

9
2ej.



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE QUIMICA

FLUIDEZ DE ALUMINIO Y ALEACIONES METODO DE LA ESPIRAL

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO METALURGICO

PRESENTA:

JUAREZ DIAZ ELISEO URIEL

MEXICO, D. F.

1992.

FALLA DE ORIGEN



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 está 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.

INDICE

I. Introducción	1
I.1 Resumen	2
II. Generalidades	3
Ensayos de Fluidéz	5
II.1 Canales en Forma de U	6
II.2 Ensayos por succión al vacío	7
II.3 Ensayo en Canales Rectos	8
II.3 Ensayos en Espiral	9
III Análisis de las Variables que Afectan la Fluidéz	12
III.1 Factores Relativos al Molde	12
III.2 Factores Relativos al Metal	12
III.3 Cabeza Metalostática y Velocidad de Vaciado	13
III.4 Tamaño y Forma del Molde	14
III.5 Características de la Mezcla de Moldeo	15
III.6 Temperatura del Molde	17
III.7 Factores Relativos al Metal	18
III.8 Viscosidad del Metal Líquido	18
III.9 Tensión Superficial	20
III.10 Formación de Películas Superficiales de Óxido	23
III.11 Formación de Inclusiones no Metálicas	24
III.12 Grado de Sobrecalentamiento	25
III.13 Mecanismo de Solidificación	26
III.14 Solidificación de Metales Puros	28
III.15 Solidificación de Aleaciones Eutécticas	28
III.16 Solidificación de Aleaciones	28
III.17 Soluciones Analíticas para la Fluidéz	30

IV. Antecedentes	32
V. Procedimiento Experimental	39
V.1 Diseño del Experimento	39
V.2 Equipo Utilizado	40
V.3 Materiales	40
V.4 Métodos	41
VI Resultados Experimentales	45
VII Discusión de Resultados	52
VIII Conclusiones	54
IX Bibliografía	55
X Apendice	57

INTRODUCCION.

Uno de los pasos críticos al que debe enfrentarse el fundidor es el llenado del molde con metal líquido; el éxito de esta operación depende en gran medida de la fluidez.

El objetivo del presente trabajo es encontrar expresiones analíticas que describan el comportamiento de la fluidez de aleaciones aluminio-silicio en función de la composición química y el sobrecalentamiento (temperatura de colada) para que posteriormente sean aplicadas al diseño de sistemas de colada.

RESUMEN

El método escogido para determinar la fluidez, fué el de la espiral, moldeando una mezcla de arena en verde. Se manejaron tres tipos de aleaciones: aluminio comercialmente puro, aluminio-5 silicio y aluminio-12.8 silicio (eutéctico) y tres temperaturas de colada (grados de sobrecalentamiento) excepto para la aleación Al-5Si en la que se utilizaron cinco temperaturas de colada.

Los resultados obtenidos demuestran que existe relación directa entre el sobrecalentamiento y la fluidez; se concluye que la fluidez disminuye cuando el rango de solidificación de las aleaciones es largo.

Se dedujeron ecuaciones que predicen la fluidez en función del sobrecalentamiento para aluminio puro, aluminio-5 silicio y aluminio-12.8 silicio, así como una ecuación general que predice el comportamiento de la fluidez en función del sobrecalentamiento y la composición para el sistema binario Al-Si, la cual se comparó con el esquema de comportamiento general reportado por Flinn.

II. GENERALIDADES

CONCEPTO DE FLUIDEZ.

Ha sido generalmente observado en la práctica de fundición que en el llenado de los moldes de diseño complicado, particularmente aquellos en los cuales incluyen varias secciones, que algunas aleaciones llenan la cavidad del molde y reproducen los detalles de fundición mejor que otras. Esta propiedad particular de una aleación, ha sido definida por los fundidores como fluidez de fundición, o simplemente fluidez. Podemos decir que la fluidez es una propiedad empírica compleja. Datos experimentales indican que la fluidez, puede ser influenciada por ciertas propiedades físicas y químicas de los aleantes, por las características de los moldes y por los métodos usados en el llenado de los moldes. Es por lo tanto necesario diseñar o establecer una prueba que satisfaga la definición empírica de la fluidez y que relacione tales mediciones arbitrarias de la fluidez a las propiedades físicas y fisicoquímicas del metal y del molde a las fuerzas que actúan sobre el metal durante el llenado del molde.

La figura (1) muestra la situación típica de una fundición donde un metal líquido es vertido y llena el molde bajo una fuerza de gravedad, comenzando con una energía potencial en la posición H. Al entrar dentro del molde, el metal líquido ha obtenido una cierta cantidad de energía cinética, $\frac{mv^2}{2}$ la cual es usada para conducir el metal a lo largo de la cavidad del molde y llenando así el molde. En el mismo tiempo, el metal líquido está siendo enfriado por las pérdidas de calor causadas por las paredes del molde $\frac{\delta Q}{\delta t}$, hasta que en el curso del llenado, el metal puede alcanzar la temperatura de solidificación desde la posición de entrada del metal dentro del molde hasta los puntos más lejanos. Podría teóricamente ser posible el tratar la fluidez como un problema en términos de una ecuación general

de energía, tomando en cuenta el flujo de energía en el sistema y las pérdidas de energía calorífica durante el flujo. Las constantes de la ecuación, podrían ser relacionadas a las propiedades térmicas de las aleaciones líquidas y a las propiedades físicas, tales como viscosidad y tensión superficial, para explicar en orden el comportamiento específico de la fluidez de las diferentes aleaciones.

Una evaluación cuantitativa de la fluidez no ha sido probada completamente en la práctica, principalmente por falta de datos sobre las propiedades físicas y térmicas requeridas.

Otra dificultad fundamental a un acercamiento a la prueba de fluidez, es la falta de acuerdo que existe entre los metalurgistas en definir una prueba estandar de fluidez en una pieza la cual podría ser usada para la evaluación experimental de la ecuación general del índice de fluidez.

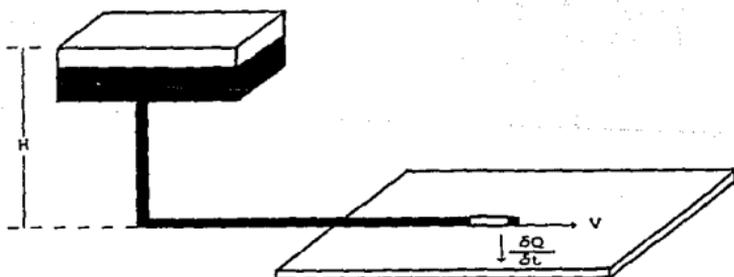


Fig. 1 Llenado de molde

ENSAYOS DE FLUIDEZ

En la actualidad, la fluidez es medida usando una gran variedad de diseños de piezas para efectuar la prueba, con el objeto de obtener una medida comparativa de la sensibilidad de la fluidez en un tipo particular de pieza, variando el metal, el molde y el llenado de éste.

Los métodos mas importantes son :PRUEBAS EN CANALES EN FORMA DE U, PRUEBAS POR SUCCION POR VACIO, PRUEBAS EN CANALES RECTOS Y PLANOS Y PRUEBAS EN ESPIRAL.

CANALES EN FORMA DE U.

Este método es recomendado por The Institute of British Foundrymen y se lleva a cabo en un molde permanente que alimenta tres ramas de 2, 4, y 6 mm de ancho respectivamente (fig. 2). (ref. 0)

El metal es vaciado dentro del molde hasta que se llena el alimentador. la fluidez es medida entonces como la longitud de las ramas. Este diseño incorpora caídas de presión bajas y canales estrechos. junto con altas velocidades de solidificación.

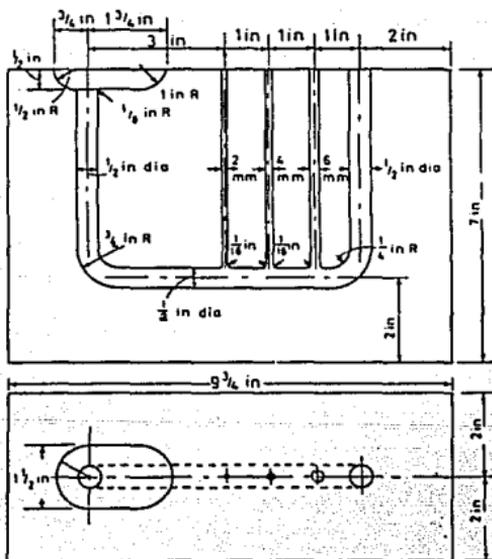


Fig. 2 Prueba de fluidez con canales tipo U. (ref. 0)

ENSAYOS POR SUCCION AL VACIO

En esta prueba ideada por Ragone, Adams y Taylor investigadores del MIT^M. (Ref 1) el metal fluye a través de un tubo de vidrio liso por medio de una succión de vacío (fig.3). la fluidez se mide como la longitud del metal recorrida cuando este solidifica. Este método tiene una excelente reproducibilidad ya que todas sus variables se pueden controlar facilmente pero su desventaja es que no reúne las condiciones reales de operación en la industria.

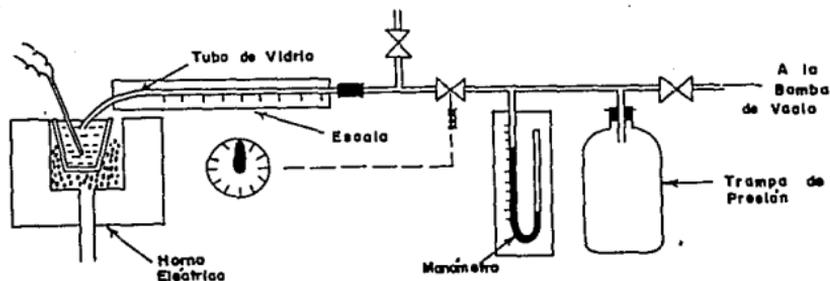


Fig. 3 Ensayo de succión por vacío (ref. 1)

MIT^M = Massachusetts Institute of Technology.

ENSAYO EN CANALES RECTOS.

En esta prueba diseñada por Cooksey, Kondic y Wilcook (ref.2) para fundiciones en arena utilizaron el proceso CO₂ que consiste en un corredor que alimenta cuatro ramas rectas de diferente espesor. la longitud total de las ramas es sumada y dividida entre cuatro para obtener el valor promedio del indice de fluidez.

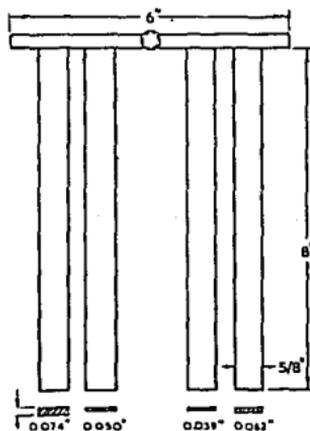
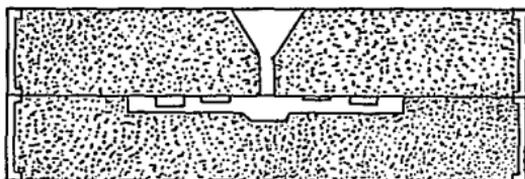


Fig. 4 ensayo en canales rectos. (ref. 2)

ENSAYO EN ESPIRAL

Este método consiste en vaciar el metal en un molde, teniendo un canal en espiral de pequeña área de sección transversal, la espiral es lo bastante larga como para extraer suficiente calor para que cause la solidificación del metal antes de alcanzar el final del canal. La longitud del metal obtenida es una medida de la fluidez.

Las primeras investigaciones realizadas sobre este método fueron efectuadas por Seager y Krinitzky (ref. 3) en el cual el metal era vertido en el molde por medio de una taza de vaciado y alimentando por una bajada en forma de cuerno. En este modelo que es muy sensible a las variaciones se introducían altas velocidades de vaciado y altas caídas de presión; motivo por el cual la oficina de estándares de USA lo rechazó por no cumplir con una buena reproducibilidad ya que en pruebas efectuadas se encontró desviación estandar del 9.4%

Numerosas variaciones han sido efectuadas al modelo con el fin de mejorar su reproducibilidad. Principalmente relacionadas al problema de obtener condiciones estandares de flujo, se han diseñado varios tipos de tinajas de vaciado para regular la altura de la caída de presión y para obtener una rapidez constante de vaciado para asegurar una velocidad uniforme.

Berger y Perin en 1934 propusieron un diferente sistema de colada, pretendiendo una desviación del 1%. En conformidad con Seager y Krinitzky, su modelo fué modificado en el sistema de colada (fig. 6). Los cambios consistieron en sustituir el cuerno de entrada por un orificio y pozo o colchón y manteniendo un nivel constante de la cabeza metalostática y además el uso directo del derramamiento de la tina de colada.

En teoría, el primer metal en el interior empieza a llenar.

esto da tiempo a llenar la colada y el conducto de bajada a la altura del derrame, antes de que el metal entre en la espiral; así que el buen llenado, al inicio del flujo del metal en la espiral y la velocidad del flujo son controlados por la cabeza constante y el área del estrangulamiento o choke de la bajada.

Ensayos efectuados usando el modelo de fluidez modificado prueban que este método es mucho más consistente ya que se obtuvo una desviación estándar del 2 %.



Fig. 3 Modelo de Seeger y Krinitsky. (ref. 2)

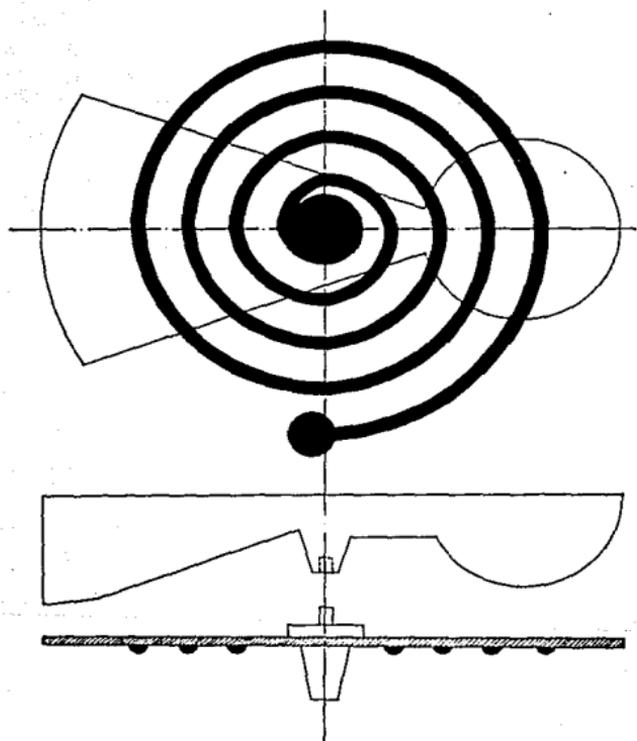


Fig. 6 Modelo de Berger y Perrin. (ref. 4)

VARIABLES QUE AFECTAN LA FLUIDEZ

Para analizar el comportamiento del metal en las pruebas de fluidez se han encontrado dos factores críticos que restringen el flujo metálico como son las propiedades térmicas y el mecanismo de solidificación. Para analizarlos se han clasificado en dos partes: factores relativos al molde y factores relativos al metal.

FACTORES RELATIVOS AL MOLDE.

- 1) Cabeza metalostática y velocidad de vaciado.
- 2) Tamaño y forma del molde.
- 3) Características de la mezcla de moldeo.
- 4) Temperatura del molde.

FACTORES RELATIVOS AL METAL.

- 1) La viscosidad del metal fundido.
- 2) Tensión superficial del metal líquido.
- 3) Formación de películas superficiales de óxido.
- 4) Formación de inclusiones no metálicas en el metal líquido.
- 5) Grado de sobrecalentamiento.
- 6) Mecanismo de solidificación.

CABEZA METALOSTÁTICA Y VELOCIDAD DE VACIADO.

Desarrollos experimentales (5,6,7) indican que la fluidez es ampliamente modificada con la variación de la cabeza metalostática y por tanto con la velocidad de vaciado; a mayor velocidad inicial mayor fluidez; estos valores se incrementan casi en un 100 % (fig.7)

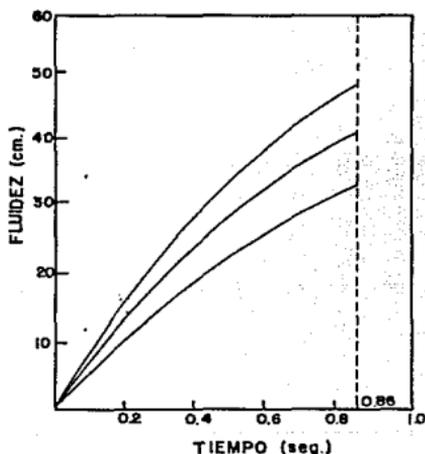


Fig. 7 Efecto de la velocidad inicial de metal o cabeza metalostática con la fluidez para Al. puro. (ref 5)

Sin embargo, en la práctica de la fundición deben considerarse los criterios para diseñar sistemas de colada para evitar problemas de atrapamiento de gases, arrastre de escoria, erosión de arena, etc.

TAMANO Y FORMA DEL MOLDE.

Este factor esta dado por el diseño del modelo de fluidez. el modelo seleccionado tendrá características específicas con cierto grado de sensibilidad prefijada enfocado a alguna variable específica de interes para una aplicación particular. El ensayo para determinar el índice de fluidez no ha sido universalmente estandarizado y cambia para los diversos tipos de ensayo (forma, longitud, espesor, área, etc.).

Bajo estas condiciones de control particulares durante la prueba, la característica de tamaño y forma del molde puede ser enfocado a determinar la fluidez en piezas de una geometría dada, esta geometría es un factor que depende exclusivamente de las características del diseño de la pieza y no pueden alterarse. Según Flemings (ref.8) la fluidez esta limitada por el espesor de la pieza, para piezas coladas en arena este límite es alrededor de $\frac{1}{8}$ de pulg. para aleaciones no ferrosas y de $\frac{1}{4}$ de pulg. para aceros y fundiciones.

CARACTERISTICAS DE LA MEZCLA DE MOLDEO.

Esta variable tiene un efecto muy marcado en la fluidez, características tales como las propiedades térmicas, superficie del molde (tamaño de grano AFS y cantidad de aglutinante) y humedad, alteran la rapidez de extracción de calor. Las diversas composiciones de las mezclas de arena de moldeo como son los cambios en la humedad, el contenido de aglutinante y el tamaño de grano, determinan las propiedades mecánicas de la mezcla (permeabilidad, resistencias al corte, a la tracción y a la compresión) las cuales modifican la fluidez. Algunos autores (ref.1) han determinado que una variación normal en humedad ($\pm 2\%$) de la mezcla no afecta significativamente la fluidez, en cambio la tersura del molde es una medida de la fluidez ya que la aumenta o la disminuye, esto se explica en base a que las fuerzas de fricción restringen el flujo en canales debido a la rugosidad de la superficie del molde la cual se relaciona con el tamaño de grano del material de moldeo. (ref.6).

Morales, M.E.Glicksman y H.Biloni (ref.8) investigaron la influencia de la microgeometría de las paredes en moldes de cobre desbastados con lija 800 y desbastados con lija 800 y maquinados, encontrando que la fluidez en esta última superficie fue 38 % mayor que la otra.

Por otra parte M.C. Flemings (5) encontró que en moldes de arena recubiertos con hexacloroetano y carbón marino se reduce drásticamente el coeficiente de transferencia de calor y esto induce un incremento en la fluidez. (fig.8).

Otro factor importante es la atmósfera del molde; si la atmósfera es oxidante se favorece la formación de películas de óxido que restringen seriamente el flujo del metal, mientras que atmósferas

reductoras promueven el llenado del molde.

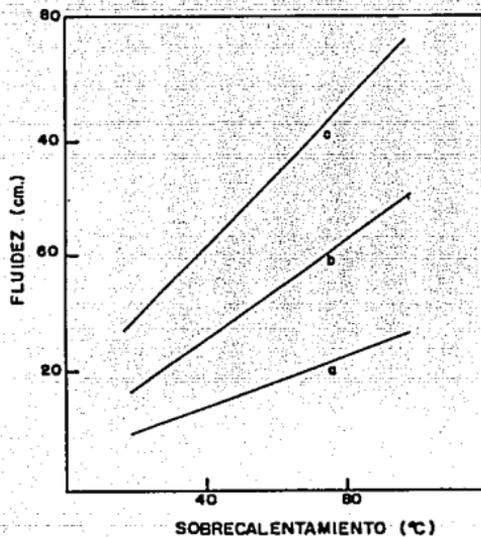


Fig. 8 Efecto de recubrimientos en la fluidez para Al-4.5% Cu.
(ref. 5, 6) a) sin recubrimiento, b) carbón marino,
c) hexacloroetano.

TEMPERATURA DEL MOLDE.

La temperatura del molde influye en la fluidez ya que la velocidad a la cual el calor es disipado del metal líquido determina el tiempo de vida para el flujo antes que el metal solidifique. Variaciones normales en la temperatura de operación ($\pm 10^{\circ}\text{C}$) no afectan significativamente la fluidez usando el mismo material de moldeo, pero influye considerablemente si se usan moldes metálicos, de zircón, arena en verde, yeso, etc.

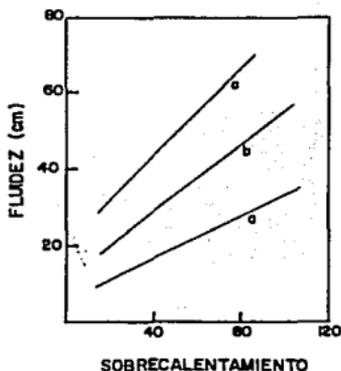


Fig.9 Efecto de la temperatura del molde con la fluidez para Al-4.5Cu. a)27 °C. b)232 °C. c)326 °C. (ref. 5)

Kondic y Kolkowsky usando un modelo de espiral hecho de hierro encontraron los siguientes resultados para aluminio comercialmente puro colado a 760°C .

Temp. del molde ($^{\circ}\text{C}$)	100	200	300	400	500	600
Long. de la espiral (in)	19	20	21	22	27	36

II. FACTORES RELATIVOS AL METAL.

VISCOSIDAD DEL METAL LIQUIDO.

La medida con la cual un líquido fluye a través de un canal es una medida de la viscosidad. La mayor viscosidad se obtiene a los mas bajos flujos; la viscosidad de un metal líquido disminuye cuando se incrementa la temperatura (ref.21), también es sabido que la viscosidad de un metal líquido es afectada por la adición de elementos aleantes, pero la naturaleza de estos cambios no esta aún bien estudiada.

En la tabla (2) se dan valores de viscosidad para algunos metales usados en fundición a una temperatura aproximada de 50 °C arriba de su punto de fusión. Cuando se mide la viscosidad a grados de sobrecalentamiento constantes los metales puros y las aleaciones eutécticas poseen la mas baja viscosidad y una aleación con rango largo de solidificación tiene la mas alta viscosidad.

M.C. Flemings (ref.5) considera la influencia de la viscosidad con la fluidez para aluminio puro vaciado sin sobrecalentamiento usando el método de succión por vacío, encontrando que grandes cambios en la viscosidad del metal tienen solo un pequeño efecto en la fluidez.

METAL	TEMPERATURA (°C)	VISCOSIDAD (Cp)
Pb	400	2.31
Al	700	2.89
Sb	700	1.20
Bi	300	1.54
Cd	400	2.16
Cu	1100	3.3
Zn	450	3.17
Sn	300	1.87

Tabla (2) Viscosidades para algunos metales
usados en función (ref. 10)

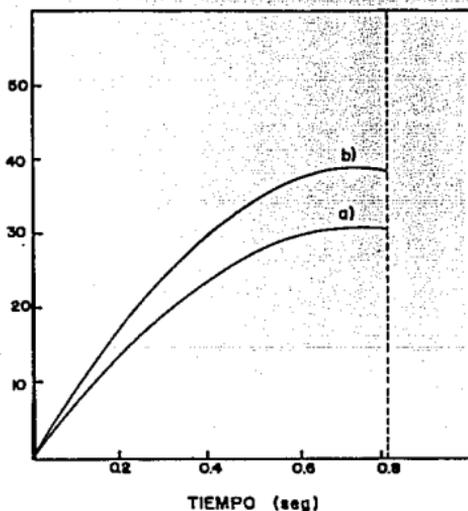


Fig. 10 Influencia de la viscosidad en la fluidez
para Al puro sin sobrecalentamiento (ref. 3)
a) Viscosidad normal b) Viscosidad 1/10 normal

TENSION SUPERFICIAL

Al igual que cualquier líquido, los metales líquidos poseen también la propiedad de tensión superficial. Los átomos del metal ejercen entre sí fuerzas de atracción; en la superficie del líquido estas fuerzas no están totalmente balanceadas lo cual produce un estado de tensión. La tensión superficial se caracteriza por fuerzas que actúan perpendicularmente sobre una unidad de longitud en la superficie.

La manifestación común de la tensión superficial en líquidos incluye la formación de una elevación o depresión en la superficie cuando estos están en tubos delgados, la formación de gotas (redondas) de líquido cuando este se coloca en superficies planas y el cambio de presión entre los dos lados de burbujas formadas en el líquido.

Todos estos fenómenos pueden demostrarse en metales líquidos, la tensión superficial en metales es alta y tiene variaciones pequeñas por efecto de la temperatura, por ejemplo, la tensión superficial del aluminio 99.5 % de pureza a la temperatura de fusión es de 914 dinas/cm, a 700 °C es de 900 dinas/cm y a 800 °C es de 885 dinas /cm, mientras que las películas de óxido aumentan la tensión superficial a casi el doble. (ref.1)

La tensión superficial del metal puede afectar el flujo del líquido a través del molde y por tanto a la fidelidad de reproducción y al acabado superficial de la pieza y estos efectos son comúnmente debidos a la alta tensión superficial aparente causada por la presencia de películas en la superficie del metal.

Sin embargo, en la práctica de la fundición grandes cambios en la tensión superficial tienen solo un efecto pequeño en la velocidad inicial del metal y no afectan grandemente la fluidez como

se observa en la fig. 11 (ref. 3,5,6).

Solo en los casos en los que la cabeza metalostática es pequeña y el canal de flujo es muy estrecho la tensión superficial puede ejercer efectos predominantes en la fluidez, como se observa en la fig. 12 ; la fluidez para Al-4.5Cu es cero cuando la cabeza metalostática es de 6.6 cm y el canal tiene un diámetro de 0.18 cm (ref. 5').

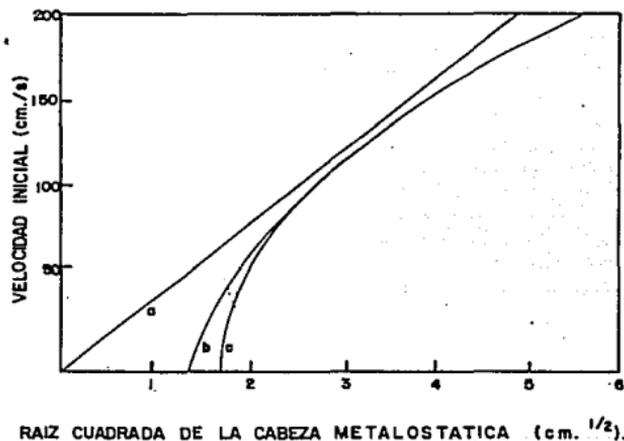


Fig. 11 Efecto de la tensión superficial en la velocidad inicial del metal en la fluidez.

- a) Sin efecto en la tensión superficial.
- b) 520 dinas/cm.
- c) 840 dinas/cm.

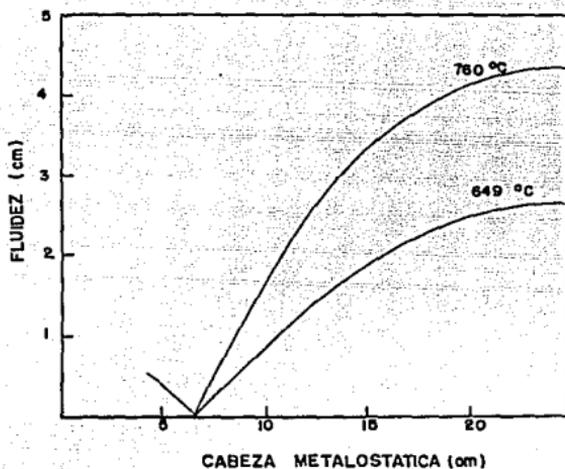


Fig. 12 Fluidez contra cabeza metalostática para un canal de 0.18 cm para Al-4.5Cu a dos temp. diferentes (ref.5)

En otras palabras, para condiciones reales de operación, tanto en fundiciones ferrosas como en las no ferrosas la tensión superficial no afecta significativamente la fluidez.

FORMACION DE PELICULAS SUPERFICIALES DE OXIDO

Algunas aleaciones bajo ciertas condiciones de atmósfera, composición y temperatura pueden formar películas sólidas quebradizas en la superficie. En el transcurso del llenado del molde la presencia de estas películas en la superficie metálica impide notablemente el flujo debido principalmente a la elevación de la tensión superficial y/o a que estas películas oxidadas actúan como centros de nucleación heterogénea; los cuales reducen la fluidez. (ref.4).

FORMACION DE INCLUSIONES NO METALICAS.

La presencia de inclusiones no metálicas en el metal líquido conduce a resultados erróneos en la medición del índice de fluidez ya que durante el enfriamiento y solidificación de metales líquidos, pueden precipitar algunas partículas no metálicas que obstruyen el flujo. su influencia puede ser grande o pequeña, dependiendo del momento en que se forman y la cantidad precipitada.

La precipitación de partículas formadas después de que el metal ha iniciado la solidificación no altera sensiblemente la fluidez, ya que los cristales del sólido formado pueden tener una virtual y rápida detención del flujo. (ref. 4); las partículas formadas justamente al inicio de la solidificación pueden fluir con el metal sin restringir el flujo, pero una cantidad grande de inclusiones no metálicas formada antes de alcanzar la temperatura de líquidus reducen notablemente el flujo.

GRADO DE SOBRECALENTAMIENTO.

Una de las variables que más afectan la fluidez es la temperatura de colada; invariablemente, al aumentar la temperatura de colada aumenta la fluidez casi linealmente, no importando el metal o aleación de que se trate.

Esto es fácilmente explicable ya que a mayor temperatura mayor debe ser el calor específico que se tiene que disipar para que empiece la solidificación, incrementándose por consiguiente el tiempo de vida líquida del metal y la fluidez. (fig. 13)

Debido a que este factor es de fácil control para el fundidor, se utiliza para asegurar el llenado adecuado de piezas con secciones delgadas y/o complicadas.

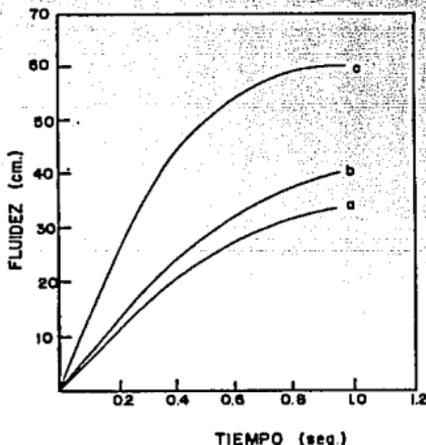


Fig. 13 Efecto del sobrecalentamiento (ΔT) en la fluidez de aluminio puro. (ref. 5) a) $\Delta T=0$ °C; b) $\Delta T=50$ °C; c) $\Delta T=120$ °C

MECANISMO DE SOLIDIFICACION.

Portevin y Bastien (ref.10) en 1932 presentaron una teoría indicando la importancia del mecanismo de solidificación. Ellos, investigaron un gran número de sistemas binarios y terciarios de bajo punto de fusión y llegaron a la conclusión que el factor que mas influye el cambio en la fluidez es el mecanismo de solidificación.

El mecanismo de solidificación esta definido por la combinación de dos variables:

- a) El proceso de solidificación (rango de solidificación)
- b) La cristalización (naturaleza de los cristales y velocidad de cristalización.)

Mas especificamente, la fluidez varia con el rango de solidificación; cuando el rango de solidificación es máximo (o largo), la fluidez es mínima y visceversa, consecuentemente la máxima fluidez se obtiene en metales puros y aleaciones de composición eutéctica y la fluidez es mínima en el punto del diagrama en que el intervalo de solidificación, o sea la diferencia entre la temperatura de líquidus y la temperatura de sólidus es máxima ; esto es cierto siempre que se usen grados de sobrecalentamientos constantes. Las generalizaciones concernientes al efecto de la composición con la fluidez son ilustradas en la fig. 14 en la cual las variaciones en la fluidez son mostradas para el diagrama de fases binario Al-Si.

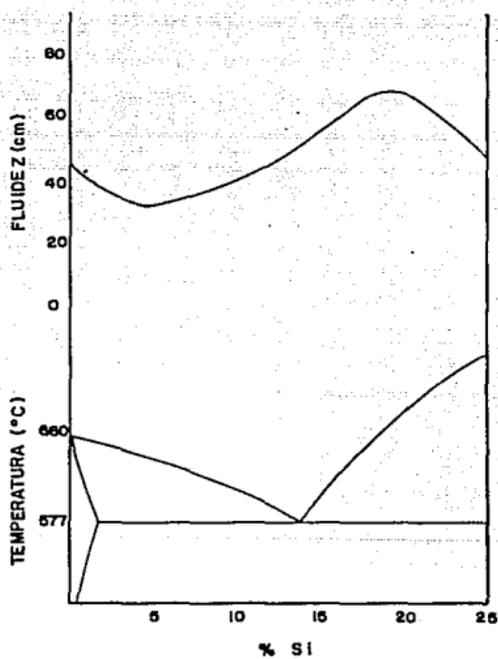


Fig. 14 Dependencia de la fluidex con la composición para el sistema Al-Si obtenido por el método de succión por vacío reportado por Flinn (ref. 20)

SOLIDIFICACION DE METALES PUROS.

En el instante en el que el metal entra al molde, empieza inmediatamente la solidificación en la punta de la corriente y en las paredes de este, creciendo gradual y progresivamente hacia el centro en forma de capas sólidas con frente liso, las cuales no ofrecen resistencia al flujo que continúa hasta que finalmente es interrumpido cuando se juntan los dos frentes de solidificación. (fig.15 a)

SOLIDIFICACION DE ALEACIONES EUTECTICAS.

En el caso de aleaciones de composición eutéctica las cuales tienen rango corto de solidificación, se comportan como metales puros, o sea, la solidificación empieza como una costra de sólido formado en las paredes del molde y progresando lentamente hacia el centro y cerrándose conforme la solidificación progresa. (fig.15 a)

SOLIDIFICACION DE ALEACIONES.

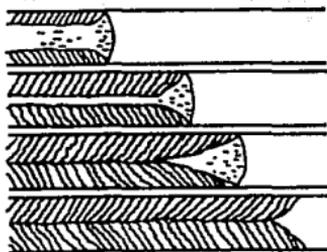
La adición de elementos aleantes a un metal puro, generalmente disminuyen la fluidez; (ref.11.5.8.12) es decir la aleación tiende a comportarse como una aleación de rango largo de solidificación.

En aleaciones de este tipo en las cuales el sobrecalentamiento constitucional y otros fenómenos producen formas diferentes en la intercara planar, como son la celular, dendrítica, incluso nucleación independiente en la masa del líquido, la fluidez es reducida por efecto de superficies irregulares (puntos de avance de la intercara) de la costra sólida formada, y/o es limitada por un

estrangamiento de flujo en la punta de la corriente debido a la acumulación de cristales sólidos. (fig. 15b)

METAL PURO Y ALEACIONES EUTECTICAS

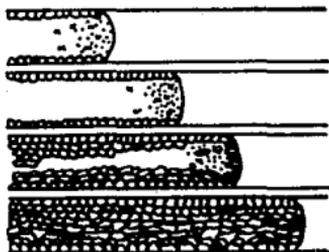
- a) El líquido penetra al canal y se forman granos columnares con una intercara sólido-líquido lisa.
- b) Los granos columnares continúan creciendo en la dirección de flujo y hacia el centro del molde.
- c) Cheque de los dos frentes de solidificación.
- d) El líquido residual solidifica en el frente del flujo originando un rechupe en la punta.



(a)

ALEACIONES DE RANGO LARGO

- a) El líquido fluye por el canal, la solidificación se inicia con granos columnares y nucleación de embriones finos.
- b) Los embriones finos crecen rápidamente hasta convertirse en granos.
- c) El flujo cesa cuando se alcanza la concentración crítica de granos finos en la punta de avance de la intercara.
- d) El líquido residual solidifica como granos equiaxiales y se forman microrechupes distribuidos en la estructura



(b)

Fig. 15 Solidificación de: a) Metal puro y Aleaciones Eutécticas, b) Aleaciones de rango largo. (ref. 11)

SOLUCIONES ANALITICAS PARA LA FLUIDEZ

En base a todos estos parámetros Flemings y colaboradores (ref. 8) han propuesto un modelo matemático para la resolución de los ensayos de fluidez.

Suponiendo que: 1) Las partículas sólidas se forman durante el flujo en el canal de fluidez y viajan con la corriente del líquido. 2) Cuando se para el flujo, la concentración media del sólido cercana a la punta del flujo alcanza un cierto valor (concentración crítica del sólido) y 3) La velocidad del flujo es constante hasta que se para el flujo.

La ecuación básica por ellos deducida y examinada en detalle en el apéndice expresa la fluidez L_f en términos de las variables del metal y del molde.

$$L_f = \frac{A \rho V (\kappa H_f + C \Delta T)}{S h (T - T_r)} \left(1 + \frac{B}{2} \right)$$

$$B = \frac{h \sqrt{\pi \alpha \Delta X}}{K \sqrt{V}}$$

Donde:

L_f = Longitud de fluidez. cm.

A = Superficie del molde. cm^2

ρ = Densidad del metal. g/cm^3

V = Velocidad del flujo. cm/seg.

k = Conductividad térmica del molde. $\text{cal/cm seg } ^\circ\text{C}$

H_f = Calor de fusión. cal/g

C = Calor específico del metal. $\text{cal/g } ^\circ\text{C}$

T_r = Temperatura ambiental. $^\circ\text{C}$

T = Temperatura del metal líquido. $^\circ\text{C}$

h = Coef. de trans. de calor en la intercara. $\text{cal/cm}^2\text{ } ^\circ\text{C seg}$

α = Difusividad térmica cm^2/seg

ΔX = Distancia de estrangulamiento. cm

K = Concentración crítica. %

S = Perímetro del canal de moldeo. cm

ANTECEDENTES

A pesar de que las aleaciones Al-Si forman un grupo de aleaciones sumamente importante desde el punto de vista industrial, (sobre todo las hipoeutécticas) escasos son los datos reportados en la literatura acerca de sus índices de fluidez; la información aportada es muy dispersa y ofrece un panorama difícilmente comparativo del comportamiento de dichas aleaciones y su dependencia con la temperatura de colada.

FLUIDEZ DE ALUMINIO PURO

La fig.16 muestra la dependencia de la fluidez con el sobrecalentamiento para aluminio puro y algunos otros metales ensayado por Mollard, Flemings y Niyama usando el método de la espiral (ref.13), también la fluidez de aluminio se ve afectada por la presencia de impurezas como se observa en la fig. 17 donde la fluidez de aluminio 99.8 % de pureza es solo el 70 % de la fluidez de aluminio 99.8 % puro. (ref.13)

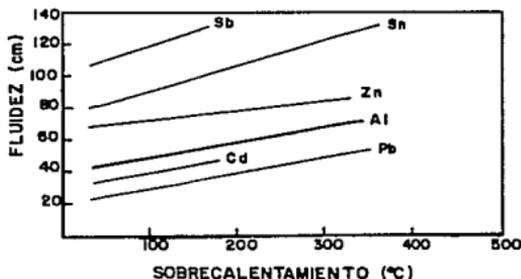


Fig. 16 Dependencia de la fluidez con el sobrecalentamiento por el método de la espiral (ref.13)

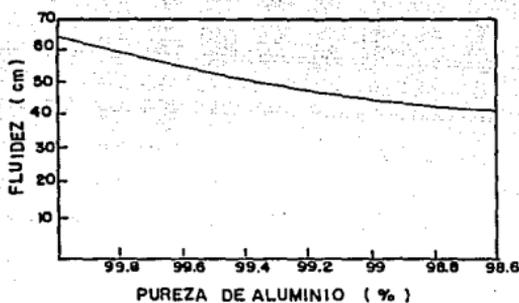


Fig. 17 Influencia de la pureza de aluminio en la fluidez (ensayo de la espiral) (ref. 1)

S. Floreen y D.V. Ragone (ref. 14) reportan datos para la fluidez de aluminio puro realizados por el método de succión por vacío usando tubos de vidrio de 0.2 pulg. de diámetro a diferentes temperaturas:

TEMP. (°C)	FLUIDEZ (cm)
600	29.7
660	30.48
675	37.33
695	42.67
702	44.45
713	51.4
726	55.88

Merton C. Flemings (ref.5) informa antecedentes para aluminio puro usando el método de succión por vacío y velocidad de 100 cm/s colado sin sobrecalentamiento un índice de fluidez de 38 cm.

Sebastian Feliu y Leandro Luis (ref.7) usando canales de 3 x 12mm moldeados en arena en verde 67 A.F.S. con 7 % de humedad encontraron índices de fluidez para aluminio puro.

TEMP.(°C)	FLUIDEZ (cm)
670	24
708	30
732	38
780	50

Amador Del Prado J. y Hernández Santiago F.C.(ref.16) han determinado datos del índice de fluidez de aluminio puro usando un modelo de canales rectos modificados de 2 x 2 mm , moldeando en arena en verde con 6 % de humedad, 15 % de bentonita y arena 90 A.F.S.

Temperatura de colada (°C)	718	738	748
Índice de fluidez (cm)	7.97	9.20	10.80

FLUIDEZ DE ALEACIONES DE ALUMINIO

La adición de elementos aleantes a un metal puro modifica su fluidez de una manera determinante, como es el caso del aluminio en el sistema binario Al-Si.

En la fig.18 se puede observar que la fluidez disminuye conforme va aumentando el contenido de silicio y llega a un mínimo alrededor de un

contenido de 4 % de silicio y esta se mantiene practicamente igual hasta llegar al 5 % de silicio donde empieza a aumentar y continua asi hasta llegar a un máximo que se localiza alrededor del 18 % de silicio, donde nuevamente continua disminuyendo hasta alcanzar los límites prácticos de estas aleaciones.

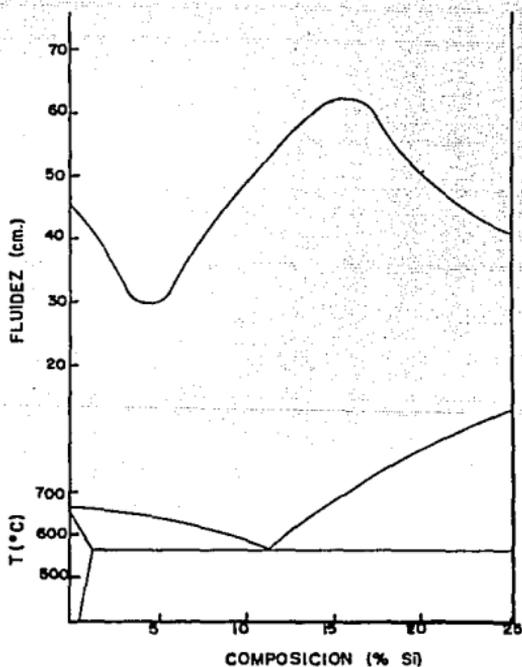


Fig. 18 Fluidez para el diagrama binario Al-Si a 700 °C usando el modelo de la espiral. (ref. 13).

Observando la gráfica se puede apreciar que la máxima fluidez no ocurre en el metal puro o cuando la composición es eutéctica (12.8%) como ocurre con otros metales. Esto se ha explicado en función del silicio primario que induce mayor tiempo de vida del metal líquido y por ende mayor fluidez, sin embargo ésta llega a un máximo alrededor del 18 % silicio, que es donde la velocidad de cristalización empieza a tener efectos predominantes en el flujo metálico y lo restringen conforme sigue aumentando el contenido de silicio.

Sebastian Feliu y Leandro Luis (ref.7), han determinado índices de fluidez para Al-12Si usando canales de 3x12 mm moldeando en arena en verde 67 A.F.S., 7 % de bentonita y 5 % de humedad.

TEMP. (°C)	FLUIDEZ (cm)
605	17
630	23
650	33
705	46
730	52
750	60

Amador Del Prado J. y Hernández Santiago F.C. (ref.16) por medio de ensayos en canales rectos de 2x15 mm determinan índices de fluidez para Al-5Si y para Al-13Si, moldeando en arena en verde 90 A.F.S. con 15 % de bentonita sódica y 6 % de humedad

ALUMINIO-5 SILICIO		ALUMINIO-13 SILICIO	
TEMP. (°C)	I.F.(cm)	TEMP. (°C)	I.F.(cm)
690	7.83	630	12.35

ALUMINIO-5 SILICIO		ALUMINIO-13 SILICIO	
TEMP. (°C)	IF.(cm)	TEMP. (°C)	IF.(cm)
710	8.27	650	15.62
725	8.90	670	17.62

J.L. Jorstad (ref.17) ha determinado la variación de fluidez de aluminio al aumentar la cantidad de silicio para moldes de arena usando el ensayo de la espiral.(fig.19)

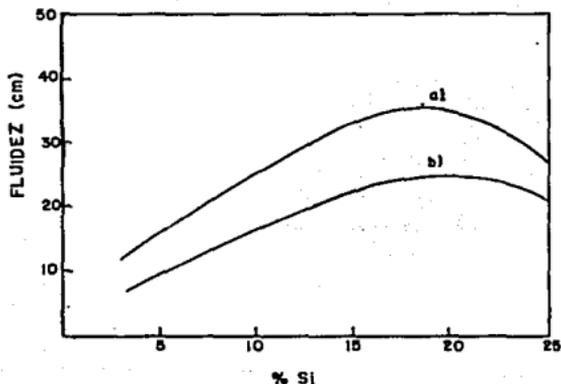


Fig. 19 Curva de fluidez para el sistema Al-Si a dos temperaturas (ref. 17) a)720°C; b)670°C

Se ha determinado experimentalmente que la adición de pequeñas cantidades de otros elementos aleantes al aluminio puro siempre reducen la fluidez notablemente, pero para las aleaciones de aluminio es totalmente distinto; por ejemplo; la adición hasta del 1 % de

cobalto y del 1.5 % de hierro a una aleación altamente sensible a los cambios de temperatura como lo es la aleación 195 (Al-4.5Cu) provoca un aumento en la fluidez. (ref 6).

Esto puede explicarse por alguno (s) de estos enunciados:

- 1) Aumento de sobrecalentamiento.
- 2) Cambio en el intervalo de solidificación.
- 3) Cambio en la naturaleza de los cristales primarios de los cuales esta formada la aleación.
- 4) Cambio en la naturaleza de las películas oxidadas.

En otras palabras; los elementos aleantes pueden aumentar la fluidez siempre que formen un valle líquido en el diagrama de composición de la aleación y cuando el calor de fusión de los cristales primarios sea mayor que en el metal base.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

1) DISEÑO DEL EXPERIMENTO.

En este estudio se analizó el comportamiento de la fluidez de aluminio comercialmente puro, aluminio-5 silicio y aluminio-12.8 silicio en función de la temperatura de colada, usando el modelo estandarizado de la espiral propuesto por la A.F.S. y moldeando en arena en verde.

El diseño del experimento consistió en ensayar las aleaciones con tres grados de sobrecalentamiento excepto para la aleación Al-5Si en la que se ensayaron cinco temperaturas e colada de acuerdo a lo siguiente:

1) Se ensaya aluminio comercialmente puro con los siguientes tres grados de sobrecalentamiento:

- a) $T_f + 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ b) $T_f + 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ c) $T_f + 140\text{ }^{\circ}\text{C}$

siendo la temperatura de fusión (T_f) = 658 $^{\circ}\text{C}$

2) Para la aleación Al-5Si se ensayaron los siguientes cinco grados de sobrecalentamiento:

- a) $T_f+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ b) $T_f+65\text{ }^{\circ}\text{C}$ c) $T_f+90\text{ }^{\circ}\text{C}$ d) $T_f+140\text{ }^{\circ}\text{C}$

e) $T_f+185\text{ }^{\circ}\text{C}$, siendo la temperatura de fusión (T_f) = 620 $^{\circ}\text{C}$

3) para la aleación Al-12.8Si se ensayaron los siguientes tres grados de sobrecalentamiento:

- a) $T_f+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ b) $T_f+90\text{ }^{\circ}\text{C}$ c) $T_f+140\text{ }^{\circ}\text{C}$

siendo la temperatura de fusión (T_f) = 577 $^{\circ}\text{C}$

Estos ensayos se realizaron por triplicado y cuando fue necesario se realizaron pruebas adicionales para minimizar el margen de error.

2) EQUIPO UTILIZADO

Para la realización del experimento se utilizó el siguiente equipo:

- Molino mezclador para laboratorio de 3 Kg. de cap. marca Simpson.
- Horno de crisol calentado con diesel de 240 Kg. de cobre de cap.
- Horno de crisol de SiC calentado con gas de 12 Kg. de cobre de cap.
- Multímetro digital SOAR modelo ME-550.
- Moldeadora semiautomática marca International.
- Molino tipo chileno de 100 Kg. de capacidad.
- Cajas de moldeo de $45 \times 35 \times \frac{10.2}{12.7}$.
- Placa modelo.
- Termopares cromel-alumel tipo K.
- Crisol de carburo de silicio N 12.

3) MATERIALES.

Los materiales utilizados en el desarrollo de este experimento fueron:

- Arena Sílica 80-90 A.F.S. tipo Juanita.
- Bentonita Sódica.
- Bentonita Cálcica.
- Harina de Madera.

Todos estos productos son del proveedor Básicos Siderúrgicos.

El aluminio comercialmente puro fué del proveedor Metales Aguila. S.A. de C.V. de composición química : 0.076Cu, 0.12Mn, 0.002Mg, 0.68Fe, 0.03Pb, 1.68Zn, 0.01Ti, 0.026Si, Al balance.

La composición de la aleación Al-5Si fué la siguiente:

0.076Cu, 0.012Mn, 0.002Mg, 0.68Fe, 0.03Pb, 1.68Zn, 0.01Ti, 4.98Si, Al balance.

Y la composición química de la aleación Al-12.8Si fue:

0.076Cu, 0.12Mn, 0.002Mg, 0.068Fe, 0.03Pb, 1.68Zn, 0.01Ti, 12.77Si, Al balance.

Se utilizó un producto comercial llamado desgasar 200 como desgasificador que son pastillas a base de hexacloroetano del proveedor FOSECO.S.A. de C.V.

4) PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

PREPARACION DE LA ARENA DE CAREO

Experimentos realizados en los Laboratorios de Arenas del Departamento de Metalurgia de la Facultad de Química, indican que la composición adecuada de una arena de careo utilizada en el vaciado de aleaciones ligeras es la siguiente:

Bentonita Sódica	5 %
Bentonita Cálcica	5 %
Húmedad	5 %
Harina de Madera	5 %
Arena Sílica 80-90	84 %

Esta mezcla fué la utilizada para la elaboración de los moldes; para esto se carga el molino mezclador de 3 Kg. de capacidad con la arena, se agrega la mitad de agua y se mezcla durante dos minutos, a continuación se agregan las bentonitas y la harina de madera y se agrega el restante de agua, se homogeniza durante otros tres minutos de mezclado, se extrae la arena y se tamiza.

ARENA DE RELLENO

Se utilizó arena reciclada para rellenar el molde en las partes que no existe contacto con el metal fundido y puede ser quemada y de bajas resistencias y propiedades. El mezclado se llevó a cabo en un molino tipo chileno de 100 Kg. de capacidad, adicionando agua poco a poco hasta tener la consistencia deseada, se descarga el molino y se procede al moldeo.

MOLDEO

Las cajas de moldeo utilizadas son las convencionales de cope y drag de $45 \times 35 \times \frac{10.2}{12.7}$ cm. para moldeo horizontal. El apisonado de arena se llevó a cabo en una moldeadora semiautomática.

La placa modelo se coloca entre el cope y drag, se rocía un poco de talco para formar una fina capa en el modelo, retirando el exceso, se tamiza la arena de careo sobre el modelo y se aprisiona suavemente, se agrega la arena de relleno y se moldea el drag en la moldeadora semiautomática, se da vuelta a la caja y se coloca el modelo de la copa de colada y se repite la misma operación ahora con el cope, se quita el exceso de arena y se procede a sacar el modelo de la copa de colada, se retira la arena sobrante y se levanta cuidadosamente el cope para sacar ahora la placa modelo colocando nuevamente el cope en su lugar.

CONTROL DE LA CABEZA METALOSTATICA

Con el objeto de tener condiciones experimentales constantes de flujo se fabricó un modelo patrón de la copa de colada, que es una ligera modificación del modelo original aceptado por la A.F.S. y que se muestra en la figura 6 con este sistema se controla el gasto y la altura de colada.

MODELO

El modelo de fluidez utilizado fué el de la espiral sugerido por Berger y Perin (ref.4), montado en una placa modelo (fig.6)

TECNICA DE FUSION

La fusión se realizó en un horno de crisol de SiC de 12 Kg. calentado con gas, los materiales utilizados para la carga fueron aluminio puro grado comercial, las aleaciones Al-5Si y Al-12.8Si se prepararon con aluminio puro y una aleación Al-50Si. Para cada caso la carga se limpio y se precalentó en el umbral del horno hasta aproximadamente 150 C, la carga al crisol se efectuó cuando este alcanzo el color rojo cereza, al iniciarse la fusión de la carga se adicionó una cubierta protectora (flux) formado por 50 % de NaCl y 50 % de KCl, al alcanzar la temperatura máxima de trabajo se procedio a desgasificar con pastillas de hexacloroetano, cesada la reacción se le dió un tiempo corto de reposo al metal líquido, para finalmente colar a la temperatura correspondiente, la cual se midio con un termopar

cromel-alumel tipo K.

MEDICION DE LA FLUIDEZ.

El índice de fluidez obtenido es simplemente la distancia que recorre el metal antes de solidificarse y depende de todas las variables antes señaladas.

Para determinar esta longitud se recorre la espiral de la pieza a medir con un cordel y luego se mide esta distancia con un flexómetro. El cordel utilizado debe ser de diámetro similar al diámetro del canal de fluidez, esto es con el fin de tener los resultados con errores relativos constantes.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla y se corroboran con gráficas. De las gráficas elaboradas se obtiene una ecuación para predecir la fluidez de estas aleaciones en función del sobrecalentamiento y la composición.

En base a todos estos datos se deduce una ecuación global para predecir la fluidez de estas aleaciones en función del sobrecalentamiento y se compara con los datos experimentales reportados por Flinn (ref.22)

RESULTADOS EXPERIMENTALES.

Los resultados de las pruebas fueron los siguientes:

FLUIDEZ DE ALUMINIO PURO.

Tf = 660 °C

ΔT (°C)	Tc (°C)	Lf (Cm)					I.F.	
40	700	47.1	48.5	45	48.5	46.5	40	47.12
90	750	68.2	65	65	50	70	66.5	67.05
140	800	92.5	101.5	90.25	88		87	89.43

* observar la gráfica 1

FLUIDEZ DE Al-5Si

Tf = 620 °C

ΔT (°C)	Tc (°C)	Lf (Cm)					I.F.
40	660	41.5	39	46.7	39.8	40.1	40.1
85	685	54	56.2	55.8			55.26
90	710	63.9	70.9	66	62.5	63.8	64.05
140	760	75.3	76	79.1	78.5		77.22
180	780	79.1	84.6	85.3	85.7		85.2

* Observar la gráfica 2

FLUIDEZ DE Al-12.8Si

Tf = 577 °C

ΔT (°C)	Tc (°C)	Lf (Cm)					I.F.
40	617	43.5	49.5	49	49.7		49.4
90	667	71	74	64	76	72.8	73.45
140	717	92.8	95	80	80		92.6

* Observar gráfica 3

Tc = Temperatura de colada (°C).

Lf = Longitud de fluidez (Cm).

Tf = Temperatura de fusión (°C).

I.F. = Índice de fluidez promedio (Cm).

ΔT = Sobrecalentamiento (°C).

GRAFICAS.

En la gráfica 1 se observa el comportamiento de la fluidez con el sobrecalentamiento para aluminio puro.

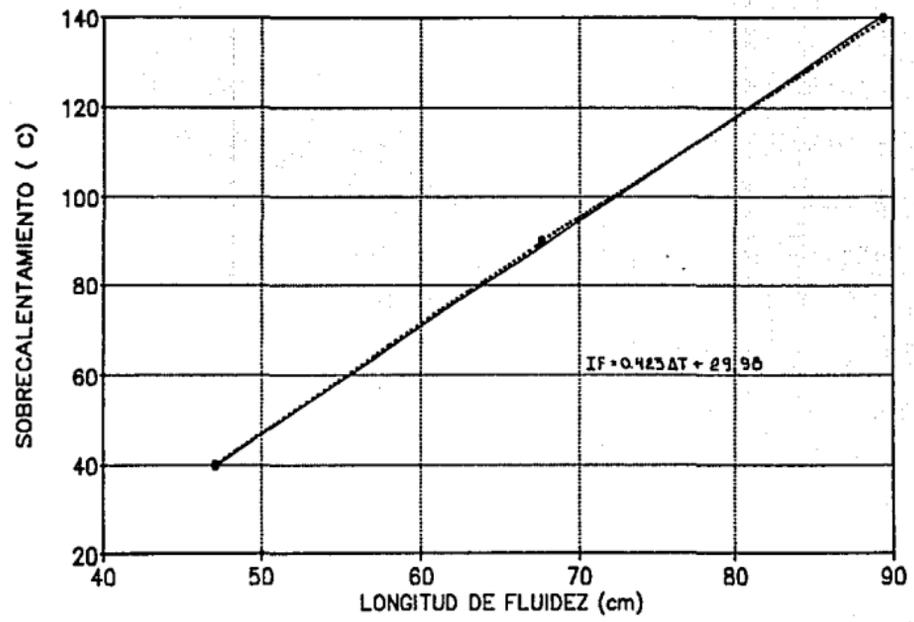
En la gráfica 2 se observa el comportamiento de la fluidez con el sobrecalentamiento para aluminio-5 silicio.

En la gráfica 3 se observa el comportamiento de la fluidez con el sobrecalentamiento para aluminio-12.8 silicio.

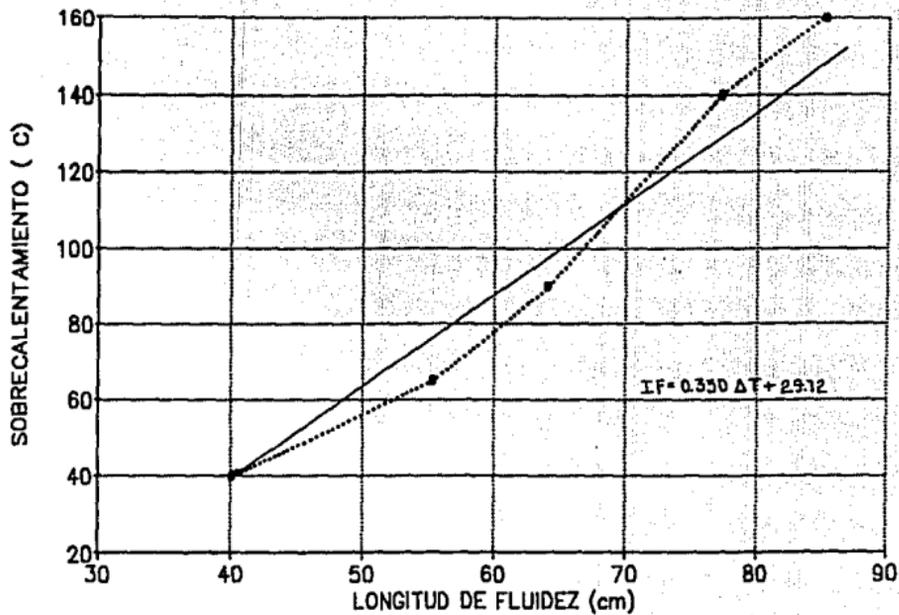
En la gráfica 4 se presenta el comportamiento del índice de fluidez con la composición de silicio para las aleaciones aluminio-silicio ensayadas a tres grados de sobrecalentamiento. ($\Delta T_1 = 40$ °C, $\Delta T_2 = 90$ °C, $\Delta T_3 = 140$ °C).

En la gráfica 5 se observan las curvas de comportamiento ajustadas para cada aleación así como la ecuación que define el comportamiento entre el índice de fluidez y el sobrecalentamiento. estas ecuaciones se obtuvieron por análisis de regresión lineal de los datos obtenidos.

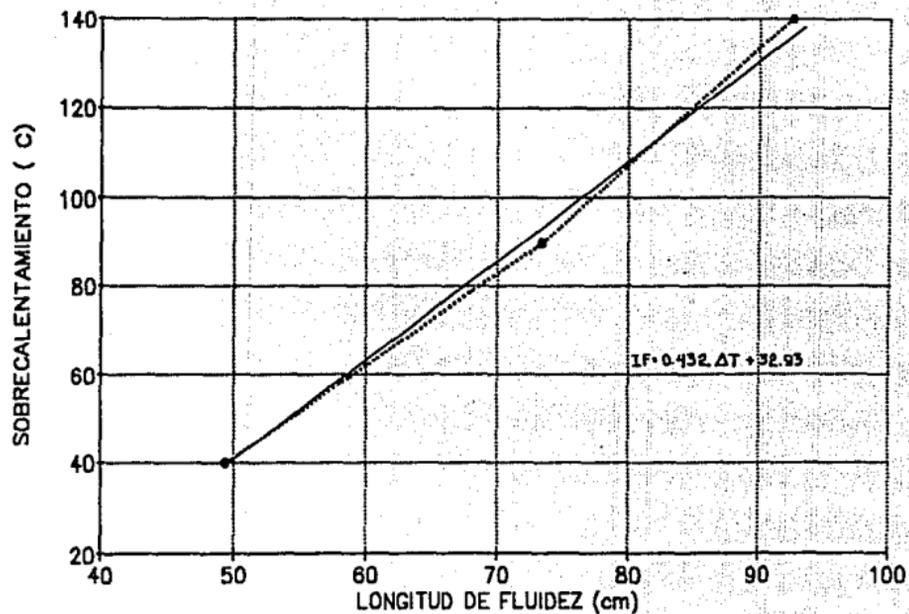
Gráfica 1
FLUIDEZ DE ALUMINIO PURO



Gráfica 2
FLUIDEZ DE AI-5SI

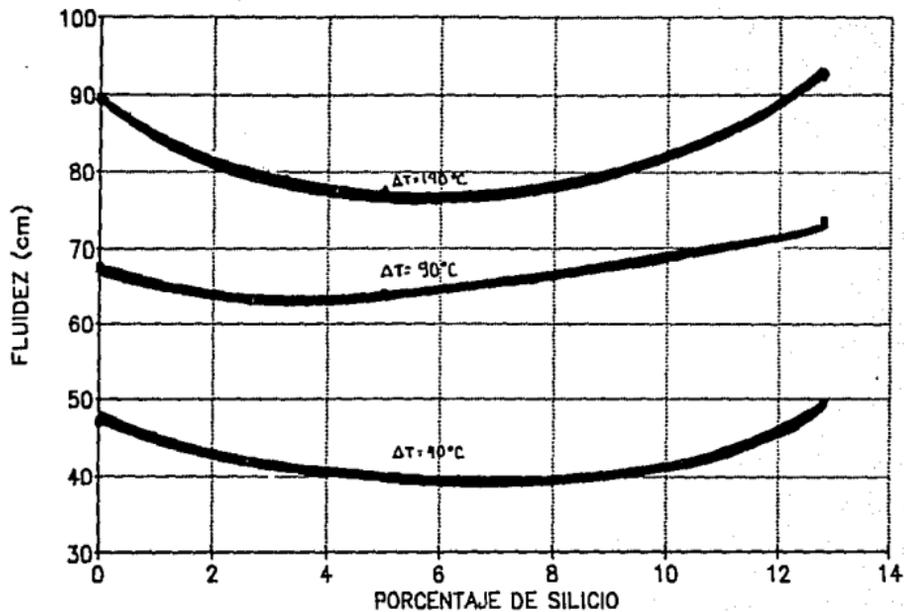


Gráfica 3
FLUIDEZ DE Al-12.8Si

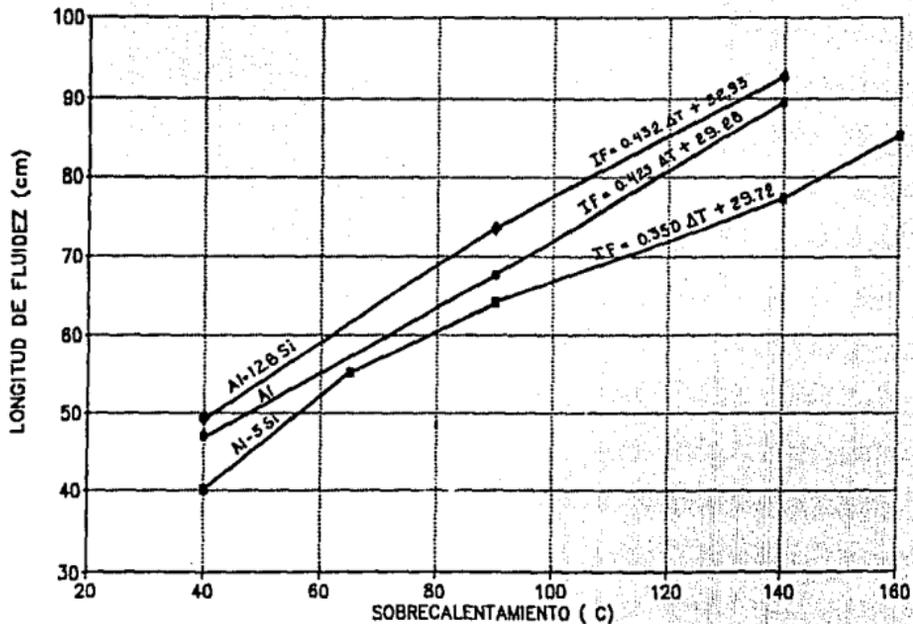


Gráfica 4

FLUIDEZ CONTRA COMPOSICION PARA Al-Si



Gráfica 5
FLUIDEZ DE ALEACIONES Al-Si



DISCUSION DE RESULTADOS

De los resultados obtenidos se puede apreciar que el índice de fluidez se incrementa cuando el grado de sobrecalentamiento aumenta. esto se debe a que se tiene que disipar mayor cantidad de calor para que la solidificación inicie.

Respecto al contenido de silicio se puede apreciar que el índice de fluidez es mayor en la aleación eutéctica (Al-12.8Si) que en las otras. esto se puede explicar en función del patrón de solidificación de esta aleación, la cual se comporta como aleación de rango corto; además de que el calor que se necesita liberar es mayor ya que el calor específico del silicio que es de 350 cal/g influye en el tiempo de vida líquida del metal comparado con el del aluminio que es de 95 cal/g. por este motivo se prefiere usar aleaciones de composición eutéctica para la manufactura de piezas pequeñas y complicadas en fundición.

La menor fluidez se obtiene en la aleación Al-5Si debido probablemente al modo de solidificación ya que se cambia la forma de la intercara sólido-líquida por la formación de pequeños cristales que ofrecen mayor resistencia al flujo.

Con los resultados obtenidos se determinaron por regresión lineal las ecuaciones para el comportamiento del índice de fluidez en función del sobrecalentamiento para cada aleación. estas son :

Aluminio	I.F. = $0.423\Delta T + 29.98$	Coef. de corr. = 0.99
Al-5Si	I.F. = $0.350\Delta T + 29.72$	Coef. de corr. = 0.987
Al-12.8Si	I.F. = $0.432\Delta T + 32.93$	Coef. de corr. = 0.99

Donde I.F.=Índice de fluidez (cm) y ΔT = sobrecalentamiento (°C).

Considerando que las pendientes y las ordenadas al origen son del mismo orden de magnitud, se afectuó un análisis por regresión lineal para todos los datos experimentales en conjunto; la expresión obtenida fué:

$$I.F. = 0.376\Delta T + 31.31$$

$$\text{Coef. de corr.} = 0.957$$

Comparando esta expresión con la obtenida a partir de los datos reportados por Flinn (ref.22) para aleaciones base aluminio; que es :

$$I.F. = 0.270\Delta T + 12.18$$

$$\text{Coef de corr.} = 0.830$$

se puede apreciar que el ajuste es mejor para para la expresión general obtenida en este trabajo que para la obtenida por Flinn.

CONCLUSIONES

- 1) El índice de fluidez se incrementa en forma lineal al aumentar el grado de sobrecalentamiento.
- 2) El índice de fluidez disminuye al aumentar el rango de solidificación.
- 3) Para el caso de las aleaciones aluminio-silicio hipoeutécticas y eutécticas se puede utilizar la expresión $I.F. = 0.378 \Delta T + 31.31$ con buena aproximación para predecir el comportamiento de la fluidez en función del sobrecalentamiento, independientemente de la composición.
- 4) Es posible utilizar estas expresiones para el cálculo en el diseño de sistemas de colada para corregir el factor por temperatura de colada y composición.
- 5) Estudios similares pueden efectuarse para aleaciones comerciales Al-Si hipereutécticas, Al-Cu, Al-Mg, Al-Si-Cu, Al-Si-Mg, Al-Zn, Al-Zn-Cu, etc. para ser comparadas con la ecuación obtenida.

BIBLIOGRAFIA

- 0) Report of Sub-Committee T.S.6 Procedure. Institute British Foundryman, 39, A 28 (1945).
- 1) D.V. Ragone, C.M. Adams, H.F. Taylor. Some Factors Affecting Fluidity of Metals. Trans A.F.S. Vol. 64 1956 p. 640-652.
- 2) C.J. Cooksey, V. Kondic, J. Wilcock. The Casting of Some Foundry Alloys. The British Foundryman, Vol 52 1959 p. 381-386.
- 3) A.I. Krynitsky. Progress made in Fluidity Testing of Molten Metals During The Last Ten Years. Trans. A.F.S. Vol 61 1953 p. 399-410.
- 4) Lew F. Porter, Philip C. Rosenthal. Factors Affecting Fluidity of Cast Iron. Trans A.F.S. Vol 61 1952 p. 725-736.
- 5) M.C. Flemings. Fluidity of Metals. Techniques for producing Ultra Thin Section Castings. The British Foundryman. 1964 p. 312-323.
- 6) M.C. Flemings, E.Niiyama, H.F. Taylor. Fluidity of Aluminium Alloys. Trans A.F.S. 1961 p. 625-635.
- 7) Sebastián Feliu, Leandro Luis. Flowing Possibilities of Aluminium in Sand Molded Channels. Trans A.F.S. Vol 72 1964 p. 129-137.
- 8) M.C. Flemings. Solidification Processing. McGraw-Hill p.219-225.
- 9) A. Morales, M.E. Gliksman, H. Biloni. Influence of Mould Wall Microgeometry on Casting Structure. Solidification and Casting of Metals. The Metals Society London 1979 p. 184-191.
- 10) A. Portevin, P. Bastien. Fluidity of Ternary Alloys. Journal , Institute of Metals 1934.
- 11) P.R. Beeley. Foundry Technology. Butterworths Cap. 1.
- 12) M.R. Seshadri, A.Ramachandran. Fluidity and Casting of Molten Cast Iron. Trans A.F.S. Vol 72 1964 p. 243-272.
- 13) Mollard F.R., Flemings M.C., Niiyama E.F. Aluminium Fluidity in Casting. Journal of Metals. Vol 39 No. 11 Nov 87.

- 14) S. Floreen, D.V. Ragone. The Fluidity of Some Aluminium Alloys. Trans A.F.S. Vol 65 1957 p. 391-393.
- 15) Lang. G. Giesseigenschaften und Oberflächenspannung Von Aluminium und Binarien Aluminiumegierunger, par I. Aluminium, Vol. 48 No 10 (1972) p. 664-672.
- 16) Amador Del Prado. Hernández Santiago. Ensayo para determinar la Fluidez de Aluminio y aleaciones de Aluminio-Silicio Tesis UNAM 1986.
- 17) J.L. J orstad. Reynolds Metals Co. The Hipereutectic Aluminium-Silicon Alloy used to Cast the Vega Engine Block. Trans A.F.S. 1987 p. 71-87.
- 18) Bruce Chalmers. Principles of Solidification. John Wiley and Sons 1982 p. 230-237.
- 19) Kondic P.H. Metallurgical Principles of Foundry. Edward Arnold Publishers L.T.D. London 1988 p. 34-42.
- 20) Richard A. Flinn. Fundaments of Metals Casting. Addison-Wesley Publishing Co p. 93-95.
- 21) A.J. Murphy. Noun Ferrous Foundry Metallurgy, F.I.M. London 1954 p. 30-47.
- 22) R.A. Flinn. W.A. Splinder, W.B. Pierce. A revised Fluidity Spiral Test A.F.S. August (1954).
- 23) A.F.S. Aluminium Casting Technology 1987 p. 25-28.

APENDICE

ANALISIS MATEMATICO DE LA FLUIDEZ.

SUPOSICIONES:

- 1) Todas las partículas de sólido formadas en el canal de fluidez fluyen hacia abajo con el líquido.
- 2) El flujo se detiene cuando la concentración media de sólido formada en las inmediaciones de la punta de flujo alcanza cierto valor (concentración crítica de sólido).
- 3) La velocidad de flujo es constante hasta que el flujo para.
- 4) Considerando el flujo de calor, la pared del molde es considerada como plana e infinitamente gruesa. La resistencia en la intercara metal-molde y el flujo de calor en el molde están considerados.

Para examinar las suposiciones empleadas en el cálculo del flujo de calor, se usa la prueba de fluidez de succión por vacío en un tubo de vidrio. Primero, se checa la validez de la suposición de un molde semi-infinito. La distribución de temperatura en un cilindro cóncavo de radio R calentado desde dentro en un corto tiempo está expresada por:

$$\frac{T - T_r}{T_m - T_r} = \sqrt{\frac{R}{r}} \left(1 - \operatorname{erf} \frac{r - R}{2 \sqrt{\alpha \theta}} \right) \quad \text{-----(1)}$$

Para encontrar el aumento de temperatura en la superficie externa del tubo se pueden sustituir los valores típicos en la ecuación (1). $R = 0.25$ cm, $r = 0.35$ cm, $\alpha = 0.006$ cgs, $\theta = 0.2$ seg.

Entonces:

$$\frac{T - T_r}{T_m - T_r} = 0.04$$

La elevación de temperatura en la parte externa del tubo es solo del 4 %, este tubo puede suponerse como un tubo infinitamente grueso. En un molde de arena que es mucho mas grueso, la validez de esta suposición es aparente.

La siguiente suposición de la pared plana del molde esta checada. Pasando por alto la resistencia en la intercara, el calor de absorción para una placa semi-infinita es:

$$\frac{Q}{A} = \frac{2 K (T_m - T_r)}{\sqrt{\pi \alpha}} \sqrt{\theta} \quad \text{-----(2)}$$

Mientras que para un cilindro semi-infinito es:

$$\frac{Q}{A} = \frac{2 K (T_m - T_r)}{\sqrt{\pi \alpha}} \left(\sqrt{\theta} + \frac{\sqrt{\pi \alpha}}{4 R} \theta \right) \quad \text{-----(3)}$$

El error relativo debido al uso de la ecuación 2 en lugar de la ecuación 3 es:

$$\frac{\frac{\sqrt{\pi \alpha}}{4 R} \theta}{\sqrt{\theta}} = \frac{\sqrt{\alpha \theta}}{4 R} \quad \text{-----(4)}$$

La substitución numérica de los valores para las variables da un error de 6 % el cual es razonablemente pequeño.

Considerando la resistencia de calor en la intercara, el calor transferido del metal al molde en una unidad de longitud del canal es:

$$q_1 = Sh(T - T_{sc}) \quad \text{-----}(5)$$

donde la temperatura T_{sc} en el límite es desconocida. Y el flujo de calor en el molde es:

$$q_2 = \frac{S K' (T_{sc} - T_r)}{\sqrt{\pi \alpha}} \frac{1}{\sqrt{\theta}} \quad \text{-----}(6)$$

Como q_1 debe ser igual a q_2 , T_{sc} puede ser eliminada combinando las ecuaciones 5 y 6 y el flujo de calor es:

$$q = \frac{S h (T - T_r)}{1 + \frac{\sqrt{\pi \alpha \theta}}{K'}} \quad \text{-----}(7)$$

Se puede ver que el tipo de flujo de calor esta determinado por el factor $h\sqrt{\pi \alpha \theta} / K'$. Cuando $h\sqrt{\pi \alpha \theta} / K'$ es pequeño (mucho menor que 1), la ecuación 7 nos queda:

$$q = S h (T - T_r) \quad \text{-----}(8)$$

Así que el flujo de calor esta controlado por la resistencia en la intercara y es consistente todo el tiempo. En otras palabras cuando $h\sqrt{\pi \alpha \theta} / K'$ es grande (mucho mas que 1) la ecuación 7 queda:

$$q = \frac{S K' (T - T_r)}{\sqrt{\pi \alpha}} \frac{1}{\sqrt{\theta}} \quad \text{-----}(9)$$

y el flujo de calor controlado por el flujo de calor en el molde disminuye con el tiempo. Cuando $h\sqrt{\pi \alpha \theta} / K'$ tiene un valor del orden de 1, entonces la ecuación 7 puede ser usada como tal y el flujo de calor esta controlado por la intercara y por el molde.

Partiendo de la ecuación general 7, considerando un punto a una distancia x cm desde la punta de flujo, suponiendo velocidad de

flujo constante, el tiempo pasado despues de que el metal toca este punto es :

$$\theta = \frac{x}{V} \quad \text{-----(10)}$$

por lo tanto el flujo de calor es:

$$q = \frac{S h (T - T_r)}{1 + \frac{h \sqrt{\pi \alpha}}{K'} \sqrt{\frac{x}{V}}} \quad \text{-----(11)}$$

Notese que q esta en función relativa de la punta de flujo, pero no en función del tiempo. Ahora nos interesa conocer el flujo de calor medio en la zona de estrangulamiento Δx . Este es :

$$q_m = \frac{1}{\Delta x} \int_0^{\Delta x} q \, dx$$

$$= \frac{1}{\Delta x} \int_0^{\Delta x} \frac{S h (T - T_r)}{1 + \frac{h \sqrt{\pi \alpha}}{K'} \sqrt{\frac{x}{V}}} \, dx \quad \text{-----(12)}$$

$$q_m = S h (T - T_r) \frac{2}{B'} [B - \ln(1+B)] \quad \text{-----(13)}$$

donde

$$B = \frac{h \sqrt{\pi \alpha} \Delta x}{K' \sqrt{V}} \quad \text{-----(14)}$$

La ecuación 13 puede ser aproximada con menos del 10 % de error para algún valor de B por:

$$q_m = S h (T - T_r) \frac{1}{1 + \frac{B}{2}} \quad \text{-----(15)}$$

El flujo total de calor en una unidad de longitud del canal desde un tiempo 0 hasta un tiempo θ es:

$$Q = S h (T - T_r) \frac{1}{1 + \frac{B}{2}} \theta \quad \text{-----(16)}$$

El calor disipado por el metal hasta el tiempo que para el flujo es la

suma del sobrecalentamiento mas el calor de fusión.

$$Q = A \rho C k H_f + C \Delta T \quad \text{-----(17)}$$

donde k es la concentración de sólido (en %)

El tiempo de vida del fluido se obtiene igualando las ecuaciones 16 y 17

$$\theta_f = \frac{A \rho C k H_f + C \Delta T}{S h (T - T_r)} \left(1 + \frac{B}{2} \right)$$

y la fluidez es :

$$L_f = V \theta_f$$

$$L_f = \frac{A \rho V C k H_f + C \Delta T}{S h (T - T_r)} \left(1 + \frac{B}{2} \right)$$

Esta es la ecuación básica de fluidez de una aleación expresada en términos del metal y del molde como variables.

A = Area del molde, cm²

$$B = h \sqrt{\pi \alpha \Delta x} / K' \sqrt{V} = L \sqrt{\pi \Delta x} / \sqrt{C' \rho' K' V}$$

C = Calor específico del metal, cal/gm °C

C' = Calor específico del molde, cal/gm °C

Hr = Calor de fusión del metal, cal/gm

h = Coeficiente de transferencia de calor, cal/cm²seg °C

k = Concentración crítica de sólidos, adimensional o en %

K' = Conductividad térmica del molde, cal/seg cm °C

Lr = Fluidez, cm

Q = Calor total que entra al molde por unidad de longitud, cal/cm

q = Flujo de calor del metal hacia el molde por unidad de longitud, cal/cm seg

R = Radio del canal de moldeo, cm

r = Radio de cilindros concéntricos en el molde, cm

S = Perímetro del canal de moldeo, cm

T = Temperatura del metal líquido, °C

Tm = Temperatura de fusión, °C

Tec = Temperatura del molde en la intercara, °C

Tr = Temperatura ambiental, °C

V = Velocidad de flujo del metal, cm/seg

α = Difusividad térmica del molde = $K' / \rho' C'$, cm²/seg

Δx = Zona de estrangulamiento, cm

ρ = Densidad del metal, g/cm³

ρ' = Densidad del material de moldeo, g/cm³

θ = Tiempo, seg

θ_i = Tiempo de vida del fluido, seg