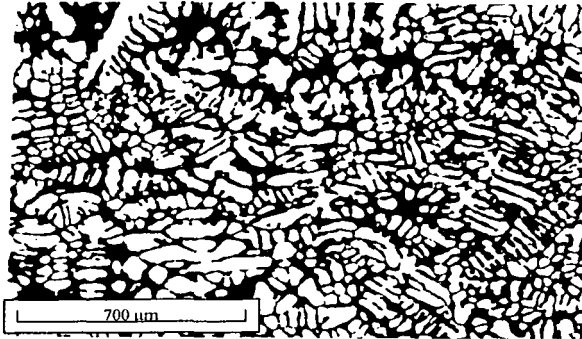


Figura 6.17 Foto a 100 X de probeta producida a 330 Mpa. Ataque con reactivo Keller.

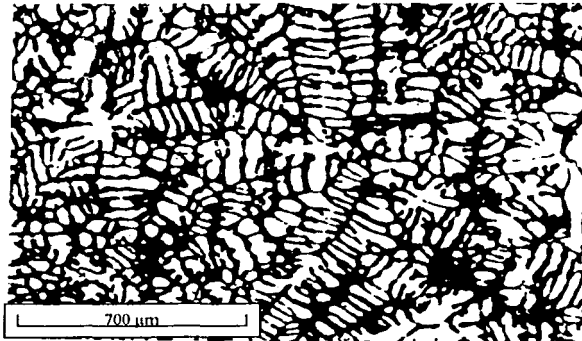


Figura 6.18 Foto a 100 X de probeta producida a 440 Mpa. Ataque con reactivo Keller.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Figura 6.19 Foto a 100 X de probeta producida a 550 Mpa. Ataque con reactivo Keller.

6.6 SUPERFICIES DE FRACTURA

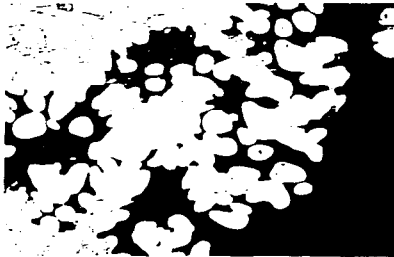


Figura 6.20 Foto a 140 X en zona de fractura de probeta a 0 Mpa

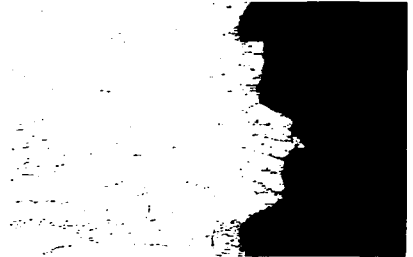


Figura 6.21 Foto a 140 X en zona de fractura de probeta a 110 Mpa

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Figura 6.22 Foto a 140 X en zona de fractura de probeta a 220 Mpa



Figura 6.23 Foto a 140 X en zona de fractura de probeta a 440 Mpa



Figura 6.24 Foto a 140 X en zona de fractura de probeta a 550 Mpa

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

6.7 ASPECTO SUPERFICIAL

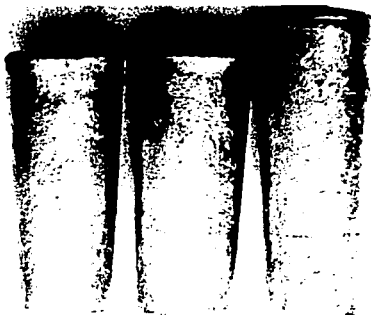


Figura 6.25 Probetas producidas a 0 Mpa



Figura 6.26 Probetas producidas a 550 Mpa

6.8 ANÁLISIS DE RESULTADOS

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En las condiciones en que se llevaron a cabo los experimentos no se observó una mejora en las propiedades mecánicas estudiadas (resistencia a la tensión y dureza) al aplicar el proceso de la fundición prensada. A continuación se intentará encontrar una explicación del por qué de los resultados.

Resistencia a la tensión vs presión de solidificación. En la figura 6.1 inicialmente se ve una disminución del esfuerzo de ruptura y después de los 110 Mpa se observa una tendencia casi lineal que indica que en los experimentos realizados no se mejoró la resistencia a la tensión.

En la figura 6.2 se observa un ligero aumento (14%) del esfuerzo de ruptura comparando la probeta de 0 Mpa con la de 550 Mpa. Pero la tendencia de la gráfica es más bien lineal y el ligero aumento del esfuerzo de ruptura no es muy significativo.

Elongación vs presión de solidificación. El valor de la elongación que se obtuvo de la máquina universal de ensayos se utiliza como un valor para comparar la ductilidad de las muestras ya que todas ellas tenían prácticamente las mismas medidas.

En la figura 6.3 se observa que la elongación (ductilidad) disminuyó ligeramente con la presión aplicada. En la figura 6.4 hubo sí se presentó aumento de la ductilidad teniéndose el mayor valor a los 110 Mpa.

Macroestructura. Tal vez en las fotografías no se aprecie bien la porosidad o los granos por lo que las zonas donde físicamente las probetas tienen porosidad se encerró en un rectángulo.

Probeta a 0 Mpa (figura 6.6). Es muy evidente la contracción (rechupe) en la parte superior de la probeta. También en la misma zona se observan grietas por contracción y alta concentración de porosidad. También se observan poros en la parte central. También se observan granos gruesos equiaxiales.

Probeta a 110 Mpa (figura 6.7). Se observan microporos sobre todo sobre el eje longitudinal de la pieza en su parte central. Los poros son más pequeños que los encontrados en la probeta a 0 Mpa. También en la parte superior central se ve un pequeño cono de tonalidad más oscura que el resto de la probeta el cual es consecuencia de un punzón no calentado a la temperatura adecuada y que muy posiblemente la solidificación haya comenzado antes de que se aplicara la presión.

Probeta a 220 Mpa (figura 6.8). Se observa una zona en el centro con baja densidad de microporos (más pequeños que los de la probeta a 0 Mpa). También se observa una incrustación en forma de cono en la parte superior central lo que indica baja temperatura de

punzón y que muy posiblemente en este caso también la solidificación haya comenzado antes de aplicar la presión.

Probeta a 275 Mpa (figura 6.9). Se observan dos microgrietas en la parte superior que indican un rechupe incipiente, esto pudo originarse porque la presión no se aplicó el tiempo suficiente. También se observa microporosidad en la parte central. En la parte superior central se observa la incrustación cónica que en los casos anteriores con la misma explicación.

Probeta a 330 Mpa (figura 6.10). Se observa microporosidad sobre el eje longitudinal la la sección media. También se ve en la parte superior central la incrustación cónica que ya se ha comentado. En el tercio inferior se ve una microgrieta que puede indicar que la presión no se mantuvo el tiempo suficiente durante la solidificación.

Probeta a 440 Mpa (figura 6.11). Se observa porosidad en la parte superior, microporosidad en la zona media y dos microgrietas en el tercio inferior. Estas grietas nuevamente indican que posiblemente la presión no se mantuvo el tiempo suficiente durante la solidificación.

Probeta a 550 Mpa (figura 6.12). Se observa microporosidad sobre el eje longitudinal cerca del centro así como 2 microgrietas por rechupe incipiente en la parte superior lo que nuevamente indica que no se mantuvo la presión el tiempo suficiente durante la solidificación. Se observa en la parte superior central una pequeña incrustación cónica que indica que el punzón no estaba a la temperatura requerida y que muy posiblemente la solidificación haya comenzado antes de aplicar la presión.

En todas las piezas se encontró una estructura de granos equiaxiales (no se ven claramente en las fotografías pero se alcanzan a ver físicamente en las probetas.

En todas las piezas se encontró porosidad o microporosidad en distintos grados. La porosidad muy probablemente se debe a la disminución de la solubilidad del hidrógeno en el aluminio al solidificar y dicho gas es retenido en la pieza.

Con el rango de presiones utilizadas se logró eliminar el rechupe que se presentó en la probeta de 0 Mpa pero no se pudo eliminar la porosidad.

La presencia de la porosidad es muy probablemente uno de los causantes de que las propiedades mecánicas estudiadas no hayan presentado una mejora significativa con el proceso de la fundición prensada.

También se observó en todas las probetas a las que se les aplicó presión (excepto la de 440 Mpa) una incrustación cónica en la parte superior central. Como ya se comentó dicha formación se debe a la posibilidad de que el punzón no estaba a la temperatura adecuada (con el consiguiente choque térmico con el metal fundido) para comprimir al metal líquido y que muy posiblemente la solidificación comenzó antes de que se aplicara la presión.

El hecho de que el metal haya comenzado a solidificar antes de aplicar la presión indica dos aspectos: 1) El tiempo transcurrido entre el final del vaciado y la aplicación de la presión (alrededor de 20 segundos) fue excesivo. 2) el molde estaba a una temperatura inferior a la requerida lo que propicio una solidificación más rápida.

Por el equipo con el que se realizaron los experimentos no pudo controlarse adecuadamente la temperatura del molde y punzón. Con el soplete se obtuvo un calentamiento no uniforme del molde ya que solo se realizó por un lado del molde por lo que es muy probable que no se haya alcanzado en todo el molde la temperatura de precalentamiento necesaria.

También es posible que por la falta de uniformidad del calentamiento del molde la parte superior del mismo haya estado a menor temperatura que la parte inferior (la flama estaba dirigida hacia la parte inferior del molde), lo que aunado a un punzón frío motivó que la solidificación comenzara en la parte superior de la pieza por lo que eso dificultó aún más el escape del gas hidrógeno que contribuyó a la formación de la porosidad.

En las probetas de 275, 330, 440, 550 Mpa se observaron microgrietas que posiblemente indican que el tiempo que se aplicó la presión durante la solidificación no fue suficiente, o

bien que el material estaba en un estado físico tal que el nivel de presión no fue suficiente para lograr "sellar" o compactar perfectamente cualquier defecto de este tipo presente.

Microestructura. En general se encontró una estructura dendrítica con cristales de silicio en el espacio interdendrítico lo cual se debe a que se trata de una aleación hipoeutéctica donde primero solidifican las dendritas de aluminio (con una cierta solubilidad limitada de los átomos de silicio) y al final se forman los cristales de silicio que se acomodan entre las dendritas.

Probeta a 0 Mpa (figura 6.13). Se observa estructura dendrítica. Se ve una contracción (rechupe) con cristales de silicio en su interior. También se observan los cristales de silicio en el espacio interdendrítico. No existe orientación de dendritas.

Probetas de 110, 220, 275, 330, 440 y 550 Mpa (figuras 6.14 a 6.19) En general se observa una estructura dendrítica no orientada en ninguna dirección. También se observan cristales de silicio colocados en el espacio interdendrítico.

Superficies de fractura. En las figuras 6.20 a 6.24 se observa que la fractura, generada en los ensayos de tensión, pasa entre las dendritas, es decir que se propaga sobre los espacios interdendríticos los cuales son ricos en cristales de silicio, y no sobre los granos.

Aspecto superficial. En las figuras 6.25 y 6.26 puede observarse como se logró una mejora en el aspecto superficial de las piezas al aplicar presión. Aunque en las fotos se comparan probetas a 0 Mpa con probetas a 550 Mpa, en realidad se observó una mejora considerable en la apariencia superficial de las probetas desde los 110 Mpa.

7.1 CONCLUSIONES

1. En las condiciones en que se llevaron a cabo los experimentos no se observó una mejora en las propiedades mecánicas estudiadas (resistencia a la tensión y dureza) al aplicar el proceso de la fundición prensada en el rango de presiones utilizado. Pero a pesar de lo anterior se obtuvieron resultados interesantes que permitirán tomarlos como referencia para futuros trabajos del tema. El porqué no se observó una mejora en las propiedades mecánicas se explica a continuación.
2. A pesar de la presión aplicada no se pudo eliminar la porosidad de las piezas lo cual no favoreció el mejoramiento de las propiedades mecánicas estudiadas, por lo que es conveniente practicar el desgasado del metal antes de verterse en el molde. Cualquiera de los métodos de desgasado podría funcionar (fundición-enfriado-fundición, burbujeo con gas inerte, desgasificador sólido o aplicación de vacío) pero por economía y facilidad de aplicación se recomienda practicar el desgasificado con burbujas de gas inerte o un desgasificador sólido.
3. Es factible que al aplicar la presión ya haya existido algún grado de solidificación en el metal lo cual no favoreció la mejora de las propiedades mecánicas estudiadas ya que los mejores resultados se obtienen cuando la presión se aplica antes de que el metal comience a solidificar. Aunque se usaron termopares para controlar la temperatura del metal vertido, fue difícil controlar la temperatura del molde-punzón (por el método de precalentamiento con soplete), además el tiempo transcurrido entre el final del vertido y la aplicación de la presión fue de aproximadamente 20 segundos (no se pudo disminuir este tiempo por las limitantes de la prensa utilizada). Estos factores pudieron provocar que al aplicar presión haya existido algún grado de solidificación.
4. El método utilizado para precalentar el molde y punzón no fue efectivo ya que no permitió una distribución uniforme de temperaturas lo que pudo haber ocasionado que en la parte superior del molde la temperatura fuera menor que en la parte inferior.

(donde se aplicó la flama) lo que contribuyó a que muy posiblemente la solidificación haya comenzado en la parte superior del molde lo que a su vez contribuyó a que no se dejara escapar el gas contenido en el metal líquido.

5. El calentamiento del molde no alcanzó la temperatura de una manera uniforme necesaria para impedir que el metal comenzara a solidificar antes de que se aplicara la presión lo cual ocasionó una solidificación prematura.
6. El punzón tampoco se calentó a una temperatura adecuada lo que ocasionó choque térmico con el metal con el que entró en contacto, además de que favoreció a que la solidificación comenzara en la parte superior del molde siendo que lo deseable sería que el último lugar en solidificar fuera la parte superior para así poder suministrar metal líquido a las contracciones que se formen en los niveles inferiores.
7. Transcurrió más tiempo del necesario entre el final del vaciado y la aplicación de la presión; debido a una velocidad lenta en la máquina hidráulica de ensayos, lo cual no se pudo corregir por ser una máquina de ensayos mecánicos muy antigua (Tinus-Olsen); lo que pudo ocasionar que el metal haya comenzado su solidificación antes de que se aplicara la presión. Para prevenir la solidificación prematura del metal se debe disminuir el tiempo entre el final del vertido y la aplicación de la presión, tanto como sea posible. Es muy probable que al aplicar la presión ya haya existido cierto grado de solidificación.
8. Es posible que el tiempo por el cual se mantuvo la presión no haya sido suficiente ya que se observaron microgrietas por contracción en algunas probetas.
9. La estructura que se forma es dendrítica con cristales de silicio en los espacios interdendríticos y la fractura se propaga por dichos espacios interdendríticos y no a través de los granos.

10. Las probetas a las que se les aplicó presión durante la solidificación mostraron una superficie exterior más tersa que las que se produjeron sin aplicar presión, además de que se eliminó el "rechupe" en la parte superior que presentaron todas las probetas fabricadas a 0 Mpa. La mejora de la apariencia se dio desde los 110 Mpa.

11. Si observamos las muestras obtenidas bajo presión, podemos opinar que se tendría un mayor rendimiento de material aprovechable en procesos posteriores de conformado en frío (como la forja), en comparación con las muestras obtenidas a presión atmosférica en las que una proporción importante (la parte superior) del material tendría que desecharse por presentar un excesivo "rechupe" o cavidad por contracción.

12. El éxito en la aplicación del método de fundición prensada es muy sensible a las temperaturas de precalentamiento de molde y punzón, temperatura de vertido, tiempo transcurrido entre el final del vaciado y la aplicación de la presión, el tiempo durante el cual se aplica la presión y el contenido de gases disueltos en el metal, por lo que estas son las principales variables a controlar para aprovechar completamente los beneficios de la fundición prensada.

7.2 RECOMENDACIONES PARA FUTUROS TRABAJOS

1. Practicar algún método para eliminar los gases disueltos en el metal líquido antes de que éste sea vertido.

2. Para el precalentamiento del molde y punzón utilizar un horno por resistencia eléctrica de dos partes que se pueda colocar y retirar fácilmente alrededor del ensamble molde – punzón, para lograr un calentamiento uniforme.

3. Aumentar la temperatura de precalentamiento del molde y punzón a 400 °C para disminuir el gradiente de temperaturas con el metal líquido y retrasar la solidificación.

4. Disminuir el tiempo transcurrido entre el final del vaciado y la aplicación de la presión a menos de 20 segundos y de ser posible que la presión se aplique casi simultáneamente al final del vaciado para prevenir la solidificación prematura, para lo cual se puede aumentar la velocidad de acercamiento del punzón al molde.
5. Aplicar presión durante la solidificación por más de 90 segundos para tratar de eliminar las microgrietas por contracción que se da en las etapas tardías de la solidificación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Rajagopal, S. "Squeeze Casting: A Review and Update", (del libro J. Applied Metal Working, vol I, núm. 4), Chicago, Illinois, American Society for Metals, 1981.
- [2] Kaneko, Y. / Et. Al. "Squeeze Casting of Aluminum". (presented as paper at the 10th Society of Die Casting Engineers, International Die Casting Conference, St. Louis, Mo, 1979).
- [3] Franklin, J.R. / Et. Al. "Squeeze Casting, a Review of the Status", (Loughborough University of Technology, Department of Engineering Production), s.f.
- [4] Martínez, J.A., "Estructura Metalúrgica de una Aleación de Aluminio Solidificada Bajo Presión", Cuautitlán Izcalli, Edo. De México, 1993 (Tesis Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM).
- [5] Lynch, R.F. / Et. Al. "Squeeze Casting of Aluminum", s.l., American Foundry Society, s.f.
- [6] Doyle, L.E. / Et. Al. "Materiales y Procesos de Manufactura para Ingenieros", México, Ed. Prentice Hall, 1988 (3^a. Ed.)
- [7] Ortiz, A. "Apuntes Facultad de Ingeniería, Procesos de Conformado de Materiales", Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria, México, D.F.
- [8] Baumeister, T. / Et. Al., "Marks, Manual del Ingeniero Mecánico", México, ed. Mc. Graw Hill, 1992 (8va. Ed.)
- [9] Herrera, M. C., "Estructura y Propiedades de un Latón Solidificado Bajo Presión", México, D.F., 1994 (Tesis Facultad de Química, UNAM).
- [10] Taylor, H.F. / Et. Al. "Foundry Engineering", E.U., ed. John Wiley and Sons, 1966.
- [11] Askeland, D.R., "Ciencia e Ingeniería de los Materiales", México, International Thomson Editores, 1998 (3ra. Ed.)
- [12] Kehl, G.L. "The Principles of Metallographic Laboratory Practice", E.U., ed. Mc. Graw-Hill, 1949.
- [13] American Society for Metals, "Metals Handbook", (Desk Edition), E.U., 1985.
- [14] Anderson, R.C. "Destructive Testing", (de la colección Inspection of Metals, vol. 2, ASM International, Ohio, 1988).
- [15] Benedyk, J.C. "Squeeze Casting", (presentes at the 6th International Die Casting Congress of the Society of Die Casting Engineers, Cleveland, Ohio, 1970).

- [16] Bradley, E.F., "High Performance Castings. A Technical Guide", E.U., ASM International, 1989.
- [17] Brown, J.R. / Et. Al. "Second Report of The Institute Working Group T20 Casting Processes, The Squeeze Casting Process", rev. Foundryman, vol. 87, nov. 1994.
- [18] Campbell, J. "Castings", England, ed. Butterworth-Heinemann, 1991.
- [19] Clegg, A.J., "Precision Casting Processes", Great Britain, Pergamon Press, 1991.
- [20] Chatterjee, S. / Et. Al. "Some Observations on the Effect of Pressure on the Solidification of Al-Si Eutectic Alloys", Loughborough University of Technology, Department of Engineering Production, s.f.
- [21] Eco, Umberto, "Cómo se Hace una Tesis", México, Ed. Gedisa, 2000.
- [22] Espinoza, Oscar, "Proceso de Fundición Prensada", México, D.F., 1991 (Tesis Facultad de Ingeniería, UNAM).
- [23] Flinn, R.A. / Et. Al., "Materiales de Ingeniería y sus Aplicaciones", Colombia, ed. Mc Graw Hill, 1989 (3ra. Ed.)
- [24] Grupo Editorial Norma, S.A., "Gran Enciclopedia Eicisa", Colombia, Ediciones Culturales Internacionales, 2002.
- [25] Heine, R.W. / Et. al. "Solidification of Metals", E.U., Ed. Mc. Graw Hill, 1967.
- [26] Herrera, A. / Et. al. "Direct Squeeze Casting of Copper Alloys", AFS Transactions.
- [27] King, F. "El Aluminio y sus Aleaciones", México, D.F., ed. Limusa, 1992.
- [28] Kondic, V. "The Origin and Significance of Grain Structure in Sand Castings", (presentado en el congreso Internacional de Fundición, Madrid, oct., 1959, y publicado por The British Foundryman, dic., 1959).
- [29] Rolland, T. / Et. Al. "Macroseggregation in Indirectly Squeeze Cast Al-0.9 wt% Si", rev. Materials Science and Engineering, Enero, 1996.
- [30] Tadayon, M.R. / Et. Al. "A Finite Element Model of the Squeeze Forming Process", rev. Cast Metals, Vol. 4, num. 2, 1991.
- [31] American Society for Metals. "Metals Handbook, vol. 9: Metallography and Microstructures". Ohio, E.U. 1985.
- [32] American Society for Metals. "ASM Handbook, vol. 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials". E.U. 1998.
- [33] American Society for Metals. "ASM Handbook, vol. 15: Castings". E.U. 1996.