

1126
90



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN

ESTUDIO DEL FENOMENO DE FLUIDEZ EN UNA ALEACION DE ALUMINIO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**INGENIERO MECANICO
ELECTRICISTA**

P R E S E N T A :

GREGORIO VAZQUEZ MUÑOZ

ASESOR: DR. ANDRES HERRERA VAZQUEZ

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



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.



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
 UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
 DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.
 FACULTAD DE ESTUDIOS
 SUPERIORES CUAUTITLAN
 DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES
 ASUNTO: VOTOS



DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
 DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
 P R E S E N T E

ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares
 Jefe del Departamento de Exámenes
 Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:

"Estudio del fenómeno de fluides en una aleación de aluminio"

que presenta el pasante: Gregorio Vázquez Muñoz
 con número de cuenta: 8904650-2 para obtener el título de :
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 25 de marzo de 2003

PRESIDENTE Ing. Ma. Soledad Alvarado Martínez

VOCAL Ing. Castillo Rodríguez Arciniega

SECRETARIO Dr. Andrés Herrera Vázquez

PRIMER SUPLENTE Ing. Jesús García Lira

SEGUNDO SUPLENTE Ing. Rolando Cortés Montes de Oca

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

DEDICATORIAS

Con la realización del presente trabajo me convierto, por decirlo de alguna manera, en el personaje principal del mismo, sin embargo, a lo largo de mi vida y de mi carrera profesional he conocida a tantas personas que de una u otra manera y según las circunstancias han hecho aportaciones importantes a mi formación personal y profesional, lo ideal sería mencionar a todos ellos, sin embargo es difícil determinar a quien y a quien no nombrar ya que cualquiera que haya hecho una aportación, no importa lo pequeña que sea, no deja de ser importante. Siguiendo este orden me sería necesario escribir un volumen semejante a este para mencionarlas a todas, aún con el riesgo de omitir a algunas de ellas. Pero dentro de este gran grupo existe un selecto grupo que destaca, principalmente, por estar conmigo desde principio, si, desde que nací, que han estado conmigo en los momentos tristes y alegres, en los buenos y en los malos y en los muy malos, cosa que es digna de destacar y con quienes he pasado los mejores momentos de mi vida, ellos son, por supuesto, mi familia, a quienes les dedico este trabajo por ser conmigo lo que han sido y serán, cuyos nombres y algunos detalles de sus vidas me permito mencionar a continuación.

Esperanza desde el día que presentaste tu examen profesional, fuiste para mi un modelo a seguir y un reto que yo también debía alcanzar. Gracias por tu apoyo, por tus consejos, tus enseñanzas, tu profesionalismo y seriedad para hacer las cosas, pero por sobre todo por lo mucho que me has hecho reír y por los momentos tan agradables que has creado en mi vida.

Juan de alguna manera y no sé como, siempre llegaste en el momento oportuno para apoyarme, escucharme y darme ánimo, porque siempre te has esforzado por entenderme y ponerte en mi situación, has sido como ese pequeño eslabón sin el cual las cosas no podrían continuar y es por eso que ahora comparto contigo este trabajo.

Pascual, Pascual, si hay alguien que siempre me hacía creer que las cosas podían suceder, eras tú. Gracias "Pas" porque siempre has hecho una diferencia en mi vida y porque con tu forma tan optimista y alegre de ser me has

C

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ayudado a enfrentar esos momentos difíciles que he tenido que vivir y me vuelves a recordar que las cosas que parecen difíciles pueden suceder.

Albina siempre que pienso puedo pensar que eres seria, inteligente, alegre, fuerte, etc., pero una cosa que más recuerdo de ti es tu entrega y dedicación a tu trabajo y estudio, siempre pensé que yo debería ser como tú si quería ser alguien en la vida, parece que los pequeños detalles no importan pero ese pequeño detalle me motivó siempre a seguir adelante.

Ramona muchas gracias por que sé que durante el tiempo que pasamos juntos siempre me cuidaste y te sentiste responsable de mi por ser mayor que yo, además por las muchas veces y formas en que me mostraste tu cariño y afecto que no voy a olvidarlos por la sinceridad y transparencia con que lo hiciste. Además de esas ganas y convicción que mostraste cuando querías lograr algo.

Francisco J. aunque eres más chico que yo has sido una gran ayuda para mí y mi carrera, gracias por todo tu apoyo que me has brindado y por querer hacer equipo conmigo para que yo pudiera salir de muchas complicaciones y apuros, solo me resta decirte que se siente muy bien estar aquí y que mi anhelo es que tú también lo puedas lograr, ánimo.

Sixta Muñoz Martínez, mi mamá, quiero decirte que siempre voy a recordar el día que por primera vez me llevó a la escuela y doy gracias a Dios por permitirme compartir el final de ella con usted, por que siempre se preocupó y animó para que siguiera adelante y por que mis desvelos fueron los suyos, mis tristezas y fracasos los cargo conmigo y mi alegría final ahora es también suya.

A la memoria de mi papá el señor Víctor Vázquez Rojas por forjar en mí carácter constancia, trabajo, dedicación, esfuerzo y coraje para poder lograr las cosas que uno quiere en la vida a pesar de las adversidades que se puedan presentar, por permitirme estudiar esta carrera y por sobre todo por ser el ejemplo y pilar de esta familia. Lamento que no estés aquí "papi" para mostrarte lo que hiciste en mi vida.

A toda una legión de sobrinos que tengo: Laura Azucena, Jesús Valente, Daniel Alexander, Paulina, Cintya Abigail, Juan Antonio, Erika Yuritzi, Kimberly,

0

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Víctor Hugo, Elizabeth, Ismael, Christian Josué, Noemí y Jocelyn Noemí, por mostrarme el tado sencillo, inocente, puro y alegre de la vida.

A mis cuñados: Araceli Mata García, Patricia Meza Torres, Primitivo Rojo Saldaña y Félix Rubio Chávez, por tener el "valor" de querer formar parte de esta familia.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer de una forma muy especial al Dr. Andrés Herrera Vázquez por su apoyo incondicional y visión para la realización de este proyecto de Tesis y más aún por su gran paciencia que tuvo para conmigo y por el ánimo y confianza que me dio cuando parecía que las cosas no resultaban. Gracias.

De la misma manera quiero agradecer al M. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez por haberme asesorado y apoyado en la parte final del trabajo experimental de este trabajo y por su sincero compromiso con la docencia e investigación.

A todos los Profesores y Maestros de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán porque durante mi paso por esta tuvieron el compromiso de enseñarme y transmitir todos sus conocimientos y experiencias para que pueda llegar a ser un profesionista de provecho a la sociedad. Gracias.

Al todo el personal de las diferentes instituciones y centros de investigación en los cuales se realizó este trabajo, sin cuya ayuda y colaboración no hubiera sido posible su realización.

Y aunque este al final pero bien sabe que es el primero, a Dios, por haberme salvado y limpiado a través de su Hijo Jesucristo, por darte sentido y propósito a mi vida y por que sin Él nada ni nadie sería posible, a Él quiero dedicarle todo lo que soy y todo lo que tengo, pues finalmente todo le pertenece.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

E

RESUMEN

Cuando un líquido esta en movimiento presenta una resistencia al flujo, esta resistencia es su viscosidad. Con el objeto de definir el inverso de la viscosidad los físicos emplearon el término "fluidez", mismo que consideraron una propiedad fundamental de los fluidos. Posteriormente los fundidores adoptaron este término y cambiaron su significado para definir una cualidad de los metales líquidos, definida como la habilidad que presenta un metal líquido para fluir cierta distancia a través de los pasajes de un molde antes de solidificar, la cual no es una propiedad fundamental del metal fundido, sino que es función de muchas constantes físicas y variables del equipo de prueba usado.

Cuando el metal se vierte en el molde, el comportamiento de estas constantes físicas y variables durante el proceso afectarán significativamente su fluidez y las características que adopte su estructura cristalina en su posterior solidificación y enfriamiento. Puesto que las propiedades mecánicas de un metal están íntimamente relacionadas con las características de su estructura cristalina, es importante tener un apropiado control y manejo de las variables involucradas para obtener piezas de fundición con una fluidez apropiada y con una estructura sana y libre de defectos con el mayor grado posible que resulten en un alto grado de calidad en sus propiedades mecánicas.

Con este propósito y para entender mejor el fenómeno de fluidez, muchos métodos prácticos y técnicas han sido desarrollados por diferentes investigadores, mismos que se han modificado y mejorado a partir de su forma original. Estas técnicas mejoradas y modificadas podrían adaptarse y estandarizarse en procesos de producción de piezas de fundición de las que se requiera un alto grado de calidad.

La presente tesis presenta el estudio realizado a una aleación aluminio-silicio (356), cuando, en su estado líquido, se vierte a diferentes temperaturas, con una presión igual a la atmosférica y en algunos casos con una presión mayor a esta en un molde de arena preparada por el proceso CO₂ y conocer el efecto que estas condiciones de vaciado y la variación de las mismas tienen en la fluidez del metal líquido y en las características de la estructura interna que adopta el metal y

F

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

su efecto en las propiedades mecánicas, en particular la resistencia a la tensión y la dureza. Para lo cual se realizaron nueve experimentos, cada uno de ellos a diferentes temperaturas, 5 de ellos con una presión igual a la atmosférica y 4 de ellos con una presión mayor a esta.

Llevados a cabo los experimentos de fundición se analizó y calculó la fluidez que presentó cada una de las piezas obtenidas. Posteriormente se les dio la forma adecuada para someterlas a una prueba de resistencia a la tensión y dureza. Finalmente se hizo un estudio metalográfico de las estructuras de fundición resultante.

Los resultados de las pruebas realizadas a cada una de las piezas obtenidas se compararon y se relacionaron con las condiciones bajo las cuales se obtuvo esa pieza, con el objeto de determinar bajo que condiciones de vaciado se obtuvieron los mejores resultados en la fluidez del metal líquido, estructura interna y propiedades mecánicas, a fin de poder determinar de forma aproximada que condiciones pudieran emplearse en un proceso de producción de piezas de fundición de una aleación aluminio-silicio.

El análisis de los resultados obtenidos también nos permitió conocer que condiciones contribuyeron en la baja calidad de las piezas obtenidas, por lo que nos da la pauta para poder modificar, quitar y emplear algunas condiciones que eviten estos resultados no deseados.

El presente trabajo puede extenderse para el estudio de cualquier material metálico que pueda emplearse en fundición y deja abierta la posibilidad de estudiar muchas variables y constantes que pueden influir en el comportamiento de un metal cuando se vierte en un molde. Además puede ayudarnos a estudiar todos aquellos problemas que se presentan en los procesos de fundición tales como llenado incompleto del molde, porosidad, cavidades por un encogimiento excesivo, acabado superficial defectuoso, inclusión de partículas no deseadas, propiedades mecánicas deficientes, etc.

INDICE

RESUMEN

CAPITULO I.- INTRODUCCION

1.1	Fluidos y Viscosidad.....	1
1.2	Fluidez.....	2
1.3	Las variables.....	2
1.3.1	Propiedades inherentes del metal.....	3
1.3.2	Propiedades extrínsecas del metal.....	3
1.3.3	Variables del equipo de prueba.....	4

CAPITULO II.- REVISION DE LITERATURA

2.1	Historia de las pruebas de fluidez.....	5
2.2	El espiral para pruebas de fluidez.....	5
2.3	Resultados experimentales de otros trabajos de investigación...	13
2.4	El sistema Aluminio-Cobre.....	14
2.5	Otros métodos usados para la medida de la fluidez de metales fundidos.....	16
2.6	Aluminio y Zinc de alta pureza y comercialmente puros.....	19
2.7	El sistema Al – Cu.....	19
2.8	El sistema Al – Si.....	20

CAPITULO III.- CARACTERISTICAS Y DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE ALIMENTACION

3.1	Características esenciales de los sistemas de alimentación.....	23
3.2	Diseño de los sistemas de alimentación.....	25

CAPITULO IV.- EL FENOMENO DE SOLIDIFICACION EN METALES Y ALEACIONES

4.1	Estados de la materia.....	30
4.2	Mecanismo de cristalización.....	30
4.3	Imperfecciones del cristal.....	34

4.4	Macrodefectos en piezas coladas.....	36
4.5	Procesos de fundición que emplean moldes aislantes.....	38
4.6	Flujo de metal en el canal de llenado.....	44
4.7	Solidificación en ensayos de fluidez.....	45

CAPITULO V.- TRABAJO EXPERIMENTAL

5.1	Fabricación del modelo para el ensayo de fluidez.....	52
5.2	Preparación de los moldes para las pruebas de fluidez.....	53
5.3	La fundición.....	54
5.4	Desarrollo del experimento.....	54
5.5	Ensayos de tensión.....	54
5.6	Pruebas de dureza.....	55
5.7	Metalografía.....	55

CAPITULO VI.- RESULTADOS

6.1	Piezas de fundición obtenidas de los ensayos de fluidez.....	57
6.2	Ensayos de tensión.....	61
6.3	Ensayos de dureza.....	65
6.4	Metalografías.....	67

CAPITULO VII.- DISCUSION DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES..... 71

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS..... 74

1.- INTRODUCCION

En la mayoría de los procesos de fundición, el metal fundido es transferido de un contenedor a un molde diseñado con un sistema de pasajes por los que fluirá el metal. Cuando el metal líquido se vierte en el molde, como resultado de su presión hidrostática, empieza a fluir a través del diseño detallado de las cavidades del molde adaptándose a ellos. La distancia recorrida por el metal esta determinada por el tiempo que la temperatura del extremo de la corriente alcanza el valor en que la energía cinética del líquido que fluye es insuficiente para vencer las fuerzas que se oponen al flujo. En esta etapa son las fuerzas viscosas las que principalmente se oponen al flujo. La técnica empleada para el vaciado del metal, el comportamiento de su solidificación y enfriamiento influenciarán el flujo del metal, la forma que su estructura cristalina adopte y algunas veces la composición del sólido que se forma.

Un aspecto importante y en ocasiones descuidado de los procesos de fundición es el flujo del fluido o la "fluidez" del metal líquido.

1.1 Fluidos y viscosidad.

Desde el punto de vista de la mecánica de fluidos la materia solo puede presentarse en dos estados: sólido y fluido. Un sólido puede resistir un esfuerzo cortante con una deformación estática; un fluido no. Cualquier esfuerzo cortante aplicado a un fluido no importa cuan pequeño sea, provocará el movimiento del fluido. Este se mueve y deforma continuamente mientras se siga aplicando el esfuerzo cortante.

Dada la definición de fluido, es sabido que existen dos clases de fluidos, líquidos y gases. Las moléculas de un gas están muy separadas entre sí, con fuerzas cohesivas despreciables, por lo que es libre de expandirse hasta que encuentra paredes que lo confinan. Un gas no tiene volumen definido y por si mismo, sin confinamiento, forma una atmósfera que es esencialmente hidrostática. Un líquido, al estar compuesto por agrupaciones de moléculas muy cercanas entre si con enormes fuerzas cohesivas, tiende a conservar su volumen y formará una

superficie libre en el campo gravitatorio si no esta limitado por arriba. Cuando un liquido esta sometido a un esfuerzo cortante se deforma y mueve continuamente, mientras se mueve presenta una resistencia al movimiento como, esta resistencia es su viscosidad.

La viscosidad tiene que ver con la facilidad con la que moléculas individuales del liquido pueden moverse unas respecto a otras; por tanto depende de las fuerzas de atracción entre las moléculas y de la existencia de características estructurales que pudieran hacer que las moléculas se enreden. La viscosidad disminuye al aumentar la temperatura porque a temperaturas más altas el aumento en la energía cinética de las moléculas vence más fácilmente las fuerzas de atracción entre ellas.

1.2 Fluides

Con el objeto de definir el inverso de la viscosidad los fisicos emplearon el término "fluides" y lo consideraron una propiedad fundamental de los liquidos, posteriormente los fundidores adoptaron este término de los fisicos y cambiaron su significado para describir una cualidad de los metales fundidos. Así, en sentido de fundición, la fluides es la habilidad de un metal fundido que le permite fluir cierta distancia a través de los pasajes de un molde antes de solidificarse, el valor de la distancia fluida o recorrida es la medida de su fluides. Los valores de la fluides así obtenidos no son una constante fisica fundamental del metal, sino una función de muchas constantes físicas y variables del equipo de prueba usado.

Se entiende que esta "fluides" no es una propiedad fundamental del metal liquido sino un término de fundición que se va a usar en este estudio en un sentido más amplio.

1.3 Las variables.

Dada la definición de fluido y viscosidad podríamos pensar, a primera instancia, que la viscosidad y la temperatura predominaran en el comportamiento de la fluides de los metales fundidos, pero se sabe que la fluides es una función de

muchas constantes físicas, de las que la viscosidad y la temperatura son sólo algunas, y de las variables del equipo de prueba usado. Las variables que afectan la fluidez pueden clasificarse en tres amplios grupos:

1.3.1 Propiedades inherentes del metal

Las propiedades intrínsecas del líquido que tienen efectos significativos en su fluidez son contenido de calor (entalpía), composición, tensión superficial y viscosidad. La fluidez varía directamente con el contenido de calor medido en términos del sobrecalentamiento. Estudiando el efecto de la composición en la fluidez, resulta que la fluidez es inversamente proporcional al intervalo de solidificación según su composición. Las variaciones en la tensión superficial debieran afectar la fluidez de un metal, sin embargo, resulta ser poco.

La pregunta de si la fluidez es o no sensible a la viscosidad ha sido tema de mucha discusión. Algunos investigadores consideraron que la viscosidad no tiene efecto, mientras que otros opinaron lo contrario. Estas opiniones se basan en resultados experimentales.

1.3.2 Propiedades extrínsecas del metal.

Gases disueltos, películas de óxido superficiales e impurezas insolubles pueden afectar la fluidez. Los gases disueltos pueden cambiar las propiedades físicas del metal como la viscosidad o proveer cizallamiento mecánico cuando el gas sale de la solución durante la solidificación. Las propiedades de las películas de óxido que deben considerarse son la fuerza y gravedad específica de la película y si la película es sólida o líquida a la temperatura de colado. Una película sólida de óxido puede formar una envoltura continua alrededor de la corriente y restringir su flujo, o la película puede precipitarse aparte y mezclarse con la corriente en movimiento la que podría incrementar la viscosidad efectiva. Se ha encontrado que las películas sólidas incrementan la fluidez y las películas líquidas la disminuyen.

1.3.3 Variables del equipo de prueba.

Entre las variables de prueba importantes están la forma del canal, el diseño del "amortiguador", moldeado de los materiales y la proporción de vaciado. La fluidez varía inversamente en relación al perímetro del área de la sección transversal del canal. En cuanto al amortiguador, ha demostrado que bajo condiciones similares de vaciado diferentes diseños de amortiguador dieron valores de fluidez que variaron por lo mucho como uno o dos factores. La difusión térmica del material del molde, temperatura del molde y velocidad de vaciado influyen la fluidez. La longitud de metal solidificado en el canal varía directamente con la presión aplicada por la altura de caída.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.- REVISION DE LITERATURA

2.1 - Historia de las pruebas de fluidez.

T. D. West⁽¹⁾ en 1898 fue el primer investigador en reportar acerca de las propiedades de metales fundidos vertidos dentro de moldes de arena. El fundió metal dentro de una cuña horizontal y consideró la distancia fluida como una medida de la fluidez. Lebedure⁽²⁾ en 1904, Sexton y Primrose⁽²⁾ en 1911 y Moldenke⁽³⁾ en 1917 modificaron un poco la cuña de prueba.

Ruff⁽⁴⁾ "corrió" metal en un canal cilíndrico largo y usó la longitud fluida en el canal como su valor de fluidez. Esta prueba fue particularmente propensa a errores de nivelación. Evans⁽⁵⁾ ensayó un tipo de prueba en forma de "U" en la que usó varias secciones verticales con secciones transversal de diferentes áreas alimentadas desde un canal común. Las alturas a las que el metal se elevó en las diferentes secciones es una medida de la fluidez.

El familiar espiral de fluidez fue ensayado primero por Saito y Hayashi⁽⁶⁾ en 1919. Su canal fue enrollado dentro de un espiral con lo que simplificaron problemas de manejo y nivelación. Muchos investigadores han usado y perfeccionado este tipo de prueba en espiral y ahora es aceptado en Norte América como una norma para la fluidez de hierro y acero. Eastwood y Kempf⁽⁷⁾ usaron una fundición en espiral de sección plana para el estudio de aluminio y sus aleaciones. Puesto que la longitud de tal espiral no estaba bien definida, usaron el volumen del metal en el canal como una medida de fluidez.

2.2 - El espiral para pruebas de fluidez

La idea de Saito y Hayashi⁽⁶⁾ de usar una pieza en forma de espiral para medir la fluidez de metales fundidos fue considerada por muchos investigadores como una buena idea. El sistema de vaciado para una fluidez espiral consiste básicamente de (1) una "taza" de colado y una pasaje de bajada, (2) un "amortiguador" para disipar la energía cinética de la corriente que cae y (3) un canal espiral. La figura 2.1 muestra este diseño de espiral para pruebas de fluidez.

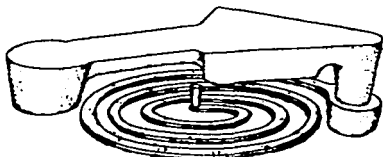


FIGURA 2-1a: Modelo del ensayo de fluidez en espiral

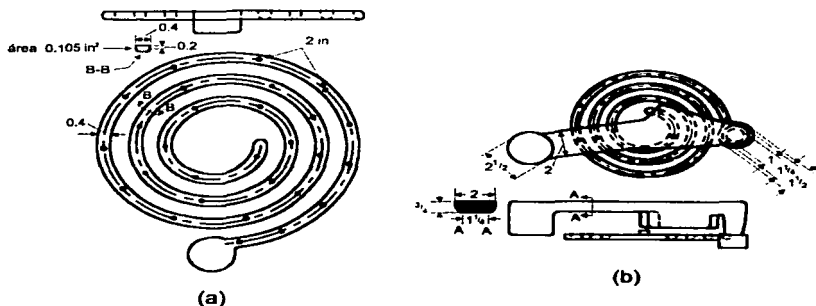


FIGURA 2.1b: Diseño del ensayo de fluidez en espiral.

Entre las variables importantes de prueba están la forma del canal, el diseño del "amortiguador", el moldeo de los materiales y la proporción de vaciado. Greene⁽⁶⁾ ha mostrado que la fluidez varía inversamente en relación con el perímetro del área de la sección transversal del canal. Andrew et al⁽⁹⁾, investigando el efecto del diseño del amortiguador, ha demostrado que bajo condiciones similares de colado diferentes diseños del amortiguador dieron valores de fluidez que variaron por lo mucho uno o dos factores. La difusión térmica del material del molde, temperatura del molde y velocidad de vaciado, todos influenciaron la

fluidez. La longitud del espiral varía directamente con la presión aplicada por la altura de caída, de aquí que no es irrazonable asumir que la longitud podría variar con la proporción de la presión aplicada por la altura de caída.

Partiendo del espiral para la prueba de fluidez se han establecido ciertas conclusiones acerca del comportamiento de las constantes físicas y variables durante el desarrollo de la prueba y como afecta este comportamiento la fluidez de metales fundidos.

La fluidez del metal será más grande entre más grande sea el contenido de calor de la aleación. Una aleación con un contenido de calor más alto requiere de un tiempo mayor para que su flujo se detenga y, consecuentemente, se obtiene un espiral más largo. El contenido de calor de una aleación esta controlado principalmente por la composición de la aleación y por la temperatura.

La fluidez como una función de la temperatura de vaciado se ha determinado para un número de aleaciones y metales de bajo punto de fundición, ligeras y de base cobre, así como para fundiciones ferrosas. Dos tipos distintos de relaciones se obtuvieron, figura 2.2 (a y b), las que dependen de las condiciones experimentales usadas así como del tipo de aleación que se investiga.

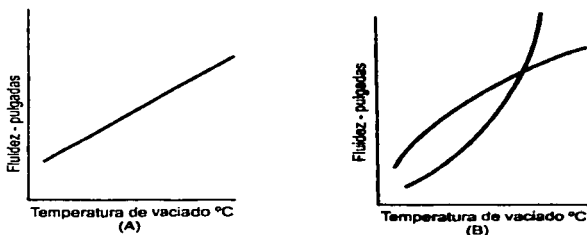


FIGURA 2-2: Relaciones de fluidez contra temperatura de vaciado.

Hay dos causas principales para la desviación de la relación línea-recta mostrada en la figura 2a: (a) La condición de la aleación puede alterarse con el incremento de la temperatura, además del aumento en el calor disponible; (b) el

modo de solidificación puede modificarse. Las discontinuidades observadas en tales gráficas pueden correlacionarse con los cambios físico-químicos en los líquidos metálicos con la temperatura.

Estudiando el efecto de la viscosidad en la fluidez de metales y aleaciones tres grandes conclusiones se han establecido: (a) El valor numérico de la viscosidad de líquidos metálicos es ligeramente mayor que la viscosidad del agua; (b) la viscosidad disminuye con el incremento de la temperatura del metal líquido; y (c) el valor de la viscosidad en metales puros se ve afectada por la presencia de adiciones metálicas o no metálicas disueltas o no en el metal líquido.

De acuerdo con Desch⁽¹⁰⁾ y Briggs⁽¹¹⁾, la viscosidad no tiene un efecto importante en las pruebas de fluidez. Por otra parte, el trabajo de Bastien, Lips y Poliak⁽¹²⁾ muestra que bajo ciertas condiciones en las pruebas de fluidez, la longitud del espiral es afectada sensiblemente por las variaciones en la viscosidad del metal líquido.

La importancia de la tensión superficial en las pruebas de fluidez surge del hecho de que es una medida de la resistencia que el líquido ofrece para entrar a una sección estrecha de un molde y, entre otras cosas, que da una reproducción fina de los detalles.

Los siguientes puntos generales han sido establecidos: (a) La tensión superficial de un metal disminuye con la temperatura por arriba del punto de fundición, pero el cobre y hierro fundido son dos excepciones importantes a esta regla; (b) la gráfica tensión superficial-composición de un sistema de aleación binaria eutéctica simple no muestra cambios marcados en la inclinación, máxima y mínima, similar a la gráfica fluidez de la fundición contra composición.

Más medidas de la tensión superficial se han realizado en una atmósfera neutral o en vacío, de esta manera se vuelve difícil dibujar una conclusión de la prueba de fluidez que normalmente se lleva a cabo al aire libre. Metales que forman películas de óxido más fuerte pueden, sin embargo, ser afectados más fuertemente por esta razón. Por ejemplo, la tensión superficial del aluminio oxidado es dos veces más grande que la del metal no oxidado.

La relación entre la composición de las aleaciones y su fluidez ha recibido quizás más atención por diferentes investigadores que cualquier otro aspecto de las pruebas de fluidez. El trabajo pionero en esta área fue el de Portevin y Bastien⁽¹³⁾, quienes establecieron dos reglas que han obedecido numerosos sistemas de aleaciones: (a) La adición de átomos de soluto a un metal cercano a la pureza disminuye la fluidez proporcionalmente con el incremento del intervalo de solidificación; (b) un máximo se obtiene en la gráfica fluidez-composición cuando la aleación enfría a una temperatura constante (figura 2.3). La característica general de estos descubrimientos ha nacido en la práctica industrial, donde se ha reconocido generalmente que los eutecticos son, por lo regular, aleaciones muy fluidas.

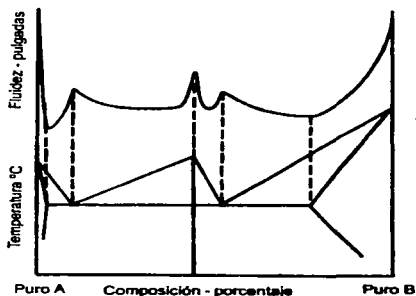


FIGURA 2-3: Relaciones Fluidez contra composición para un sistema binario.

Hay, sin embargo, ciertas excepciones a estas reglas. La adición de un elemento a un metal puro puede incrementar su fluidez en lugar de disminuirla. Por ejemplo, la adición de magnesio incrementa la fluidez del aluminio. Otra excepción son aquellos sistemas de aleación en que un elemento con alto calor de fusión incrementa la fluidez de una aleación, aunque el intervalo de solidificación se incrementa sobre el rango de composición similar. Esto se muestra con

aleaciones aluminio-silicio que contienen más silicio que la cantidad del eutéctico (hipereutécticas).

La figura 2.4 muestra una gráfica de la fluidez medida por la longitud de la espiral de la fundición de prueba contra la temperatura de vaciado para hierros de diferente carbón equivalente.

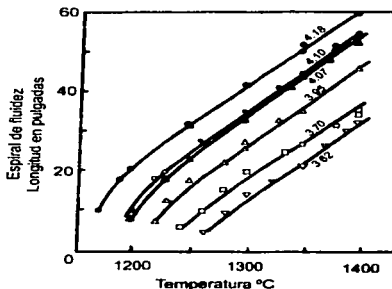


FIGURA 2-4: Fluidez contra temperatura de vaciado para hierro líquido.

Mientras el valor de las relaciones generales antes mencionadas se ha reconocido ampliamente, no hay un acuerdo entre los diferentes trabajos en la explicación del fenómeno envuelto. El bajo espiral de fluidez característico de aleaciones que tienen un amplio rango de enfriamiento es explicado, por un lado, en términos del modo de solidificación de esa aleación y en términos de los cambios en la viscosidad según la composición por otra parte. En otras palabras, en ambos los cristales dendríticos que se forman en la superficie con el molde interfieren con el flujo, esto da espirales cortos; o la adición de átomos de soluto incrementa la viscosidad de la aleación que, en su movimiento, conduce a bajos valores de fluidez.

Un experimento interesante en este sentido fue el realizado por Yao⁽¹⁴⁾. De acuerdo con la evidencia experimental disponible, no hay solubilidad sólida perceptible del estaño en el zinc. Sin embargo, solo el 0.1 por ciento atómico (o

aproximadamente 0.18 por ciento de peso) de estaño, baja repentinamente la fluidez del zinc de 92 a 45 pulgadas de la longitud del espiral. Es difícil explicar este resultado por la suposición de que la adición de estaño sólo cambia repentinamente la característica de solidificación del zinc.

Similarmente, Kondic y Kozlowski⁽¹⁵⁾ han mostrado en una grafica que es análoga a la grafica de la figura 4 que el volumen de aleaciones que fluyen a través de un tubo capilar por un tiempo constante este relacionado con la composición. El trabajo de Poliak sobre este asunto de la relación viscosidad-composición es similar al de la figura 2.3.

En un número de sistemas de aleación, por otra parte, la adición de átomos de soluto puede alterar más bien otras propiedades en lugar de la viscosidad o forma de solidificación y así modificar los valores de la fluidez. Una adición de fósforo a aleaciones de base cobre incrementan, mientras que la adición de aluminio disminuye los valores de la fluidez. En ambos casos la tensión superficial de las aleaciones se altera apreciablemente y explica los cambios repentinos en la fluidez, que son de un orden más alto que aquellos que causaron efectos a aleaciones puramente de esos elementos.

Muchas modificaciones y variantes se le han hecho al espiral para prueba de fluidez por diferentes investigadores, por lo que es difícil acertar qué pieza espiral para prueba de fluidez se ha usado más comúnmente en la práctica de fundición. Tal parece, sin embargo, que los siguientes tres métodos de pruebas en espiral fueron los más usados por distintos investigadores: 1. El de la oficina de estándares⁽¹⁶⁾; 2. de Taylor, Rominski y Briggs⁽¹⁷⁾ y 3. de Eastwood y Kempf⁽⁷⁾.

Ninguno de estos métodos se ha usado en su forma original. Cada investigador encontró que tenía que hacerle alguna modificación al método que escogía para poder asegurar resultados más constantes.

La aproximación más cercana a una completa estandarización se ha alcanzado con el ensayo de fluidez en vacío (figura 2.5). En esta prueba el canal espiral normal fue remplazado por un tubo pirex. La presión por altura de caída se proveyó con un vacío parcial ajustable aplicado a uno de los extremos del tubo. Para aplicar instantáneamente el vacío, se selló la entrada del tubo con una

finísima oblea de cera. Antes de que la prueba se realizara, el vacío se aplicó. Cuando la entrada del tubo se sumergió en el metal, la cera se derritió y se aplicó la presión instantáneamente. Para mantener constante la presión en el tubo durante la prueba, se proveyó un depósito vacío cerca del otro extremo del canal. El vacío se suministró con un aspirador, controlado por un manostato cartesiano y medido con un manómetro de mercurio.

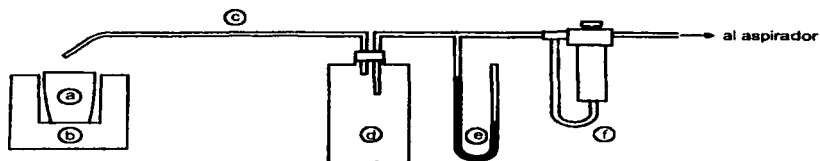


FIGURA 2.5: Equipo para ensayo de fluidez en vacío. (a) Crisol de metal; (b) Horno de resistencia eléctrica; (c) canal de prueba de fluidez; (d) depósito de presión; (e) manómetro; (f) Manostato cartesiano.

Los metales puros que se investigaron con esta prueba fueron estaño, plomo y zinc. La pureza del estaño fue por lo menos del 99.90 por ciento, del plomo del 99.95 por ciento y del zinc del 99.90 por ciento. Los tubos pirex usados como moldes se midieron por su diámetro interior con una tolerancia de 0.002 pulgadas de su tamaño establecido. La presión fue controlada dentro de un ± 0.1 cm de mercurio y la temperatura medida con una tolerancia de 2° C. Para determinar L_s como una función del tiempo y el tiempo total de enfriamiento, se tomaron fotos del movimiento durante el curso de la prueba de fluidez. Se usó una cámara rápida de 64 cuadros por segundo. Los valores de la longitud se leyeron de cada cuadro sobre el lector microfílmico estándar.

2.3 Resultados Experimentales de otros Trabajos de Investigación

Usando estaño, la fluidez se midió como una función de la temperatura para cuatro tubos de diferentes diámetros. Estos datos se presentan en la figura 2.6. Se tomaron fotos del movimiento en la mayoría de las pruebas y de ellas se obtuvieron los valores del tiempo final de enfriamiento. Estos se trazaron en la figura 2.7 como una función de la temperatura para los diferentes diámetros de tubo.

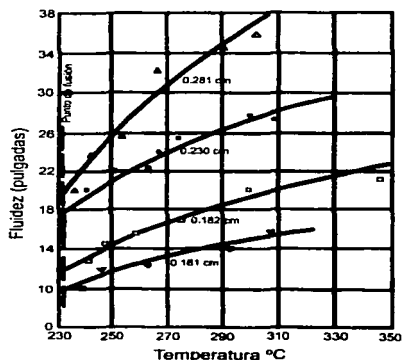


FIGURA 2.6: Fluidez de estaño como una función de la temperatura, para diferentes diámetros de tubo.

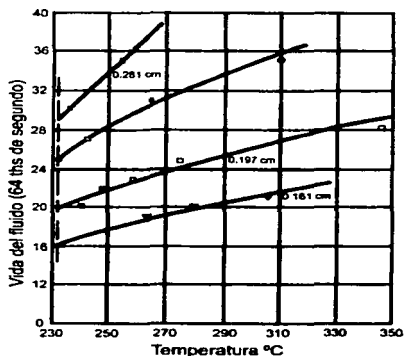


FIGURA 2.7: Vida de la fluidez del estaño como una función de la temperatura para varios diámetros de tubo.

La figura 2.8 muestra la longitud como una función del tiempo para una prueba durante el curso de la prueba. Hay buena concordancia entre las curvas observadas y las calculadas.

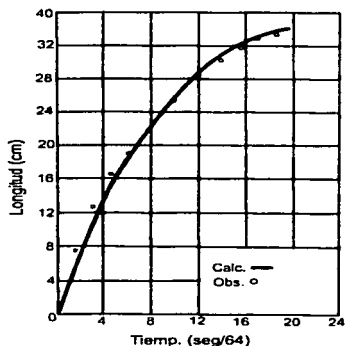


FIGURA 2.8: Longitud como una función del tiempo para estaño en su punto de fundición (calculado y observado).

2.4 El sistema aluminio-cobre

En esta prueba el vacío fue ajustado de tal forma que simulara una presión por altura de caída de 10 pulgadas del metal y los diámetros interiores de todos los tubos estuvieron dentro del rango de 0.201 – 0.204 pulgadas. Se hizo una pequeña variación sobre el procedimiento original de la prueba. La oblea de cera usada para proveer la aplicación instantánea de presión fue eliminada y substituida por una válvula de apertura rápida.

Las pruebas se llevaron a cabo calentando la aleación a aproximadamente 100° C por arriba del líquidus y dejándola al aire frío mientras cinco o seis pruebas se realizaron para establecer la curva de fluidez contra temperatura. Se tuvo cuidado de asegurar que partículas de óxido que flotaban sobre la superficie líquida no obstruyeran el extremo del canal de prueba. Los valores de fluidez se midieron desde el extremo del canal hasta el final del metal solidificado.

Los resultados de estas pruebas se tabulan en la tabla 2. La figura 2.9 es un gráfico representativo para dos de las aleaciones, una con un rango grande de

solidificación (No. 9) y una con una solidificación tipo eutéctica (No. 10). Las figuras 2.10 y 2.11 grafican la fluidez en el líquidus y a 50° C por arriba del líquidus para aleaciones de cobre y magnesio respectivamente contra composición de la aleación.

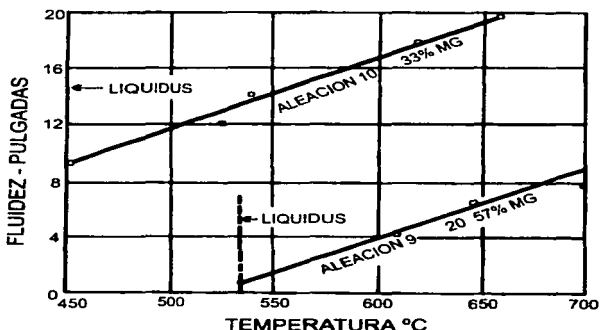


FIGURA 2.9: Fluidez de dos aleaciones Al - Mg

En cuanto al uso de tubos de vidrio como canales de flujo ninguna dificultad se experimentó con las aleaciones de aluminio excepto por algunos casos aislados en los cuales el canal de flujo no se llenó completamente en secciones causados por un vacío excesivamente alto o por una curva excesivamente severa en el tubo de vidrio. Estas condiciones se corrigen fácilmente. Esta prueba debe tener éxito con otras aleaciones de aluminio. Las cuarteduras en los tubos causados por un choque térmico no es algo serio porque esto ocurre después que la prueba de flujo se completa (menos de ¼ segundo)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

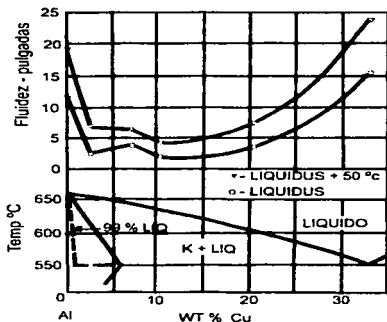


FIGURA 2.10: Fluidez contra composición Al - Cu.

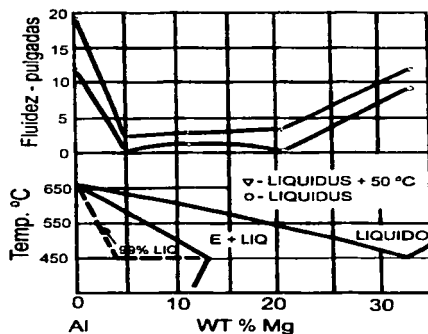


FIGURA 2.11: Fluidez contra composición Al - Mg.

2.5. - Otros métodos usados para la medida de la fluidez de metales fundidos.

En su "nuevo método de prueba de capacidad de correr de muy pequeñas cantidades de metal" Ruff⁽⁶⁾ usó un canal de flujo recto de 5 mm de diámetro y 720 mm de longitud.

Los investigadores concuerdan con Worthington⁽¹⁶⁾ en que las características indeseables del canal recto de flujo son la longitud requerida del molde y la necesidad de una extrema exactitud en el nivelado del molde. El área de la sección transversal del canal recto de flujo se limitó necesariamente para mantener la longitud del molde dentro de las dimensiones convenientes.

La pieza de prueba tipo "U" fue recomendada para una prueba de control por el Instituto Británico de Fundidores. En esta prueba se usó un molde permanente, figura 2.12. Se determinó que una de las principales razones para recomendar la pieza de prueba tipo "U" fue que muchos de los factores variables, tales como la

técnica de moldeo, sana condición y arreglo del recorrido se superaron con la adopción de un molde frío. La prueba se llevó a cabo vaciando el metal dentro del pasaje de bajada hasta que el nivel del metal alcanzará la parte superior del corredor, entonces se midió la longitud de las ramificaciones o "miembros fluidos" en milímetros. En el molde se hicieron tres "miembros de flujo" de diferentes diámetros (2 mm, 4 mm y 6mm) para facilitar la lectura de resultados de los hierros, cuyas características variarían con el tipo de colado que se realice. De esta manera, para metal ligero, es conveniente delgadas secciones de prueba para el más pequeño, mientras que el miembro medio o más largo podría dar resultados más legibles con metales apropiados para trabajo pesado. La longitud medida en milímetros de la ramificación es el número de fluidez, el cual podría expresarse, por ejemplo, fluidez "U" 12 mm, A, B o C según la ramificación usada.

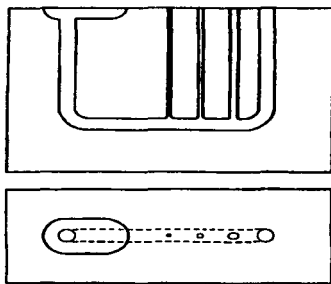


FIGURA 2.12: Ensayo de fluidez en forma de "U".

Este diseño incorpora caídas de presión bajas y canales de flujo estrechos, junto con altas velocidades de solidificación acentuadas por un molde de alta conductividad. Este ensayo aproxima los requerimientos de habilidad de flujo en un molde de fundición de precisión tipo de caja, pero no proporciona un conocimiento profundo de los problemas de llenabilidad.

Cooksey, Kondic y Wilcock⁽¹⁹⁾ diseñaron una probeta de ensayo para fundición en arena sometida el proceso CO₂, el cual consiste de una vasija de vaciado, un corredor que alimenta cuatro tiras de diferente espesor. La longitud total de las cuatro tiras coladas se usa como un índice de la fluidez de la fundición. Figura 2.13. Se encontró que el índice de la fluidez de la fundición era expresado más satisfactoriamente como la longitud total de las cuatro tiras, y este valor es el que se grafica en todas las gráficas presentadas. Cooksey et al⁽¹⁹⁾ estudiaron varias aleaciones de uso en fundición; entre éstas se encuentran: Aluminio, Zinc, Aluminio-Cobre y Aluminio-Silicio. Las gráficas obtenidas se presentan en las figuras de 2.14 a 2.16.

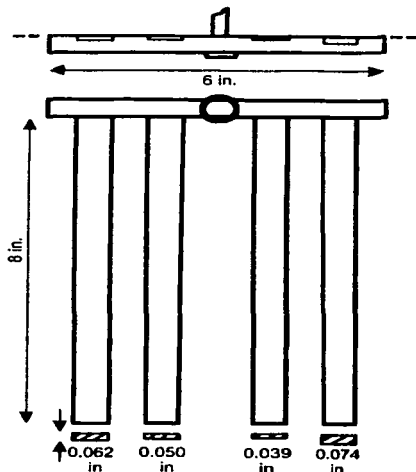


FIGURA 2.13: Diagrama del modelo para el ensayo de fluidez según Condic et al.

2.6. - Aluminio y Zinc de alta pureza y comercialmente puro.

El Zinc y el aluminio de alta pureza fueron extremadamente fluidos aún a la temperatura de fusión. Se encontró que el presente molde no puede ser aplicado satisfactoriamente para zinc de alta pureza debido a que dos o más tiras se llenaron completamente aún cuando se vaciaba el metal a su punto de fusión.

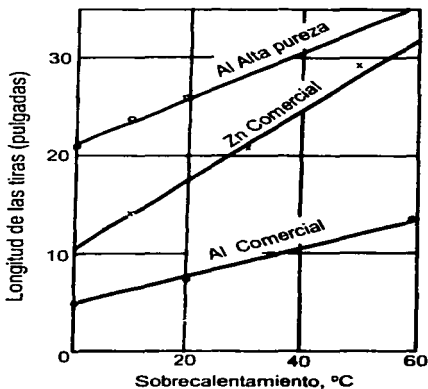


FIGURA 2.14: Fluidez de la fundición de Al y Zn

2.7. - El sistema Al-Cu

Los resultados para este sistema se resumen en la figura 2.15. Las adiciones de soluto causaron una disminución en la fluidez de la fundición a un valor mínimo en aproximadamente 6 % Cu. Adiciones posteriores aumentan la fluidez de la fundición a un máximo en la composición eutéctica de 33 % Cu, después del cual una disminución rápida fue aparente.

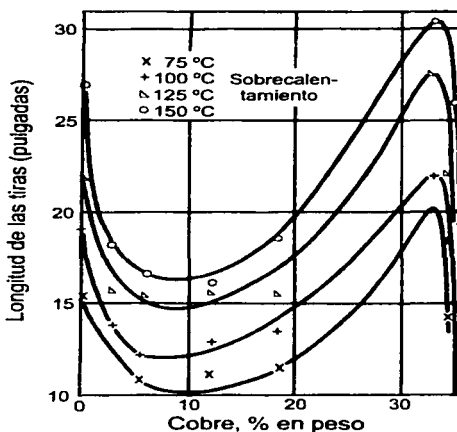


FIGURA 2.15: Fluidez de las aleaciones Al - Cu

2.8. - El sistema Al-Si.

Los resultados de esta investigación se detallan en la figura 2.16. La fluidez de la fundición disminuye con el incremento en el contenido de soluto hasta aproximadamente 4 % de Si, después del cual se mantiene un valor constante hasta que se aproxima a la composición eutéctica, donde la fluidez de la fundición aumenta bruscamente. Este aumento en la fluidez de la fundición ocurre a contenidos más bajos de soluto para un aumento del sobrecalentamiento de la masa fundida.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

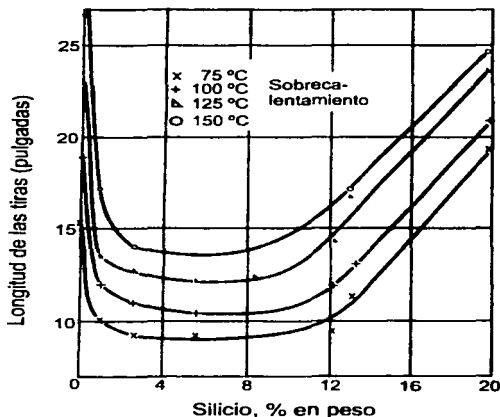


FIGURA 2.16: Fluides de la fundición de las aleaciones Al – Si.

El fenómeno de fluides es un problema práctico que solo como tal puede ser tratado. Según Clark, en el presente el único método conveniente para evaluar la fluides es el empírico. Por esta razón muchos métodos prácticos para medir la fluides de metales fundidos han sido desarrollados por distintos investigadores.

Hay que tener en cuenta que cuando se realizan pruebas de fluides deben establecerse cuidadosamente condiciones estándar en la prueba y mantenerlas durante todas las pruebas y que los valores obtenidos son solo relativos.

3.- CARACTERISTICAS Y DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE ALIMENTACION

En la producción de formas de fundición el metal se introduce generalmente al molde vía corredores, como el que se muestra en la figura 3.1. Una función del sistema de pasajes de un molde es introducir el metal al molde tan suavemente como sea posible de tal forma que no reaccione excesivamente con la atmósfera, molde o gases del molde. Un buen sistema de pasajes también se diseña para quitar los óxidos atrapados y la escoria en la medida que sea posible y distribuir el metal en puntos seleccionados dentro de moldes complejos.

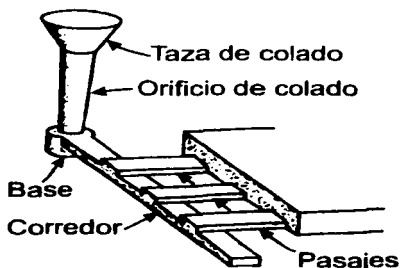


FIGURA 3-1: Sistema de pasajes para una fundición en arena.

Los sistemas de entrada son usados en todos los tipos de formas de fundición. En la actualidad muchos tipos de procesos modernos de fundición de lingotes emplean también un tipo de sistema de entradas. Por ejemplo, en el colado continuo de aleaciones de aluminio, plantas modernas filtran el metal líquido y entonces lo introducen al vaciador continuo a través de canales que proveen una exposición mínima del metal al aire. Muchas plantas de colado continuo de acero lo hacen de manera similar, excepto que el filtrado ya no se

emplea. Colados estáticos de lingotes de acero más grandes se llenan todavía directamente del cucharón sin un sistema de entradas intermedio.

Cuando el metal fluye a través del sistema de entradas para fundiciones, es altamente turbulento. Aun en sistemas bien diseñados, números de Reynolds tan altos como de 20,000 son comunes. Desde luego el flujo es también turbulento cuando entra al molde. Salpicadura y turbulencia del metal cuando entra en las cavidades del molde se han observado directamente por radiografía en cine y por simulación usando fluidos transparentes. En el colado de lingotes, el método de llenado más común es el vaciado alto. El metal puede caer varios metros o más antes de golpear el nivel del líquido en el molde. Un efecto de toda esta agitación es el daño del metal mediante la acogida de gases, oxidación y la erosión del molde. También influye en la estructura que se forma en las primeras etapas de solidificación.

Métodos para incrementar la altura de presión efectiva por altura de caída incluyen vibración, centrifugación y aplicación de un vacío a las paredes del molde de la fundición (para reducir la contrapresión de los gases del molde). Todas estas técnicas, especialmente las dos últimas, son usadas en la hechura de fundiciones de inversión de secciones muy delgadas, tal como joyería, donde los detalles finos son importantes. En la fundición de matrices, la presión requerida se obtiene de una forma diferente mediante el uso de un pistón mecánico o por gas a presión sobre el metal fundido.

3.1 Características esenciales de los sistemas de alimentación.

En el más sencillo de todos los sistemas de alimentación el metal es vaciado en una cabeza alimentadora abierta que esta situada en la parte superior o a un lado del molde. Esta técnica es a menudo requerida para fundiciones pequeñas, en las cuales la provisión de un sistema adicional de pasajes en el molde bajaría grandemente el rendimiento de metal útil; al mismo tiempo la distribución de temperatura es favorable y la distancia a través de la cual debe caer el metal líquido es corta.

En la mayoría de los casos, sin embargo, se usa un sistema de alimentación separado, siendo distribuido el metal a través de pasajes en partes seleccionadas de la cavidad del molde. Las características esenciales de un sistema típico se ilustran en la figura 3.2. El metal es vaciado dentro de un recipiente o vasija, de donde un corredor de bajada descende hasta el nivel requerido. De la base del orificio de colado otros corredores conducen el metal a las compuertas, a través de las cuales entra a la impresión de la fundición.

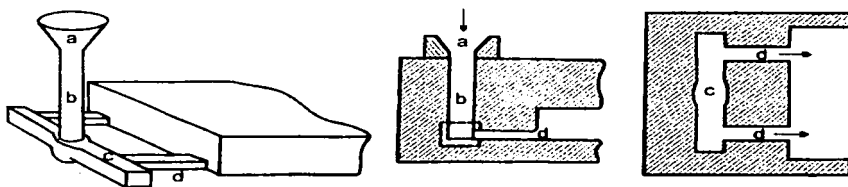


FIGURA 3-2: Partes principales de un sistema de alimentación: (a) Recipiente de vaciado; (b) canal de bajada; (c) corredores; (d) entradas.

La entrada puede ser directamente en la fundición o en una o más cabezas alimentadoras. El sistema de alimentación puede consistir de un pasaje sencillo o la corriente de metal puede ser subdividida y dirigida dentro de la fundición en puntos ampliamente dispersos. Para fundiciones muy grandes pueden requerirse más de un orificio de colado; siendo llenados los orificios de colado individualmente ya sea por cucharones separados o desde un tanque de llenado común o lavadero. Además de estas características básicas, el sistema de alimentación a menudo incorpora dispositivos para la separación de inclusiones no metálicas.

3.2 Diseño de los sistemas de alimentación.

La mayoría de los estudios modernos sobre los sistemas de alimentación han estado basados en la consideración de dos leyes de la dinámica de fluidos. La primera de éstas, la ecuación de continuidad establece que la velocidad de flujo volumétrico es constante en todas las partes de un sistema y esta expresada por

$$Q = A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2 = \text{constante} \quad 3.1$$

donde Q = velocidad de flujo volumétrico,

A = área de la sección transversal del pasaje de flujo,

V = velocidad lineal de flujo.

La velocidad lineal de flujo en un sistema esta relacionada con otros factores en el teorema de Bernoulli, el cual establece que la energía total de una unidad de peso de fluido es constante en todas las partes de un sistema:

Ecuación 3.2

$$\frac{v_1^2}{2g} + h_1 + \frac{P_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2g} + h_2 + \frac{P_2}{\rho} \quad 3.2$$

donde v = velocidad lineal de flujo,

h = altura sobre el plano de referencia

P = presión

ρ = densidad

Los términos sucesivos en la ecuación representan las energías cinéticas, potencial y de presión respectivamente. Los cálculos de flujo basados en estas leyes están sujetos a errores que surgen de la fricción, de cambios repentinos en la sección transversal y de cambios severos de dirección en curvaturas y uniones. Sin embargo se pueden aplicar correcciones usando coeficientes de pérdida determinados experimentalmente. La investigación ha indicado que tales pérdidas no son tan altas como se pensó en un tiempo y que son en muchos casos despreciables.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El canal vertical por el cual el metal entra al molde (orificio de colada) es una porción del sistema de pasajes donde la aspiración de gases del molde es particularmente probable que suceda, como se muestra en la figura 3.3.

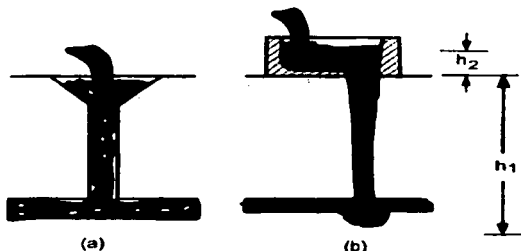


FIGURA 3-3: Diseño del orificio de colado. (a) Orificio de lados rectos; (b) orificio cónico.

La aspiración se reduce grandemente dando conicidad lo suficiente al orificio de colado de tal forma que el metal no sea llevado lejos de las paredes del molde cuando es acelerado hacia abajo. Para la caída libre del metal, la velocidad v se incrementa con la raíz cuadrada de la distancia de caída

$$v = \sqrt{2g, h} \quad 3.3$$

donde g , es la aceleración debido a la gravedad y h es la altura de caída del metal. Es posible diseñar un orificio de colado con una estrechez parabólica, usando la ecuación 3.3, de tal forma que el metal siempre llenará únicamente la sección transversal en todos los puntos. El resultado difiere muy poco de las muchas prácticas simples de diseño del orificio de colado con una estrechez recta tal que la sección transversal cercana a la salida se mantenga llena. De la ecuación 3.3, se deduce que

$$\frac{A_1}{A_2} \geq \sqrt{\frac{h_2}{h_1}}$$

3.4

donde A_1 y A_2 son las secciones transversales de la entrada y salida del orificio de colada respectivamente y h_1 y h_2 son las alturas de caída del metal definidas en la figura 3.3. Los argumentos que conducen a la ecuación 3.4 desprecian los efectos de la fricción en el orificio de colado, efectos de entrada y salida y la presión posterior sobre el orificio de colado que ocurren mientras el molde se llena. La ecuación es una estimación conservativa de la estrechez requerida.

La aspiración también ocurre en los cambios abruptos en la dirección de la sección transversal de los canales de flujo y una forma de reducir esto es haciendo los corredores y los pasajes del sistema en forma aerodinámica, como se muestra en la figura 3.4. Una alternativa cercana satisfactoria y ampliamente usada es, no hacer aerodinámico el sistema, sino hacer las porciones horizontales del sistema de corredores largos de modo que la velocidad de flujo en esas porciones sea baja. Un ejemplo se muestra esquemáticamente en la figura 3.1.

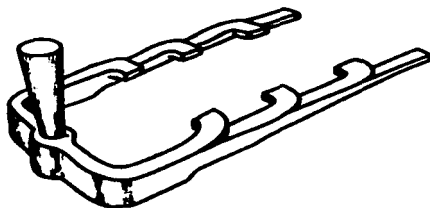


FIGURA 3-4: Un sistema de pasajes completamente aerodinámico.

La sección transversal más pequeña está en la base del orificio de colado. El flujo subsecuentemente es a través de los canales más largos a una velocidad

baja. Una relación de corredores típico para pruebas de aluminio es 1:3:3, significa que la relación del área del corredor a la del orificio de colada es 3 y la suma de las áreas de las secciones transversales de todos los pasajes es igual a la del corredor. Relaciones de entrada en la práctica para este tipo de sistema de entradas varía de 1:1.5:1.5 a 1:5:5; las relaciones más altas son usadas para aleaciones en las cuales fácilmente se forman óxidos o de las cuales es difícil remover la escoria u óxidos que entran, por ejemplo, el hierro dúctil. Una modificación del sistema de entradas discutido anteriormente (la incorporación de un filtro para remover escoria atrapada o escoria del metal fundido) se muestra en la figura 3.5. Los filtros son ampliamente usados para aleaciones no ferrosas y generalmente están hechos de fibra de vidrio, mica o lámina de metal.

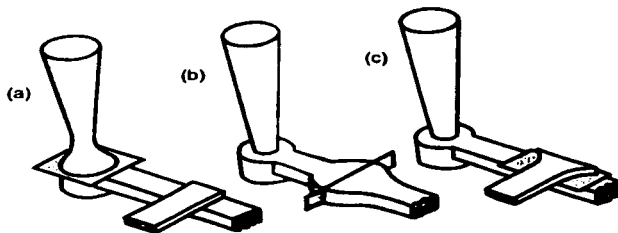


FIGURA 3-5: Algunos métodos para remover escoria en el sistema de pasajes.

En los sistemas presurizados no obstante que la velocidad y la distribución del flujo son más predecibles el metal tiende a entrar a la fundición a una velocidad alta, produciendo un efecto de chorro, mientras que en los sistemas sin presurizar el flujo irregular y la aspiración de aire son las tendencias predominantes. Estos factores necesitan ser considerados desde el punto de vista del metal particular que se está vaciando, pero un sistema ideal para todos los

propósitos sería uno en el cual las presiones fueran simplemente suficientes para mantener todos los pasajes llenos lo justo para evitar la aspiración.

La posición y proporciones de los elementos del sistema de alimentación no son de importancia solamente con respecto a la disminución de la turbulencia. Para las fundiciones de secciones delgadas predomina el objetivo del llenado del molde, así que el sistema debe ser diseñado para que el metal fluya rápidamente pero de forma progresiva a través de secciones susceptibles, por otra parte, a traslapes y corrimientos incompletos. Se necesita cuidado para evitar juntas frías debidas al encuentro de corrientes delgadas en puntos alejados de las entradas.

En las fundiciones de secciones más gruesas hay una preocupación mayor con la turbulencia, que está asociada con la erosión del molde y con los gradientes de temperatura que tienen una influencia marcada en la alimentación subsecuente de la fundición.

4. EL FENOMENO DE SOLIDIFICACION EN METALES Y ALEACIONES

4.1 Estados de la materia

Tres estados de la materia se pueden distinguir: gaseoso, líquido y sólido. En el estado gaseoso, los átomos del metal ocupan gran parte del espacio debido a su rápido movimiento. Dicho movimiento es enteramente al azar, y conforme viajan, chocan entre sí y contra las paredes del recipiente.

El arreglo de los átomos en un gas es completamente desordenado. A alguna temperatura menor, la energía cinética de los átomos ha disminuido a tal punto que las fuerzas atractivas llegan a ser suficientemente grandes para que la mayoría de los átomos se junten formando un líquido. Un gas puede comprimirse fácilmente en un volumen menor, pero se requiere de una presión elevada para comprimir un líquido; sin embargo, aún hay suficiente espacio libre en el líquido para dejar que los átomos se muevan irregularmente.

Conforme la temperatura disminuye, los movimientos son menos vigorosos y las fuerzas de atracción juntan los átomos hasta que el líquido se solidifica. La mayoría de los materiales se contraen al solidificar, lo cual indica un empaquetamiento más estrecho de átomos en el estado sólido. En dicho estado, los átomos no son estacionarios, sino que vibran alrededor de puntos fijos y dan lugar al ordenamiento de las diferentes estructuras cristalinas existentes.

4.2 Mecanismo de cristalización

La cristalización es la transición del estado líquido al sólido y ocurre en dos etapas:

- 1.- Formación de núcleos (nucleación).
- 2.- Crecimiento del cristal (crecimiento).

Aunque los átomos en el estado líquido no tienen ningún orden definido, es posible que algunos en cualquier instante dado estén en posiciones que corresponden exactamente a la red espacial que adoptan cuando solidifican (figura 4.1).

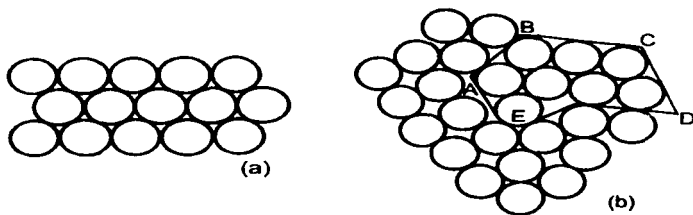


FIGURA 4-1: Diagrama esquemático de las estructuras de: (a) un cristal y de (b) un líquido. El área ABCDE del líquido tiene un arreglo idéntico a la del cristal.

Estos agregados o grupos causales no son permanentes, sino que continuamente se deshacen y se forman de nuevo en otros puntos. El tiempo que existen está determinado por la temperatura y tamaño de grupo: a mayor temperatura, mayor energía cinética de los átomos y menor vida del grupo. Cuando la temperatura del líquido disminuye, el movimiento del átomo decrece, alargando la vida del grupo y mayor número de grupos estarán presentes al mismo tiempo.

Los átomos en un material tienen energía tanto cinética como potencial. La energía cinética está relacionada con la velocidad con que se mueven los átomos y es estrictamente una función de la temperatura. A mayor temperatura, los átomos son más activos y la energía cinética es mayor. Por otro lado, la energía potencial está relacionada con la distancia entre átomos. A mayor distancia promedio entre átomos, mayor será su energía potencial.

Ahora considérese un metal puro en su punto de congelación en el que ambos estados, líquido y sólido, se encuentran a la misma temperatura. La energía cinética de los átomos en el líquido y en el estado sólido debe ser la misma, pero hay una diferencia significativa en energía potencial. Los átomos en el sólido están mucho más próximos, de modo que la solidificación ocurre con una liberación de energía. Esta diferencia en energía potencial entre los estados

líquido y sólido se conoce como calor latente de fusión; sin embargo, se requiere energía para establecer una superficie entre el sólido y el líquido. En materiales puros, en el punto de congelación, el calor de fusión libera energía insuficiente para crear una frontera estable, y siempre se necesita algún subenfriamiento para formar núcleos estables. La subsecuente liberación del calor de fusión elevará la temperatura al punto de congelación (figura 4.2). La cantidad de subenfriamiento necesaria puede reducirse por la presencia de impurezas sólidas que reducen la cantidad de energía superficial requerida.

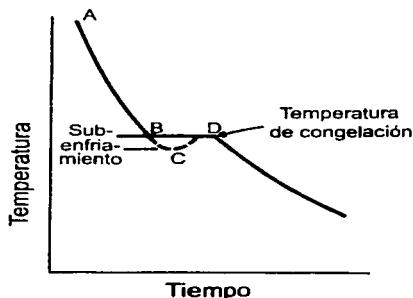


FIGURA 4-2: Curva de enfriamiento para un metal puro; ABDE ideal, ABCDE real.

Cuando la temperatura del metal líquido ha disminuido en forma suficiente por debajo de su punto de congelación, aparecen espontáneamente agregados o núcleos estables en diversos puntos del líquido. Estos núcleos, que ahora se han formado, actúan como centros para cristalización ulterior. Conforme continúa el enfriamiento, más átomos tienden a disminuir su energía y pueden unirse a aquellos núcleos ya existentes o formar por si mismos nuevos núcleos. Cada núcleo crece al atraer del líquido e incluirlos en su red espacial a otros átomos. El crecimiento del cristal continúa en tres dimensiones, con los átomos uniéndose a ellos en ciertas direcciones preferidas, generalmente a lo largo de los ejes del

cristal. Esto da lugar a una estructura característica con apariencia de árbol, llamada dendrita (figura 4-3). Como cada núcleo se forma de manera causal, los ejes del cristal están apuntados al azar y las dendritas que crecen de ellos se desarrollarán en diferentes direcciones en cada cristal. Finalmente, al disminuir la cantidad de líquido, las separaciones entre las ramas de la dendrita se llenarán y el crecimiento de la dendrita lo obstruirá mutuamente el de sus vecinos. Esto da lugar a una forma externa muy irregular.

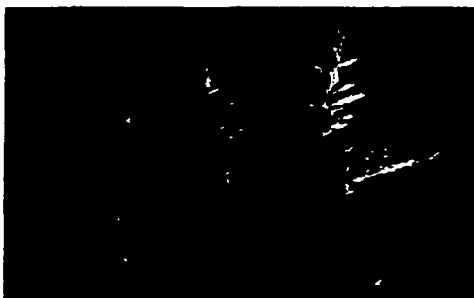


FIGURA 4-3: Dendritas de magnesio que crecen a partir de un líquido.

Los cristales encontrados en todos los metales comerciales comúnmente se llaman granos, debido a esta variación en forma externa. El área a lo largo de la cual están unidos los cristales se conoce como frontera de grano, y es una región de embonamiento o aparejamiento deficiente (figura 4.4). Esto da lugar a una estructura (amorfa) no cristalina en la frontera de grano, estando los átomos estando los átomos espaciados irregularmente. Como los últimos residuos del líquido se solidifican, por lo general a lo largo de las fronteras de grano, tiende a haber mayor concentración de impurezas atómicas en esa área. La figura 4.5 muestra esquemáticamente el proceso de cristalización desde la formación del núcleo hasta los granos definitivos.

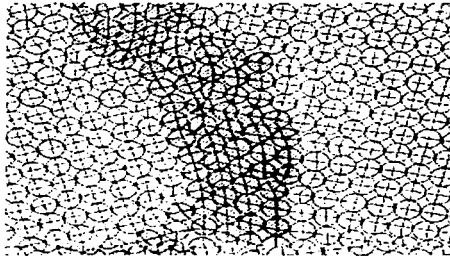


FIGURA 4-4: Representación esquemática de una frontera de grano entre dos cristales. Los átomos señalados por las líneas de relleno constituyen el material frontera.

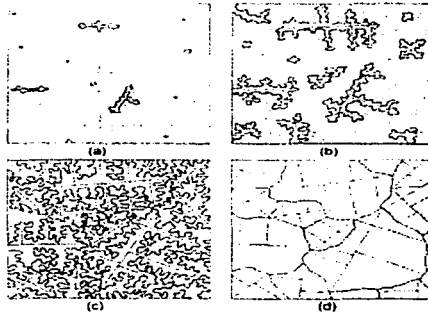


FIGURA 4-5: Representación esquemática del proceso de cristalización por nucleación y crecimiento dendrítico.

4.3 Imperfecciones del cristal

Por lo explicado en la sección anterior, es evidente que la mayoría de los materiales, al solidificarse, están constituidos por muchos cristales o granos. En

condiciones cuidadosamente controladas, es posible fabricar un cristal único. Las llamadas "barbas metálicas" o whiskers que en algunos casos se crean o aparecen en forma directa del vapor, son monocristales casi perfectos. La figura 4.6, hecha con el microscopio electrónico de barrido, a una ampliación de 20 000 veces, muestra barbas de estaño que crecen de un sustrato de cobre.



FIGURA 4-6: Barbas de estaño que crecen de un sustrato de cobre.

Los cristales únicos también pueden obtenerse, si se retira un fragmento del cristal o semilla a una velocidad cuidadosamente controlada, de una colada que se mantenga precisamente arriba del punto de fusión. En cualquier caso, los monocristales se aproximan a estructuras de red casi perfectas. Es posible calcular la resistencia teórica de un metal por la fuerza requerida para separar el enlace entre átomos vecinos. Esta fuerza representa varios millones de libras por pulgada cuadrada, misma a la que se aproxima la resistencia de monocristales o barbas de metal; sin embargo, la resistencia de los metales es de 100 a 1 000 veces menor, debido a la presencia de defectos en la estructura del cristal.

Las imperfecciones cristalinas más importantes son vacancias, intersticiales y dislocaciones. Las vacancias son simplemente sitios atómicos vacíos (figura 4.7a).

Las vacancias de la red son una característica estable de los metales a todas las temperaturas superiores al cero absoluto. Con saltos sucesivos de los átomos una vacancia puede moverse en la estructura de la red y, por tanto, desempeñar un papel importante en la difusión de los átomos a través de la red.

Sobre todo en estructuras reticulares que no son compactas y en las aleaciones entre metales que tienen átomos sustancialmente distintos en diámetros atómicos, es posible que algunos átomos caigan en posiciones intersticiales o en los espacios de la estructura reticular (figura 4.7b). Los intersticios tienden a empujar a mayor distancia a los átomos vecinos y producen distorsión de los planos reticulares. Las vacancias no sólo están presentes como resultado de la solidificación, sino que pueden producirse al elevarse la temperatura o por irradiación con partículas nucleares de movimiento rápido. Los átomos intersticiales pueden producirse por la severa distorsión local que se presenta durante la deformación plástica, así como por irradiación.

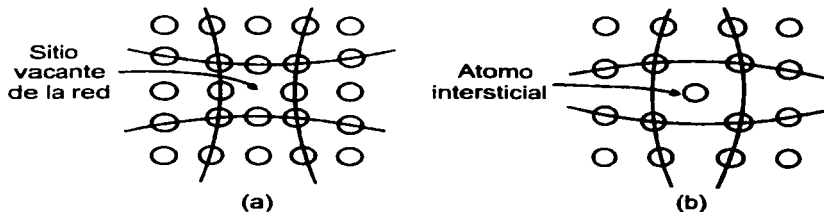


FIGURA 4-7: Defectos cristalinos: vacancia e intersticial.

4.4 Macrodefectos en piezas coladas

Otros defectos que pueden surgir de la solidificación son suficientemente grandes para que se puedan advertir a simple vista, a saber: los macrodefectos, entre los cuales los más comunes son cavidades de contracción o encogimiento y porosidad.

Los metales líquidos, con pocas excepciones, sufren una contracción en volumen debido a la solidificación. Este decremento en volumen puede ser hasta del 6%. En un molde diseñado apropiadamente, con provisiones para poder proporcionar líquido a la porción que se solidifica al último, la contracción en volumen no presentará un problema serio; sin embargo, si todo el exterior de la pieza colada se solidifica primero, la disminución en volumen del interior de la pieza durante la solidificación dará lugar a la formación de una gran cavidad por contracción o encogimiento en la sección media, como se muestra en la figura 4.8. En la solidificación de lingotes de acero, la cavidad llamada pipa o tubo, suele estar concentrada en la porción central superior del lingote.



FIGURA 4-8: Cavidad por contracción en un lingote de aleación al niobio.

La solidificación ideal sería aquella en la que el metal se solidifica primero en el fondo del molde y continúe hacia arriba hasta llegar a la parte superior; sin embargo, el calor se disipa más rápidamente de la parte superior del molde. Para minimizar la formación de cavidades por contracción, deben evitarse cambios bruscos en espesores y las combinaciones de secciones pesadas y ligeras. Si la pieza que va a colarse tiene secciones fresadas, debe diseñarse con vertederos o alimentadores en la parte superior para proporcionar metal líquido durante el proceso de solidificación. Las secciones pesadas deben colocarse en la parte más alta del molde y se pueden utilizar enfriadores en la arena adyacente a las secciones de enfriamiento lento.

La porosidad se presenta siempre que los gases queden atrapados en la fundición; por lo general, las porosidades son más abundantes y más pequeñas que las cavidades por contracción y pueden distinguirse por su forma redondeada (figura 4.9). Durante la colada puede quedar aire atrapado, debido a la repentina precipitación del metal dentro del molde.



FIGURA 4-9: Porosidad en una pieza colada de aluminio.

Como generalmente los gases son más solubles en metal líquido que en el sólido, los gases disueltos pueden liberarse durante la solidificación. Los gases también pueden producirse por reacción del metal líquido con sustancias volátiles, como humedad que pudiera haber en el molde. La porosidad puede reducirse considerablemente si se ventila en forma adecuada el molde y se evita compactar exageradamente la arena.

Las fisuras por calor son grietas causadas por las intensas deformaciones de contracción que se crean en la pieza colada sólida precisamente después de la solidificación. Una causa común es el molde de arena que no cede, impidiendo contraerse a la pieza colada. Las fisuras por calor también pueden resultar de las mismas condiciones no uniformes de enfriamiento que dan lugar a las cavidades por encogimiento. El diseño adecuado de la pieza que va a colarse minimizará el peligro de las fisuras por calor.

4.5 Procesos de fundición que emplean moldes aislantes.

La fundición en arena y la fundición de precisión son dos procesos para la fabricación de piezas fundidas que emplean moldes relativamente aislantes. Los

dos son procesos muy viejos y ambos son comercialmente importantes hoy en día.

La figura 4.10 ilustra el proceso de fundición en arena usado para fabricar un segmento de un radiador casero. Tres segmentos del molde en arena son fabricados separadamente y ensamblados para producir la cavidad del molde con la forma de la fundición final descrita. Se emplean modelos de madera o de metal para hacer la impresión apropiada en la mitad superior e inferior del molde; la arena es apisonada sobre el modelo. Los segmentos externos del molde (cúpula y fondo) retienen la forma de la impresión debido a que la arena empleada contiene un pequeño porcentaje de agua y arcilla y algunas veces otros agentes aglutinantes. El segmento interno (corazón) es fabricado generalmente de arena aglutinada con aceite o resinas y cocida para lograr una mayor resistencia y para reducir la cantidad de componentes volátiles.

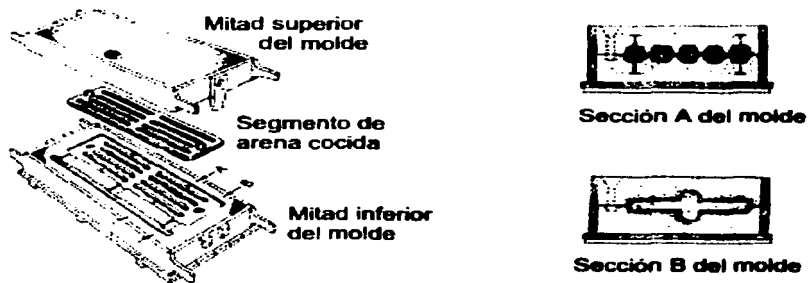


FIGURA 4-10: Proceso de moldeo en arena usado en la fabricación de un radiador casero.

Desde el punto de partida del flujo de calor, la característica importante de la solidificación de un metal en procesos como los descritos anteriormente es que

el metal es mucho mejor conductor de calor que el molde. Así, la velocidad de solidificación depende principalmente de las propiedades térmicas del molde. La conductividad térmica del metal prácticamente no tiene influencia. También excepto en secciones relativamente pesadas de fundiciones de precisión en cáscara, el molde puede ser considerado que es semi-infinito en extensión; esto es, la parte exterior del molde no se calienta durante la solidificación. En el problema de flujo de calor esquematizado en la figura 4.11 se supone que el metal es vaciado sin sobrecalentamiento, esto es, exactamente en su punto de fusión T_M .

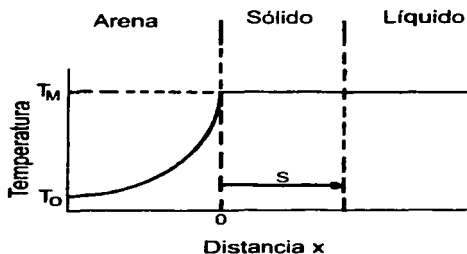


FIGURA 4-11: Perfil aproximado de temperatura en la solidificación de un metal puro, vaciado en su punto de fusión contra una pared plana y lisa de un molde.

Se considera primero el flujo de calor unidireccional. El metal es vaciado a su punto de fusión frente a una pared plana, gruesa, del molde inicialmente a temperatura ambiente T_0 . Así, la superficie del molde es calentada súbitamente a T_M en un tiempo $t = 0$. Este es un problema de flujo de calor transitorio, en una dimensión, y la solución debe concordar con la ecuación diferencial parcial

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_m \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad 4.1$$

donde

a_m = difusividad térmica del molde, cm^2/s

K_m = conductividad térmica del molde, cal/cm ($^\circ\text{C}$ s)

P_m = densidad del molde, g/cm^3

T = tiempo, s

x = distancia desde la pared del molde, cm (negativa dentro del molde)

La solución a esta ecuación para las condiciones a las fronteras establecidas antes, da la temperatura T en el molde como una función del tiempo t, a una distancia de la superficie del molde x:

$$\frac{T - T_M}{T_o - T_M} = \text{erf} \frac{-x}{2\sqrt{\alpha_m t}} \quad 4.2$$

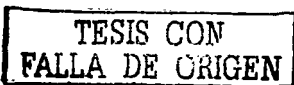
donde *erf* denota la función error. La función error de cero es cero, y la función error del infinito es la unidad.

La velocidad de flujo de calor dentro del molde en la interfase molde-metal esta dada por

$$\left(\frac{q}{A}\right)_{x=0} = K_m \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=0} \quad 4.3$$

Donde x aumenta positivamente de izquierda a derecha en la figura 4.11, q es la velocidad de flujo de calor y A es el área de interfase molde-metal. Por diferenciación parcial de la ecuación (4.2) con respecto a x, dejando $x = 0$ y combinando los resultados con la ecuación (4.3), la velocidad de flujo de calor a través de la interfase molde-metal está visto que es

$$\left(\frac{q}{A}\right)_{x=0} = -\sqrt{\frac{K_m \rho_m c_m}{\pi}} (T_M - T_o) \quad 4.4$$



donde c_m es el calor específico del material de moldeo. Ahora, el calor que entra al molde proviene solamente del calor de fusión del metal que se solidifica, ya que tanto el metal sólido como el líquido están a exactamente T_M (figura 4.11).

Así,

$$\left(\frac{q}{A}\right)_{x=0} = -\rho_s T \left(\frac{\partial s}{\partial t}\right) \quad 4.5$$

donde S = espesor solidificado. Combinando (4.4) y (4.5) e integrando desde $S = 0$ en $t = 0$,

$$S = \frac{2}{\pi} \left(\frac{T_M - T_o}{\rho_s H} \right) \sqrt{K_M \rho_M c_m} \sqrt{t} \quad 4.6$$

La ecuación (4.6) predice la manera en la cual las propiedades térmicas del metal y del molde se combinan para determinar la velocidad de solidificación de un metal fundido dentro de un molde relativamente aislante. La relación es más precisa para fundiciones en arena de alta conductividad tales como los metales no ferrosos (aleaciones base Cu-, Al, y Mg-) que para hierro y acero. Nótese que una alta temperatura de fusión y un bajo calor de fusión (sobre una base de volumen) favorecen una rápida solidificación. El producto $K_M \rho_M c_m$ es una medida de la velocidad a la cual el molde puede extraer calor y es algunas veces llamado la difusividad térmica.

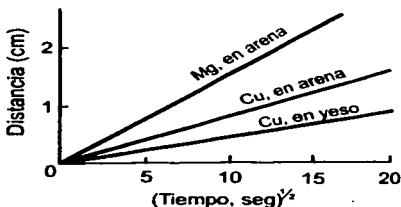


FIGURA 4-12: Distancia Solidificada contra raíz cuadrada del tiempo para varios metales puros en moldes aislantes.

El espesor de metal sólido es una función parabólica del tiempo, lo que significa que la velocidad de solidificación es inicialmente muy rápida y disminuye al calentarse el molde. La figura 4.12 muestra el amplio rango de velocidades de solidificación obtenidas en la práctica, dependiendo del metal y del molde y de la temperatura del molde.

El problema de solidificación en una dimensión sirve para ilustrar muchos de los aspectos térmicos importantes de la solidificación, pero para algunos propósitos es importante evaluar los tiempos y las velocidades de solidificación de formas complejas. Se considera de nuevo la cuestión del flujo de calor en una pared del molde; el contorno de la pared del molde tiene alguna influencia sobre su habilidad para extraer calor. Por ejemplo, la geometría del flujo de calor en una pared del molde de contorno cóncavo o convexo puede ser comparada con aquella en una pared del molde plano. El flujo de calor en la superficie cóncava será divergente y por consiguiente, ligeramente más rápido y en la superficie convexa menos rápido que en una pared plana. Para formas simples, no obstante, las diferencias no serán grandes y una aproximación útil es suponer que un centímetro cuadrado dado de la superficie del molde tiene una habilidad fija para extraer calor sin considerar su contorno o localización en la fundición.

Con esta aproximación podemos, ahora, reemplazar S en la Ecuación 4.6 con V_s/A , donde V_s es el volumen solidificado en el tiempo t y A es el área de la interfase molde-metal, o dejando $t = t_f$, donde t_f es el tiempo de solidificación total de una fundición de volumen V,

$$\frac{V}{A} = \frac{2}{\pi} \left(\frac{T_M - T_o}{\rho_s H} \right) \sqrt{K_m \rho_m c_m} \sqrt{t_f} \quad 4.7$$

$$\text{con } t_f = C \left(\frac{V}{A} \right)^2 \quad 4.8$$

donde C es una constante para un material molde-metal y una temperatura del molde dados.

La ecuación 4.8 es la bien conocida regla de Chvorinov usada para comparar los tiempos de solidificación de fundiciones de forma simple. Esta establece que el tiempo total de solidificación de tales fundiciones es proporcional a la razón del cuadrado de la relación del volumen área de las fundiciones.

4.6 Flujo de metal en el canal de llenado.

En algunas instancias, se pierde calor del metal apreciablemente en el sistema del corredor. La proporción de caída en la temperatura puede ser simplemente calculada para moldes de arena u otros aislantes y aun más simplemente para moldes de metal donde el flujo de calor es controlado por la resistencia de superficie de contacto del molde-metal. Considérese el metal fluyendo por un corredor cilíndrico largo de radio a , figura 4.12. El cálculo de la velocidad media de flujo del metal (la proporción del flujo volumétrico dividido por el área de la sección transversal) es v . El flujo de calor es controlado por la superficie de contacto, y así el gradiente de temperatura radial en el metal y en el molde es despreciado. Como un elemento del metal líquido entra al corredor y se mueve a lo largo a una velocidad v , se pierde calor en forma radial de tal forma que la distribución de temperatura longitudinal instantánea en el líquido es como se muestra en la figura 4.13.

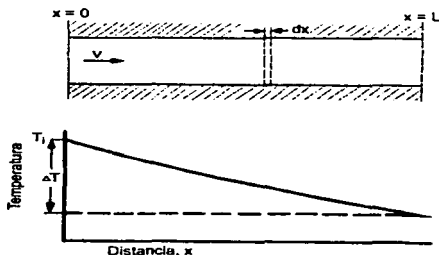


FIGURA 4-13: Caída de temperatura en un metal que fluye en un corredor. Arriba: Se muestra el corredor; abajo: temperatura del metal.

Un balance de calor es escrito enseguida para el elemento en movimiento, despreciando el pequeño transporte de calor por conducción en la dirección del flujo:

Elemento de salida de calor = calor entrando al molde

$$\rho_L c' \frac{dT}{dt} (\pi a^2 dx) = -h(T - T_o)(2\pi a dx) \quad 4.9$$

donde ρ_L y c' son la densidad y el calor específico del metal líquido, respectivamente, T es la temperatura del metal, T_o la temperatura del molde y h es la resistencia de la superficie de contacto molde-metal. De esta forma, la relación del cambio de temperatura del metal que fluye es

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{2h(T - T_o)}{a\rho_L c'} \quad 4.10$$

El tiempo t_r para un elemento del metal que va de $x = 0$ a $x = L$ es

$$t_r = \frac{L}{v} \quad 4.11$$

y la caída de temperatura experimentada por el elemento ΔT se obtiene por integración de la ecuación 4.10 desde $t = 0$ a $t = t_r$. Para una ΔT comparada con $T - T_o$, el resultado es simplemente

$$\Delta T = \frac{2h(T_i - T_o)L}{a\rho_L c' v} \quad 4.12$$

donde T_i es la temperatura del metal cuando entra al canal.

4.7 Solidificación en ensayos de fluidez.

En el instante en que este metal ingresa al canal, la solidificación empieza a la entrada del canal. Mientras fluye hacia abajo del canal, la solidificación empieza en este sitio también. Sin embargo, puesto que el enfriamiento empezó

primero a la entrada del canal, es aquí que el flujo cesa. La figura 4.14 ilustra el proceso antes mencionado. La fluidez determinada como anteriormente se menciona esta influenciada por (1) variables del metal tales como la temperatura, viscosidad, y calor de fusión; (2) variables del molde y molde de metal tales como resistencia al flujo de calor en la interfase, conductividad del molde, densidad, y calor específico; y (3) variables de prueba tales como el calor aplicado al metal y el diámetro del canal.

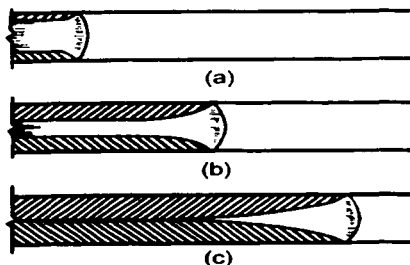


FIGURA 4-14: Flujo y solidificación de un metal puro en un canal de flujo, sin sobrecalentamiento. (a) Inicio del flujo; (b) durante el flujo; (c) fin del flujo.

Para ilustrar los parámetros importantes, puede hacerse un análisis simplificado, despreciando los efectos de la fricción y de la aceleración y suponiendo que no ocurre separación de la corriente de flujo. Llevaremos acabo aquí este análisis para el caso (mostrado en la figura 4.14) de un metal puro vertido sin sobrecalentamiento y asumir que el flujo de calor esta controlado por el coeficiente de transferencia de calor, h . La solidificación en cada punto en el canal de entrada ocurre en una proporción que es independiente del flujo de fluido. De esta manera, la solidificación de cada elemento del canal de longitud dx solidifica completamente en un tiempo dado por la ecuación

$$t_f = \frac{\rho_s H}{h(T_M - T_o)} \frac{v}{A} \quad 4.13$$

con v/A igual a $a/2$ para un canal de sección transversal circular de radio a . El elemento exactamente a la entrada del canal solidifica a un tiempo t_f dado por

$$t_f = \frac{\rho_s Ha}{2h(T_M - T_o)} \quad 4.14$$

donde t_f es el tiempo después de que el metal entra al canal de flujo.

Ahora simplificamos el problema del flujo de fluido un poco despreciando los efectos de la fricción y de la aceleración y asumiendo que no ocurre separación de la corriente de flujo. Entonces, para una altura de caída constante aplicada, la velocidad del extremo de la corriente es una constante v . La longitud total del flujo antes de que el canal de entrada solidifique (i.e., la fluidez) es por lo tanto

$$L_f = \frac{\rho_s Hav}{2h(T_M - T_o)} \quad 4.15$$

donde L_f es la fluidez. El sobrecalentamiento incrementa la fluidez en una forma simple cuando el flujo de calor está controlado por h . La longitud adicional de flujo por sobrecalentamiento es simplemente la longitud requerida para disipar el sobrecalentamiento de acuerdo con la ecuación 4.12. Combinando las ecuaciones 4.12 y la 4.15 con $\rho_s = \rho_L$ da la fluidez para el metal sobrecalentado como

$$L_f \cong \frac{\rho_s Hav}{2h(T_M - T_o)} (H + c' \Delta T) \quad 4.16$$

donde ΔT es el sobrecalentamiento. La ecuación 4.16 ilustra muchas de las variables importantes que influyen la fluidez de las aleaciones. La longitud de flujo depende sensiblemente del tamaño del canal y del coeficiente de transferencia de calor de la superficie de contacto. Se incrementa

aproximadamente de forma lineal con el sobrecalentamiento. Depende de la velocidad de flujo y por lo tanto aproximadamente de la raíz cuadrada de la altura de caída del metal, de acuerdo con la ecuación 3.3.

La estructura de la prueba de fluidez de fundiciones refleja el mecanismo de solidificación discutido arriba. La figura 4.15 muestra la sección transversal longitudinal de un aluminio casi puro. La cavidad por contracción esta en la extremidad a la cabeza de la pieza fundida porque esta era completamente líquida en el momento de cese del flujo. Como se muestra en la figura 4.14. Los cristales más al final del punto de la pieza fundida ligeramente flujo arriba, es indicativo del hecho de que ellos crecieron mientras el flujo estaba ocurriendo. Las regiones cercanas a la entrada del canal tienen granos toscos los que no señalan corriente arriba. Esta es la región de colado donde el sobrecalentamiento fue disipado; solidificó después que el flujo cesó.

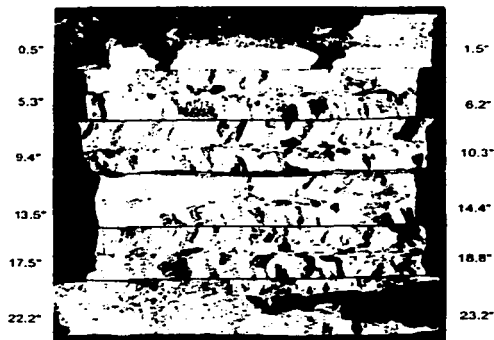
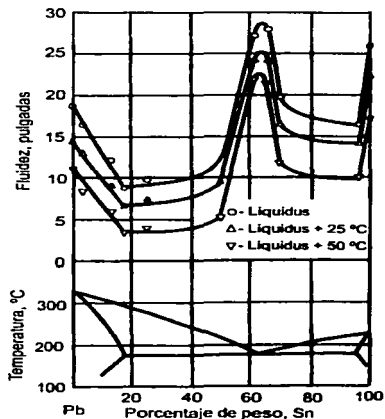


FIGURA 4-15: Macroestructura de un aluminio cercano a la pureza en una prueba de fluidez con sobrecalentamiento. El metal fluyó de izquierda a derecha y de arriba abajo. Los números a los lados son la distancia de las secciones mostradas a lo largo del canal.

El análisis presentado aquí ha sido una versión simplificada de uno desarrollado originalmente por Ragone et al. y posteriormente extendido por otros. Este análisis considera con más rigor aspectos del problema del flujo de fluido y trata casos de flujo de calor controlados por "h".

En la práctica hay dos factores importantes que influyen la fluidez y no están incluidos en la ecuación 4.16: tensión superficial, o películas superficiales y la contrapresión de los gases del molde. La tensión superficial no tiene un efecto significativo excepto en canales muy pequeños (menos de casi 1/10" de diámetro). Sin embargo, puede impedir la obtención de detalles agudos en la fundición salvo cuando la presión por altura de caída se incrementa para vencerla.

La adición de elementos de aleación a un metal puro siempre disminuye la fluidez (a un sobrecalentamiento dado). La figura 4.16 muestra los resultados típicos para una serie de aleaciones estaño-plomo del trabajo de Ragone et al. La razón para la disminución es que la solidificación ya no tiene lugar con frente plano.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

FIGURA 4-16: Fluidez en el sistema plomo-estaño.

Las dendritas que se forman crean más resistencia al flujo de fluido en una etapa anterior a la solidificación. La figura 4.17 muestra esto esquemáticamente para granos en forma columnar tal como se encuentran generalmente en pruebas de fluidez de fundiciones de aleaciones diluidas, sin refinamiento de grano. En aleaciones de grano refinado, algunos granos finos son transportados junto con el extremo de la corriente del flujo. De esta manera, el paro del flujo puede ser (como se muestra en la figura 4.18) por la formación de sólido suficiente en la extremidad para obstruir el flujo.

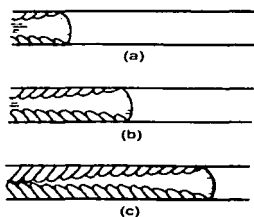


FIGURA 4-17: Flujo y solidificación de una aleación diluida en un canal de flujo. (a) Inicio del flujo; (b) durante el flujo; (c) fin del flujo.

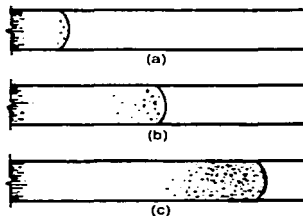


FIGURA 4-18: Flujo y solidificación de una aleación con estructura de granos equiaxiales finos. (a) Inicio del flujo; (b) durante el flujo; (c) fin del flujo.

Cuando la composición de la aleación se acerca al eutectico, se encuentra que la fluidez aumenta por lo general. Las primeras especulaciones fueron que esto era por los cambios en la viscosidad del metal cercano al eutectico, pero ahora se sabe que el incremento resulta simplemente por el comportamiento de la solidificación. El eutectico solidifica de forma muy parecida al metal puro de la figura 4.14.

La fluidez limita el espesor de fundiciones de varias aleaciones que pueden ser vaciadas convenientemente. Para fundiciones en arena, este límite es de casi 1/8" para aleaciones no ferrosas y hierro colado y 1/4" para acero. Fundiciones mucho más delgadas son hechas en material con revestimiento mediante el uso de moldes calentados y la aplicación de presión como se describió anteriormente. Es interesante que sea más difícil llenar moldes con cavidades de sección delgada con acero que con hierro colado aunque la fluidez del acero (a un sobrecalentamiento dado) está cercano a la del hierro colado. Esto es porque con refractarios y hornos usualmente usados para acero, no es posible obtener el alto sobrecalentamiento regularmente usado en hacer secciones delgadas de fundiciones de hierro.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

5. TRABAJO EXPERIMENTAL

5.1 Fabricación del modelo para el ensayo de fluidez.

Para llevar a cabo las pruebas de fluidez se construyó un modelo de canales rectos similar al empleado por Cooksey et al⁽¹⁹⁾. La variante hecha a este modelo radica en que el orificio de colado no se conecta directamente con el canal de alimentación común, sino que entre estos existe un canal de menor longitud el cual los une.

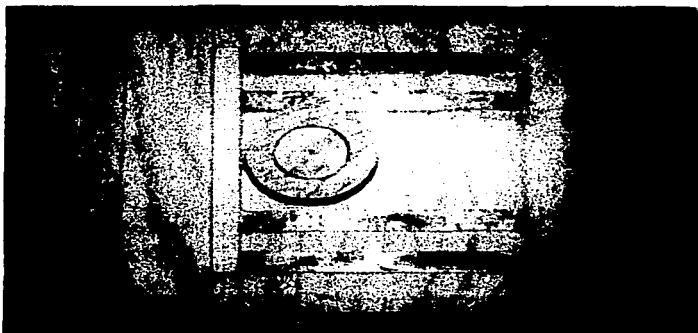


FIGURA 5-1: Modelo utilizado para los ensayos de fluidez.

La explicación a esta variante es que en otros experimentos para pruebas de fluidez en los que se usó este modelo los canales por los que fluyó el metal se llenaron por completo, lo que impidió determinar el índice de fluidez. Con esta variante se trató evitar tal situación.

Sobre una base de madera se fijaron cuatro láminas metálicas paralelas entre si de 200 mm largo y 20 mm de ancho, cada una con espesor de: 1.9 mm,

52

1.6 mm, 1.3 mm y 0.9 mm; estos serían los canales de flujo. Al extremo de las cuatro láminas metálicas se fijo una barra de madera de 230 mm de longitud, 20 mm de ancho y 4 mm de alto; este sería el canal común de alimentación. Este canal de alimentación común se une un orificio de alimentación el cual fue hecho con un cilindro cónico de madera de 35 mm de alto y con un diámetro superior de 50 mm y el diámetro inferior de 45 mm.

Para moldear la arena se emplearon dos cajas de madera rectangulares de 40 mm de largo por 30 cm de ancho en su interior y 2 cm de espesor, la altura de las cajas era de 5 cm para la parte del orificio de colado y de 4 cm para la sección que contiene la impresión del modelo para el ensayo de la fluidez.

5.2 Preparación de los moldes para las pruebas de fluidez.

Para hacer los moldes donde se realizaron las pruebas de fluidez se empleó arena sílica granulometría 90/95. La cantidad de aglutinante, tipo silicato de sodio, que se le añadió fue el 8% del peso total de la arena requerida para hacer el molde. La arena para el molde se mezcló por medio de unas espas, las que servirían para revolver la arena. Mientras se revolvía la arena el aglutinante se vertió dentro del depósito para que se mezclara con la arena. El tiempo necesario para que el aglutinante se mezclara bien con la arena y la "humedeciera" por completo a fin de evitar pequeñas aglomeraciones de este en la arena osciló entre los 6 y 8 minutos. Preparada la arena se puso en las cajas de moldeo y se apisonó bien hasta comprimirla lo mejor posible, posteriormente se le hicieron pequeños orificios para que al exponerla al flujo del gas CO₂ se obtuviera un endurecimiento uniforme en todo el molde. Una de las cajas sirvió únicamente para moldear la tapa, mientras que la otra fue en las que se realizaron las impresiones del molde hecho.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

5.3 La fundición.

La aleación empleada para las pruebas de fluidez fue una aleación aluminio silicio (356). Esta se fundió a partir de unos lingotes en un horno de crisol calentado por combustión de gas hasta obtener una fundición completa.

5.4 Desarrollo del experimento.

Listos los moldes para las pruebas se colocaron cerca del horno de fundición, donde la aleación de aluminio ya estaba fundida, para evitar una alta caída de temperatura en el lapso en el que se transfirió el metal del horno al molde. La temperatura de la fundición se fijó en 600° C, misma que se midió con un termopar tipo cromel-alumel. Se usó un cucharón de acero al carbón cubierto con una capa aislante para evitar que desprendiera partículas de óxido o impurezas, además se calentó previamente para evitar que afectara en una caída alta en la temperatura de la fundición.

En total se realizaron nueve pruebas; cinco de ellas a presión atmosférica a temperaturas de 650 °C (dos), 700 °C, 750 °C y 800 °C; A las restantes cuatro se les aplicó una presión de 10.52 kgs. mediante un dispositivo de acero a temperaturas de 700 °C (dos), 7500 °C y 800 °C.

5.5 Ensayos de tensión

Para llevar a cabo los ensayos de tensión se extrajeron dos piezas de cada una de las piezas de fundición resultantes y se les desbastó cuidadosamente para darles la forma de la probeta adecuada y también para que todas tuvieran el mismo espesor a lo largo de la probeta ya que en su forma original tenían un espesor no uniforme. El espesor final que se les dio fue de 4 mm, se adoptó este por que fue el mínimo que se encontró en una de las piezas extraídas.

Preparadas las probetas se realizaron los ensayos de tensión en una Máquina Universal de Pruebas de Tensión marca "SHIMADZU" con una capacidad

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

de 30 toneladas a una velocidad de 3 mm/s. Los resultados de tales pruebas se muestran en el capítulo de resultados.

5.6 Pruebas de dureza.

Las pruebas de dureza, al igual que las de tensión, se realizaron sobre piezas que se extrajeron de las piezas de fundición resultantes, de las que se extrajo solo una muestra para que se realizaran las pruebas. Debido a la irregularidad superficial que presentaba cada una de ellas, fue necesario desbastarlas con papel abrasivo (lija) número 600 hasta que presentarán una superficie regular. Hacer esto fue necesario debido a que las irregularidades podían afectar de forma sensible las lecturas de las pruebas que se realizarán.

Listas las muestras se hicieron las pruebas de dureza sobre cada una de ellas. El tipo de dureza que se llevó a cabo fue la Rockwell B en una Máquina Wilson/Rockwell Series 500, con escala B, penetrador de esfera de 1/16" con una capacidad de carga menor de 10 y mayor de 100. En cada una de las piezas se realizaron 5 pruebas, con el objeto de obtener una dureza promedio y evitar tomar como ciertas las pruebas que pudieran tener errores debido a las porosidades que se presentaron en las piezas. Los resultados obtenidos de dichos ensayos se muestran en el capítulo de resultados.

5.7 Metalografía

La última parte experimental de este trabajo consistió en realizar un estudio metalográfico de cada una de las piezas de fundición resultantes, para ello se extrajo una pequeña sección de metal de la probetas que se sometieron a ensayo de tensión, esta porción fue uno de los extremos en que se produjo la ruptura de la probeta, posteriormente se encapsularon en una resina preparada para facilitar su manejo al momento de pulirlas, una vez en la cápsula de resina cada una de las piezas se desbaste con papel abrasivo (lija) del número 400 hasta que las piezas tuvieran un rayado uniforme y en una sola dirección, después se

giro la pieza 90° y se desbaste con papel abrasivo del número 600 hasta que las rayas por desbaste fueran uniformes y estuvieran en una sola dirección. Cabe destacar la importancia de que las piezas fueran lo más uniforme posibles y que el desbaste se ubicará en un mismo plano, para que al momento de dar el pulido final "a espejo" no hubiera dificultades y las rayas pudieran eliminarse en el mayor grado posible. En el caso del aluminio es especialmente difícil lograr un pulido casi perfecto, sino se cuenta con el material necesario, debido a su poca dureza que presenta al desbaste.

Una vez desbastadas las piezas de aluminio con abrasivo y alcanzado la mayor uniformidad posible en el mismo plano, estas se pulieron con una máquina pulidora de disco sobre la cual se puso un paño de tela y se colocaban sobre él una porción de alumina con suministro de agua hasta alcanzar el acabado a espejo.

Pulidas las piezas, fueron atacadas con ácido fluorhídrico en una proporción de 0.5% diluido en agua. Durante 20 segundos se sumergieron en esta solución, después se lavaron con agua y se les puso alcohol para finalmente secarlas por completo con aire caliente. Este procedimiento se llevó a cabo con todas las piezas. Finalmente se fotografió cada una de ellas en un microscopio a 600 aumentos. Los resultados de esta parte experimental y las fotos se presentan en el capítulo de resultados.

6. RESULTADOS

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos en cada una de las etapas del trabajo experimental desarrollado para el estudio de la fluidez y propiedades mecánicas del metal en estudio.

6.1 Piezas de fundición obtenidas de los ensayos de fluidez.

Las figuras 6-1 a 6-9 muestran cada una de las piezas de fundición obtenidas en los ensayos de fluidez. Las piezas de las figuras 6-1 a 6-4 son las que se sometieron a una presión mayor a la atmosférica, mientras que las figuras 6-5 a 6-9 muestran las piezas que se obtuvieron a presión atmosférica.

Piezas con presión aplicada.



FIGURA 6-1: Pieza 01, temperatura de colado 700° C.



FIGURA 6-2: Pieza 02, temperatura de colado 700° C.



FIGURA 6-3: Pieza 03, temperatura de colado 750 °C.



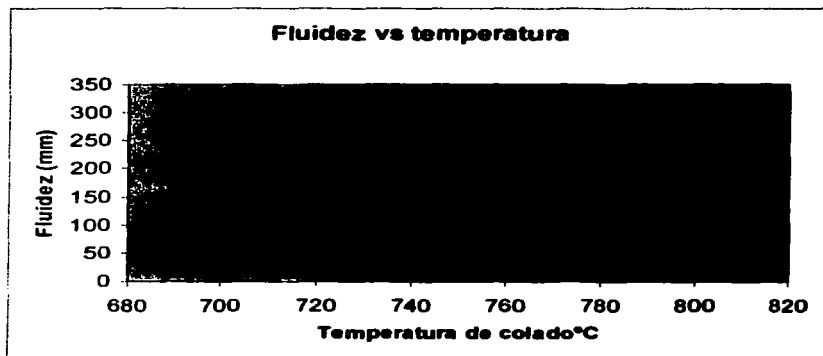
FIGURA 6-4: Pieza 04, temperatura de colado 800 °C.

La tabla 6-1 nos muestra los resultados de fluidez obtenidos en cada una de las piezas de fundición que se realizaron con una presión mayor a la atmosférica. Cabe destacar que no se consideró cada canal por separado, sino que el índice de fluidez fue la suma de los cuatro canales. En la gráfica 6-1 se grafica el índice de fluidez contra temperatura de colado.

TABLA 6-1
FLUIDEZ CON PRESION APLICADA

	Pieza 01	Pieza 02	Pieza 03	Pieza 04
T (°C)	700	700	750	800
L ₁ (mm)	30.6	32.4	90.9	83.7
L ₂ (mm)	2.3	15.2	120.2	96.4
L ₃ (mm)	15.9	8.5	55.7	60.9
L ₄ (mm)	8.8	18.3	30.1	42
TOTAL	57.6	74.4	296.9	283

Grafica 6-1



Piezas obtenidas a presión atmosférica.



FIGURA 6-5: Pieza 05, temperatura de colado 650° C.



FIGURA 6-6: Pieza 06, temperatura de colado 650° C.



FIGURA 6-7: Pieza 07, temperatura de colado 700° C.



FIGURA 6-8: Pieza 08, temperatura de colado 750° C.



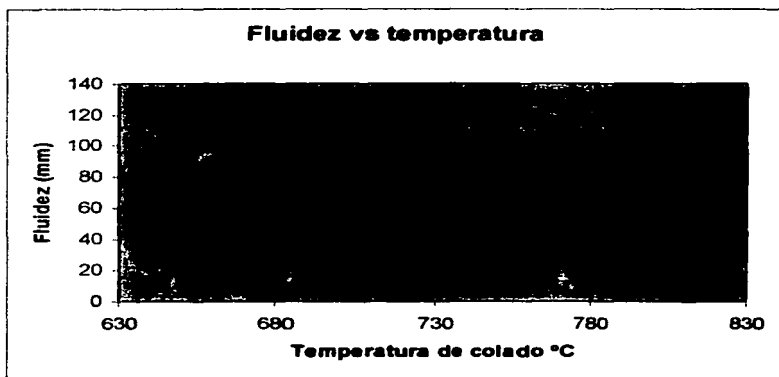
FIGURA 6-9: Pieza 09, temperatura de colado 800° C.

La tabla 6-2 nos muestra los resultados de fluidez obtenidos en cada una de las piezas de fundición que se realizaron a presión atmosférica. De la misma forma que la anterior, se consideró el índice de fluidez como la suma de la fluidez de todos los canales. En la gráfica 6-2 se graficó el índice de fluidez contra temperatura de colado.

**TABLA 6-2
FLUIDEZ A PRESION ATMOSFERICA**

	Pieza 05	Pieza 06	Pieza 07	Pieza 08	Pieza 09
T (°C)	650	650	700	750	800
L ₁ (mm)	7.4	6.7	18.3	49	43.9
L ₂ (mm)	2.2	3.7	3.1	65.4	27.9
L ₃ (mm)	0	3.6	1.9	2.5	23.3
L ₄ (mm)	0	2.3	1.5	1.8	10.3
TOTAL	9.6	16.3	24.8	118.7	105.4

Gráfica 6-2



6.2 Ensayos de tensión.

En las siguientes figuras se muestran las piezas que se sometieron a ensayos de resistencia a la tensión, en ellas se puede observar el lugar donde fracturaron.

Probetas extraídas de las piezas que se colaron con presión aplicada.



FIGURA 6-10: Probeta extraída de la pieza 01, colada a 700° C.

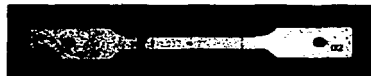


FIGURA 6-11: Probeta extraída de la pieza 02, colada a 700° C.



FIGURA 6-12: Probeta extraída de la pieza 03, colada a 750° C.



FIGURA 6-13: Probeta extraída de la pieza 04, colada a 800° C.

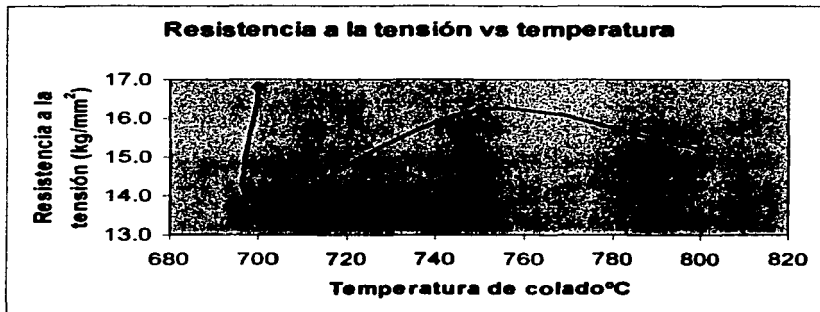
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Los resultados de las pruebas de tensión realizadas a cada una de las piezas obtenidas con una presión mayor a la atmosférica se muestran en la tabla 6-3. En la gráfica 6-3 se grafica la resistencia a la tensión contra temperatura de colado.

**TABLA 6-3
PIEZAS CON PRESION APLICADA**

Pieza	Temperatura	Resistencia a la tensión
No.	°C	kg/mm²
01	700	16.8
02	700	13.8
03	750	16.2
04	800	15.2

Gráfica 6-3



Probetas extraídas de las piezas que se colaron a presión atmosférica.



FIGURA 6-14: Probeta extraída de la pieza 05, colada a 650° C.



FIGURA 6-15: Probeta extraída de la pieza 06, colada a 650° C.

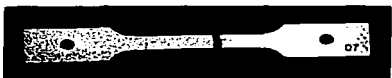


FIGURA 6-16: Probeta extraída de la pieza 07, colada a 700° C.



FIGURA 6-17: Probeta extraída de la pieza 08, colada a 750° C.



FIGURA 6-18: Probeta extraída de la pieza 09, colada a 800° C.

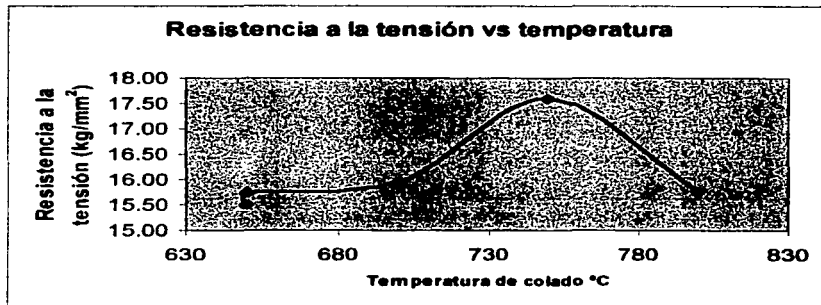
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Los resultados de las pruebas de tensión realizadas a cada una de las piezas obtenidas a presión atmosférica se muestran en la tabla 6-4. En la gráfica 6-4 se graficaron los resultados de resistencia a la tensión contra temperatura.

**TABLA 6-4
PIEZAS A PRESIÓN ATMOSFERICA**

Pieza	Temperatura	Resistencia a la tensión
No.	°C	kg/mm ²
05	650	15.50
06	650	15.75
07	700	15.96
08	750	17.59
09	800	15.75

Grafica 6-4



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

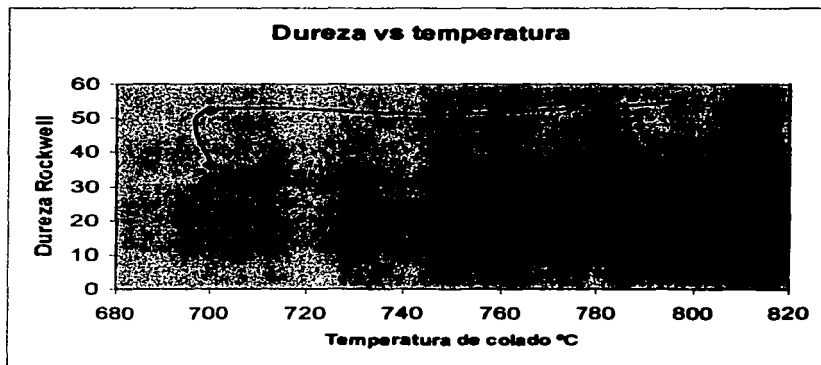
6.3 Ensayos de dureza

Los resultados de las pruebas de dureza se muestran en la tabla 6-5 para las piezas obtenidas con una presión mayor a la atmosférica. En la gráfica 6-5 se grafican los resultados de dureza contra temperatura de colado.

Tabla 6-5
Piezas con presión aplicada

Pieza No.	Temperatura °C	Dureza Rockwell
01	700	36.25
02	700	52.05
03	750	51.13
04	800	55

Gráfica 6-5



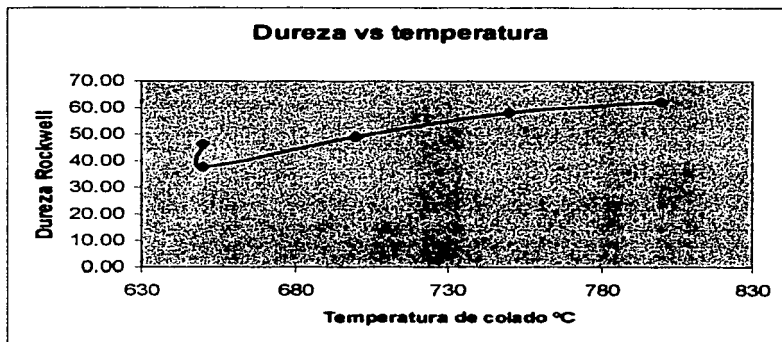
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Los resultados de las pruebas de dureza se muestran en la tabla 6-6 para las piezas obtenidas a presión atmosférica. En la gráfica 6-6 se grafican los resultados de dureza contra temperatura de colado.

Tabla 6-6

Pieza	Temperatura	Dureza
No.	°C	Rockwell
05	650	46.48
06	650	37.73
07	700	49.00
08	750	58.10
09	800	62.20

Gráfica 6-6



6.4 Metalografía

En las figuras 6-19 a 6-27 se muestran las fotografías tomadas a las estructuras resultantes de cada una de las piezas de fundición obtenidas. De cada pieza se tomaron dos muestras de distinto lugar con el objeto de notar las posibles diferencias en la misma pieza.

Piezas obtenidas con presión aplicada.

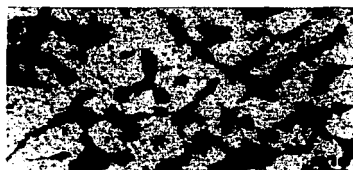


FIGURA 6-19: Metalografía de la pieza 01.



FIGURA 6-20: Metalografía de la pieza 02

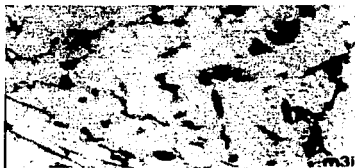


FIGURA 6-21: Metalografía de la pieza 03.

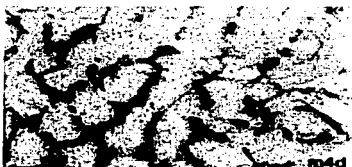


FIGURA 6-22: Metalografía de la pieza 04.

Piezas obtenidas a presión atmosférica.

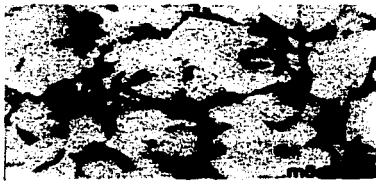


FIGURA 6-23: Metalografía de la pieza 05.



FIGURA 6-24: Metalografía de la pieza 06.



FIGURA 6-25: Metalografía de la pieza 07.



FIGURA 6-26: Metalografía de la pieza 08.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

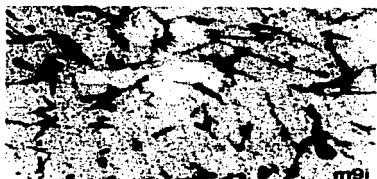


FIGURA 6-27: Metalografías de la pieza 09.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

7. DISCUSION DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En el presente capitulo se presenta una breve discusión y algunas conclusiones derivadas de los resultados obtenidos del trabajo experimental, que se presentan en el capitulo anterior.

En las figuras 6-1 a la 6-4 se muestran las fotos de las piezas fluidas a las que se les aplicó presión y se observa que la fluidez de estas aumentó a medida que la temperatura aumentó, fenómeno que era de esperarse, sin embargo la gráfica 6-1 donde se grafica fluidez contra temperatura de colado se aprecia que esta fluidez disminuyó ligeramente a medida que la temperatura de colado se acercó a los 800 °C. Este fenómeno se observa también en las piezas de fundición que se obtuvieron a presión atmosférica, figuras 6-5 a 6-9. Cuantitativamente esta disminución es casi la misma para ambas (13 mm), sin embargo representa una disminución del 4,68% y del 11.2% en fluidez para las piezas obtenidas con presión aplicada y a presión atmosférica respectivamente. Este comportamiento en la disminución de fluidez puede explicarse por la formación de óxidos de aluminio a una temperatura cercana a los 800° C, que causaron un aumento significativo en la viscosidad de la aleación y, por consiguiente, una disminución en la fluidez.

Los resultados de los ensayos de tensión llevados a cabo y que se graficaron contra la temperatura de colado en la gráfica 6-3, para piezas obtenidas con presión aplicada, muestran una irregularidad muy pronunciada, la que nos impide saber con certeza la tendencia que seguirían los resultados a medida que la temperatura aumenta. Estas irregularidades en los resultados se deben a las impurezas que presentaron estas piezas en el punto de fractura, principalmente las piezas 02 y 03, que es donde se encuentran las irregularidades, sin embargo las piezas 01 y 04 muestran, aparentemente, una mayor pureza en el punto de fractura. Si tomáramos estos puntos se vería que existe una tendencia a disminuir en la resistencia a la tensión. Pero de acuerdo con la gráfica 6-4, donde se grafican estos mismos parámetros pero de las piezas obtenidas a presión

atmosférica, la tendencia de los resultados es mantenerse constantes (15.50 – 15.75 kg/cm²), sin considerar la pieza 05 que fracturó en el "cuello", y considerando a la pieza 08, colada a 750° C, como un caso diferente que presentó mayor resistencia que las demás.

En las pruebas de dureza vemos una tendencia de los resultados a mantenerse constantes, gráfica 6-5, para las piezas obtenidas con presión aplicada, mientras que para las piezas obtenidas a presión atmosférica se aprecia un aumento en el valor de la dureza a medida que la temperatura se eleva, gráfica 6-6, es decir, cuando se acerca a los 800° C.

Revisando las fotografías de las metalografías hechas observamos que la mayoría de las piezas presentaron una formación de estructuras muy similares, por lo que podemos decir que estas no son la razón esencial en las diferencias de los resultados en las pruebas mecánicas. Las diferencias que podemos apreciar en estas metalografías es la porosidad que muestran algunas piezas como la m1i mostrada en la figura 6-19 y la m5d mostrada en la figura 6-23, esta porosidad son, en parte, las que afectaron los resultados de las pruebas y por la que no se pudo tener resultados más consistentes, como la pieza 02. Los principales factores que afectaron las lecturas de las pruebas realizadas son las impurezas que se mezclaron con el metal. Estas impurezas son fragmentos de arena que se desprendieron del molde que se desprendieron al momento de colado y que se pueden apreciar a simple vista en el punto de fractura de la pieza, estas piezas registraron lecturas muy irregulares y más bajas que las demás, principalmente en los ensayos de tensión, como la pieza 03.

De lo anterior podemos sacar varias conclusiones:

1. El molde empleado para la obtención de las piezas de fundición similar al empleado por Cooksey et al con la variante de un pasaje intermedio entre el orificio de colado y el corredor de alimentación de los pasajes fue adecuado porque impidió un posible llenado completo de los pasajes, lo que permitió medir correctamente el índice de fluidez mismo que no se había logrado en otros

trabajos experimentales por el llenado completo de los pasajes. Sin embargo, el orificio de colado resultó ser grande lo que propició la aspiración de aire y, por consiguiente, la formación de porosidad en las piezas obtenidas lo que afectó sus propiedades mecánicas.

2. El mayor índice de fluidez registrado en las piezas de fundición obtenidas fue en aquellas que se colaron con una presión mayor a la atmosférica, principalmente en aquellas cercanas a una temperatura de 750° C. También en las que se colaron a presión atmosférica el mayor índice de fluidez se registró en las piezas que se colaron a una temperatura cercana a 750° C.

3. Los valores más altos obtenidos en los ensayos de tensión se obtuvieron en aquellas piezas que se colaron a temperaturas cercanas a los 750° C. Los valores más altos obtenidos en las pruebas de dureza se obtuvieron en las piezas que se colaron a una temperatura de 750° C o mayor en el caso de las piezas obtenidas a presión atmosférica y el más alto a 800° C en las piezas obtenidas a una presión mayor a la atmosférica.

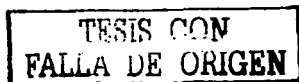
4. Hubo deficiencia en el moldeo de la arena que se usó para hacer los moldes de fundición, ya que algunas de las piezas de fundición mostraron fragmentos de esta en el punto de fractura en los ensayos de tensión, lo que afectó sensiblemente las lecturas obtenidas impidiendo una mejor comprensión del fenómeno en cuestión.

5. Finalmente podemos decir que las mejores condiciones para la obtención de piezas de fundición con un alto grado de calidad en el llenado de moldes y en las propiedades mecánicas se obtienen a temperaturas que se encuentran en un rango de 750 a 800° C, mismas que se pudieran emplear en algún proceso de producción de piezas de fundición.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

BIBLIOGRAFIA

1. West, T. D., Metallurgy of Cast Iron, Cleveland Printing Co., Cleveland, Ohio (1902).
2. Curry, C., Fonderie Moderne, 18, 71 (1924).
3. Moldenke, Principles of Iron Founding, McGraw-Hill, New York (1917).
4. Ruff, W., Iron and Steel Institute Carnegie Scholarship Memoirs, 25, 1-39 (1936).
5. Evans, Journal of Research and Development, British Cast Iron Research Association, Research Report 319, October, 1951.
6. Saito and Hayashi, Proc. College of Eng., Kyoto Imp. Univ., 11, 83 (1919); IV, 165 (1924).
7. L. W. Eastwood and L. W. Kempf. "The Measurement of Fluidity of Aluminium Casting Alloys", TRANSACTIONS, American Foundrymen's Association, vol. 47 pp. 571-582 (1939).
8. Greene, R. H., Iron and Steel Institute, Special Report no. 15 (1936).
9. Andrews, Percival and Bottomley, Iron and Steel Institute, Special Report no. 15 (1936).
10. C. H. Desch, Proc. Inst. Brit. Found. 1947.
11. C. W. Briggs, Metals Handbook, 1948.
12. Sin referencia bibliográfica.
13. A. M. Portevin, P. G. Bastien, proc. Inst. Brit. Found. 1954.
14. Trabajo no publicado.
15. V. Kondic, H. J. Kozlowski, Journ. Inst. Metals, 1949.
16. C. M. Saeger, Jr., and A. I. Krynitsky, "A parcial Method for Studying the Running Quality of a Metal Cast in Foundry Molds." TRANSACTIONS, American Foundrymen's Association, vol. 39 pp. 513-540 (1931).
17. L. P. Porter and P. C. Rosenthal, "Factors Affecting Fluidity of Cast Iron", TRANSACTIONS, American Foundrymen's Society vol. 60 pp. 725-735 (1952).



18. J. F. Worthington, "Fluidity of Steel". Proceedings of the Institute of British Foundrymen, vol. 43, pp. A 144-A 151 (1950).
19. C. J. Cooksey et al. "The Casting Fluidity of some Foundry Alloys", The British Foundryman., Septiembre 1959, p. 381-386.
20. K. L. Clark, "Fluidity Testing of Foundry Alloys". TRANSACTIONS. American Foundrymen's Association. Vol. 54, pp 37-48 (1946).
21. Vandert Voort, "Metallography, Principles and Practice", Materials Science and Engineering Series.
22. Frank M. White, "Mecánica de Fluidos", edit. McGraw-Hill, 1993.
23. Sydney H. Avner, "Introducción a la Metalurgia Física", edit. McGraw-Hill, segunda edición, 1988.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN