



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE QUÍMICA

TESIS MANCOMUNADA

"ENSAYO PARA DETERMINAR LA FLUIDEZ DE ALUMINIO Y  
ALEACIONES ALUMINIO-SILICIO"

JORGE AMADOR DEL PRADO

FRANCISCO CARLOS HERNÁNDEZ SANTIAGO



DEPARTAMENTO PROFESIONALES  
FAC. DE QUÍMICA

INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

1986



## **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.

PROLOGO	
INTRODUCCION	
I. GENERALIDADES	3
II. GENERALIDADES	6
III. ENSAYOS PARA DETERMINAR LA FLUIDEZ DE LOS METALES	14
III.1 FACTORE RELATIVOS AL METAL	14
III.1.1 SOBRECALENTAMIENTO	14
III.1.2 COMPOSICION DEL METAL	16
III.1.3 TENION SUPERFICIAL DEL METAL LIQUIDO	26
III.1.4 FORMACION DE INCLUSIONES NO METALICAS EN EL METAL LIQUIDO	30
III.1.5 FORMACION DE PELICULAS SUPERFICIALES DE OXIDO	33
III.1.6 VISCOSIDAD DEL METAL LIQUIDO	34
III.2 FACTORES RELATIVOS AL MOLDE	36
III.2.1 HUMEDAD DEL MOLDE	36
III.2.2 COMPOSICION DEL MOLDE	38
III.2.3 CABEZA ESTATICA Y VELOCIDAD	38
III.2.4 TEMPERATURA DEL MOLDE	41
III.2.5 SUPERFICIE DEL MOLDE	42
III.2.6 TAMANO Y FORMA DEL MOLDE	43
IV. ENSAYO DE FLUIDEZ PROPUESTO	44
V. DISEÑO DEL EXPERIMENTO	44
V.1 CONDICIONES EXPERIMENTALES	45
VI. PROCEDIMIENTO	53
VI.1 RESULTADOS	53
VII. DISCUSION DE RESULTADOS	58
VIII CONCLUSIONES	50
RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS POSTERIORES	61
BIBLIOGRAFIA	62

## PROLOGO

Para conocer las propiedades de los metales (como de -- otros materiales), es menester someterlos a exámen y a pruebas, y éstos suelen ser practicados con elementos especiales que permiten asignar a toda propiedad, realizada la prueba, una unidad de medida y un valor numérico de modo que sea posible confrontar los resultados obtenidos.

Una prueba de gran importancia para los fundidores es la; PRUEBA DE FLUIDEZ, entendiéndose ésta como la aptitud mas o menos grande que posee un metal o aleación líquida para llenar la cavidad de un molde antes de solidificarse.

En el presente trabajo se hallará información sobre la fluidez, así como la proposición de un modelo nuevo para su medición tratando de alguna manera la estandarización de la prueba para el propósito general de la investigación o como un ensayo práctico para el control del proceso.

## INTRODUCCION.

El interés especial por la prueba metalúrgica de fluidez es el objeto de investigación de esta tesis.

El vaciado del metal fundido dentro del molde es uno de los pasos críticos en la fundición, ya que el comportamiento del líquido y la subsecuente solidificación y enfriamiento determinan si la pieza fundida se formará apropiadamente, y será de buena calidad y libre de defectos.

El éxito de la operación de colada depende parcialmente de ciertas cualidades del mismo metal, por ejemplo su composición y temperatura, las cuales influyen en el flujo así como también depende de la naturaleza del molde.

Es por eso importante controlar la fluidez del metal o aleación líquida al momento de la colada.

No obstante que otros términos tales como la colabilidad han sido usados para describir ciertos aspectos del comportamiento del flujo del metal líquido, el término fluidez es más ampliamente reconocido.

El término fluidez ha sido tomado por los fundidores de los físicos, quienes lo usan para referirse al inverso de la viscosidad, en la terminología de la fundición sin embargo, la fluidez es un término empírico para indicar una propiedad de la fundición definida como la cualidad del metal líquido que le facilita fluir a través de los pasajes de un molde y llenar todos los intersticios del molde, proporcionando contornos agudos y una reproducción fiel de los detalles del diseño. De aquí resulta que una fluidez inadecuada puede ser un factor en las fundiciones con flujo reducido o en la definición pobre de los rasgos superficiales. Se puede apreciar, en seguida que la fluidez no es una propiedad física simple en el mismo sentido como la densidad o la viscosidad, sino que es una característica compleja relacionada al comportamiento bajo condiciones específicas dentro de un molde de fundición.

Bajo ciertas condiciones de flujo y enfriamiento, --

el molde será llenado completamente y la esencia de la teoría del ensayo de fluidez es encontrar las relaciones entre los parámetros de energía y propiedades que podrían permitir la predicción del grado de llenado del molde de prueba para un diseño específico de pieza para ensayo de fluidez. Un factor particular que ha atraído la atención de los metalurgistas es la explicación de que algunas aleaciones bajo un conjunto dado de condiciones de energía y del molde no llenan completamente este o muestran una fluidez mas baja que otras aleaciones. Entre los fundidores, por otro lado existe un fuerte interes en las aplicaciones mas amplias de los ensayos de fluidez en la práctica de la fundición.

## I. GENERALIDADES.

Frecuentemente se pone en discusión que ciertos metales son mas fluidos en comparación con otros y naturalmente, se han hecho intentos para expresar las diferencias cualitativas de esta clase en términos cuantitativos. Por lo tanto se han diseñado pruebas en las cuales los metales fundidos son colados en moldes que comprenden un canal largo arreglado ya sea en una -- línea recta o curva; la longitud de la prueba así formada es to mada como una medida de la fluidez del metal.

Alguno de los métodos utilizados han sido objetados por que la turbulencia formada durante la colada da a el metal fundido un cierto momentum variable en la dirección en que viaja en el molde. La investigación mas detallada de la relación entre los resultados de la prueba de fluidez y la variable de fundición es aquella que realizó Kondic<sup>(6)</sup> y Koslowski, el cual utilizó un molde en espiral.

Para dar corridas razonablemente largas el molde se mantenía a una temperatura cerca de la línea solidus de la aleación probada.

Las pruebas mostraron que la temperatura del molde por si misma es un factor de importancia.

La experiencia de los fundidores no esta enteramente en -- armonía con este punto de vista, la discrepancia probablemente surge del hecho que la temperatura de vaciado utilizada por -- Kondic<sup>(6)</sup>, implica implica un sobrecalentamiento mucho mas grande que el utilizado en la práctica.

También se encontro que la cabeza del metal es de cierta importancia en las condiciones de este experimento.

Dentro de los límites que se pueden encontrar en la práctica las variaciones de la cabeza del metal no muestran tener un efecto muy marcado en la corrida de la piezas.

Estos resultados indican también que la cabeza del metal pue de ser muy importante para las piezas de secciones delgadas, don de los efectos de la tensión superficial pueden operar para que el metal fluya.

Los resultados de la mayor parte de las investigaciones en el poder de corrida estan de acuerdo en que la longitud de la fluidez obtenida esta relacionada linealmente al sobrecalentamiento, si se mantienen las otras variables constantes.

Esta regla es ejemplificada por los resultados de Kondic y Koslowski<sup>(6)</sup> en el cadmio, plomo y estaño, y por Lees<sup>(2)</sup> en aluminio.

Las experiencias de las fundiciones de las aleaciones de aluminio y la aleación altamente fluida de aluminio-silicio (composición eutéctica), posiblemente ha sido la causa de considerar un interés muy especial el cual ha dado como resultado la conexión entre la constitución y la fluidez de la muestra. Un estudio temprano de la relación fue hecho por Bastien<sup>(14)</sup>; la interpretación de sus resultados no es fácil aunque mostraron que la fluidez mas alta es poseida por los metales puros y los de composición eutéctica. Datos mas recientes han sido por Kondic y Koslowski<sup>(6)</sup>, los cuales trabajaron en los sistemas plomo estaño y aluminio-silicio las cuales tambien han mostrado que hay un mínimo correspondiente al máximo rango de solidificación.

Actualmente las pruebas de fluidez han sido relacionadas con, por ejemplo, la viscosidad absoluta de los metales en cuestión. El flujo del metal fundido a lo largo de un molde de canal estrecho debe ser controlado por varios factores, al principio éste flujo se lleva a cabo sin la complicación causada por la separación del metal sólido. La duración del período del flujo libre debe ser controlada por la temperatura del metal, su calor específico, densidad y por el índice en el cual se disipa el calor de el flujo por el molde. Mas tarde, el metal sólido comienza a separarse en la superficie del canal reduciendose la sección de intersección, a travez de la cual el metal fundido puede fluir. La mayoría del flujo ocurre en el período de flujo libre, en general el índice del flujo no es alto porque el flujo rápido y la turbulencia asociada aumentarían las inclusiones de óxido, el desprendimiento de gas en el molde, etc. Sin embargo, la viscosidad real del metal líquido cuando es baja y del mismo orden que aquella a temperatura ambiente no se esperaria tener un efecto marcado en la longitud de la fluidez de la corrida y esta se controla principalmente por la cantidad de calor que se



va a extraer del metal antes de que los cristales primarios  
comiencen a ser depositados en las paredes del molde y el índice  
en el cual es extraído por el molde mismo.

## II. ENSAYOS PARA DETERMINAR LA FLUIDEZ DE METALES

Varios tipos de ensayos se han diseñado para la medición de la fluidez de los metales líquidos. A continuación se resumen brevemente las pruebas de fluidez reportadas en la literatura.

Ya que la fluidez no puede ser calculada de propiedades físicas individuales (directamente), se han ideado ensayos empíricos para medir las características globales. Estos están basados en condiciones análogas a las del vaciado de metales en la fundición y miden la fluidez como la distancia total alcanzada por el metal fundido en sistemas estandarizados de canales cerrados antes del cese del flujo. Otro parámetro en tales ensayos es el tiempo de flujo o vida del fluido.

De los tipos que se han diseñado se ha encontrado que el proceso de llenado del molde está controlado en su mayor parte por dos tipos de intercambios de energía en los cuales varias propiedades de la aleación y del molde desempeñan partes importantes.

Los ensayos frecuentemente difieren en sus diseños dependiendo del tipo de proceso de fundición al cual se quiere aplicar.

Esto se debe a que los sistemas hidráulicos (sistemas de entrada), varían ampliamente tanto en los moldes de arena como en los moldes de metal así como en los procesos de fundición a la cera perdida. La mayor parte de los trabajos publicados en este campo se refieren a ensayos de "fluidez de la fundición" en moldes de arena, para los cuales las variables de fuentes de energía y propiedades físicas se muestran esquemáticamente en la figura 2.1.

La acción conductora sobre el líquido a la entrada del molde está proporcionada por la energía cinética y la energía de presión cuyos valores pueden ser calculados aproximadamente de las leyes de la hidráulica.

Los efectos que retardan el flujo dentro del molde son

causados parcialmente por pérdidas de energía hidráulica (por ejemplo, pérdidas debidas a la fricción), que pueden causar un cese del flujo por la solidificación de la aleación.

Las pérdidas hidráulicas y las de calor son dependientes de las propiedades de la aleación así como de las del molde.

A continuación se describen los ensayos de fluidez reportados en la literatura.

#### a) PRUEBAS DE ESPIRAL.

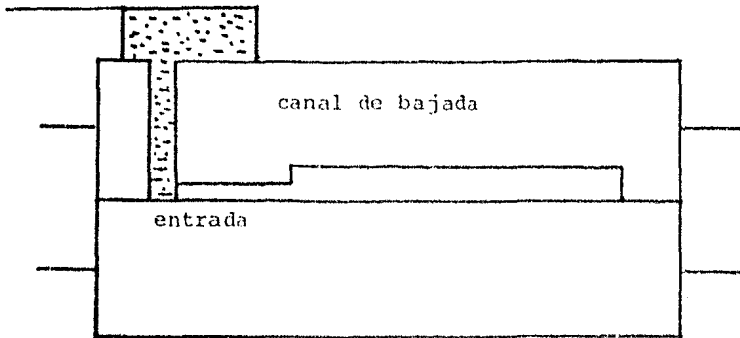
Un típico ensayo de fluidez en espiral se ilustra en la figura 2.2 este ensayo es ampliamente usado para acero fundido y hierro colado. Las variaciones en el ensayo en espiral han sido principalmente concernientes al problema de la obtención de condiciones verdaderamente estándares de flujo. Este problema ha sido atacado mediante varios diseños del sistema de depósito para regular la altura de la caída de presión, por artefactos para obtener una rapidez constante de vaciado para asegurar una velocidad uniforme de entrega de metal al sistema.

Debido a que las medidas de la fluidez son también sensibles a cambios pequeños en las propiedades térmicas y en las características superficiales del molde, han sido usados moldes de grafito y de metal para minimizar la variación en estos factores.

VARIABLES TÍPICAS DEL PROCESO A LA ENTRADA  
DEL MOLDE:

(1) Diseño del sistema hidráulico

(2) Contenido de calor de la aleación



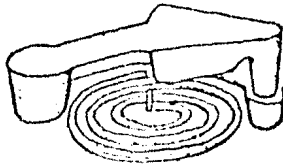
VARIABLES DE LA CAVIDAD DEL MOLDE:

(1) Forma y tamaño de la fundición

(2) Comportamiento de transferencia de calor del molde y la aleación

(3) Flujo y solidificación de la aleación

Fig. 2.1 Ref. (1)



Espiral de fluidez. Ref. (2)

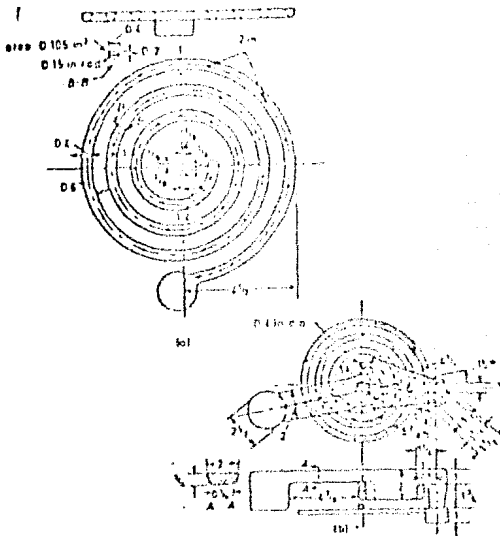


Figura 2.2. Detalles del diseño del ensayo de fluidez en espiral. a) Espiral estándar de fluidez, b) arreglo de la entrada vertical y la vasija de vaciado. Ref. (2).

## b) ENSAYO DE FLUIDEZ EN VACIO

La aproximación mas cercana a una completa estandarización se ha alcanzado en el ensayo de fluidez en vacío ideado por Ragone, Adams y Taylor<sup>(3)</sup> Usando este aparato, ilustrado en la figura 2.3 el metal fluye a través de un tubo de vidrio liso bajo succión inducido por un vacío parcial; La caída de presión es de este modo exactamente conocida y el factor humano es eliminado. Estos últimos refinamientos de la técnica se aproximan al ideal de excluir las variables del molde y de medir la fluidez como una propiedad única del metal en estudio.

Varias ventajas de este ensayo han sido descritas, una de las mas importantes es que el progreso del flujo del metal puede ser registrado fotográficamente y las curvas de longitud de flujo vs. tiempo pueden ser determinadas experimentalmente.

Las figuras 2.4 y 2.5 muestran resultados típicos para este tipo de ensayo, considerando el efecto de la velocidad inicial y de los diferentes grados de sobrecalentamiento sobre el flujo de aluminio puro.

## c) ENSAYOS DE CANAL RECTO

Aunque los ensayos de fluidez en espiral y en vacío han alcanzado un alto grado de refinamiento para el trabajo fundamental, otros ensayos han sido empleados en intentos para obtener una representación mas amplia de las condiciones en los moldes de fundición especialmente aquellos que incorporan un amplio rango de tamaños de pasajes. El ensayo de espiral ha sido encontrado insatisfactorio para la aplicación directa en el taller de fundición ya que los resultados reproducibles pueden normalmente ser obtenidos unicamente bajo condiciones de laboratorio.

Evidentemente este ensayo da solamente un índice de la habilidad de una aleación para fluir.

Los mas recientes desarrollos se han encaminado hacia un tipo diferente de ensayo que mediría la habilidad de llenado del molde o fluidez de la fundición en el lugar de la habilidad para fluir.

Los comportamientos del flujo en canales muy estrechos han sido incorporados en ciertas técnicas nuevas para la medi-

ción de la fluidez. En los sistemas de canales múltiples, se busca una representación mas amplia de las condiciones de una fundición por la integración de las distintas tiras de flujo obtenidas en los canales que difieren grandemente en espesores. Uno de estos ensayos es el ensayo de fluidez en forma de U , recomendado por The Institute of British foundrymen y que se lleva a cabo en un molde permanente. En este ensayo, figura - 2.6 el metal es vaciado dentro del molde hasta que se llena el alimentador. La fluidez es entonces medida como la longitud - del recorrido en las ramas de fluidez de 2.4 y 6 mm. de diámetro. 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 de tipo de caja, pero no proporciona un conocimiento profundo de los problemas de llenabilidad .

(1)

Cooksey, Kondic y Wilcock diseñaron una probeta de ensayo para fundición en arena (utilizando el proceso  $CO_2$ ).

Un diagrama del modelo de ensayo se muestra en la figura 2.7, que consiste de una vasija de vaciado, un corredor vertical y una barra corredor que alimenta cuatro tiras de diferente espesor, la longitud total de las cuatro tiras es sumada y dividida entre cuatro para así obtener el valor promedio de la medida de la fluidez de la fundición, este valor es graficado en todas las gráficas presentadas en la literatura.

Al Potenci6metro

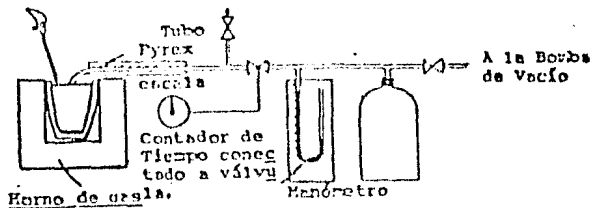


Fig. 2. 3 Dibujo esquem6tico de fluid6metro al vac6o, usado por Taylor y colaboradores. Ref. (3)

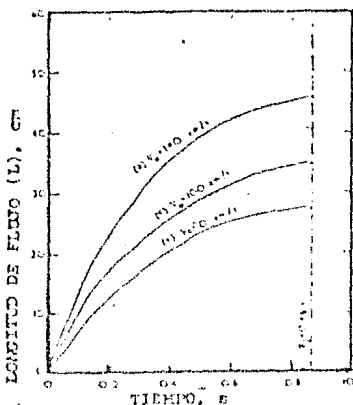


Fig. 2. 4 - Efecto de la velocidad inicial del metal sobre el flujo de aluminio puro. Sin sobrecalentamiento Ref. (4)

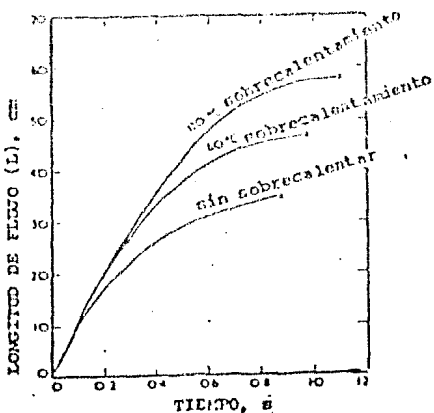


Fig. 2. 5 - Efecto del sobrecalentamiento sobre el flujo de aluminio puro. Velocidad inicial del metal 100 cm/s



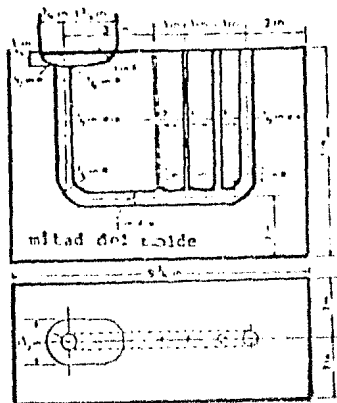


Fig. 2.6 Ensayo de Fluidéz en forza de U

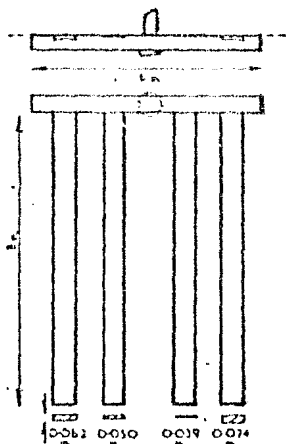


Fig. 2.7 Diagrama del modelo para el ensayo de fluidéz, según Kondić et al. Ref. (1)

### III. FACTORES QUE AFECTAN LA FLUIDEZ.

#### III.1 Factores relativos al metal

##### III.1.1. SOBRECALENTAMIENTO.

La fluidez como una función de la temperatura de colada ha sido determinada para un número de metales de bajo punto de fusión, aleaciones ligeras y aleaciones ferrosas para fundición. En general, se obtienen dos tipos distintos de relaciones, figura 3.1 (a y b), dependiendo tanto de las condiciones experimentales usadas como del tipo de aleación investigada.

Hay dos causas principales para la desviación de la relación lineal mostrada en la figura 3.1 (a).

(1) La condición de la aleación puede ser alterada con el aumento de la temperatura, aparte de la elevación en el calor disponible (por ejemplo cantidad de gases, oxidación, etc.).

(2) El modo de solidificación (que afecta el flujo de metal en el molde fluidez) puede ser modificado (por ejemplo el grado de sub-enfriamiento).

Las gráficas de temperatura de colada VS. fluidez tienen aplicaciones teóricas y prácticas. Las discontinuidades que se observan algunas veces en tales gráficas pueden ser correlacionadas a cambios físico-químicos en metales líquidos con la temperatura. Por otro lado, la fluidez obtenida a una determinada temperatura de colada puede ser usada en la práctica para una prueba de control, de seguridad en la fabricación de ciertos tipos de fundición.

La temperatura de colada es un factor primordialmente importante en la modificación de la fluidez, temperaturas de colada con elevado sobrecalentamiento tienden a elevar considerablemente la fluidez. Debido a que este factor es de fácil control -- práctico por el fundidor, se utiliza para asegurar el llenado adecuado de piezas con secciones delgadas y/o seccionadas. El efecto de la temperatura de colada se analiza en términos del calor contenido en el metal líquido como función de la temperatura de colada y de la rapidez de disipación de este por el --molde (transferencia de calor).

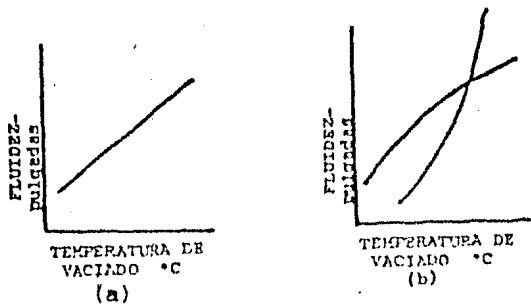


Fig. 3.1(a y b). Relaciones fluidez/temperatura de vaciado.  
Ref. (6)

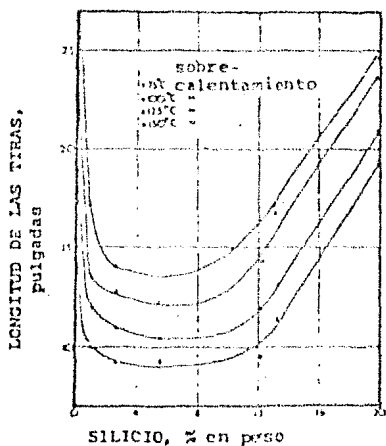


Fig. 3.1.c. - Fluidez de la fundición de las aleaciones  
Al-Si. Referencia (5)

### III.1.2. COMPOSICION DEL METAL

Comparaciones válidas de la fluidez de varias aleaciones pueden únicamente ser hechas a sobrecalentamiento constante pero bajo estas condiciones una relación hecha emerge entre la composición de la aleación y la fluidez.

Se ha encontrado que una fluidez alta es comunmente asociada con metales puros y con las aleaciones de composición eutéctica; las aleaciones que forman soluciones sólidas especialmente aquellas con rango largo de solidificación, tienden a mostrar una fluidez pobre.

Portevin y Bastien<sup>(14)</sup> establecieron una relación inversa entre fluidez y rango de solidificación. Esto ha sido comprobado por otros investigadores bajo la supervisión de Florcen y Ragoné en sus trabajos con aleaciones de aluminio, la relación entre composición y fluidez para un sistema de aleaciones es ilustrada en la figura 3.2. Diferencias entre los comportamientos de varios tipos de aleaciones pueden ser atribuidos primeramente a su característica modo de solidificación. En el caso de aleaciones en las cuales la solidificación ocurre por su avance progresivo de una intercara plana de la pared del molde, el flujo puede continuar hasta que el canal es finalmente obstruido. Esto se encuentra que ocurre cerca del punto de entrada, los metales puros solidifican de esta manera y muestran apreciable fluidez aún cuando la colada sea a la temperatura del liquidus y el flujo continúa durante la evolución del calor latente de cristalización en aleaciones en las cuales el subenfriamiento constitucional y otros fenómenos producen una cristalización independiente en la masa principal del líquido, el flujo es detenido por la presencia de cristales libres en el líquido en la punta de la corriente (de avance). Estos modos alternativos de solidificación, son ilustrados en la figura 3.3 junto a la situación intermedia involucrando una interfase dendrítica. Aunque la constitución y el modo de solidificación son de un significado mayor para contadas aleaciones diferentes las comparaciones de fluidez-sobrecalentamiento dependen de factores adicionales. De un modo igual en el caso de aleaciones que exhiben modos similares de solidificación las relaciones fluidez-sobrecalentamiento no son idénticas; el tiempo de enfriamiento a la temperatura de solidificación depende del contenido de calor

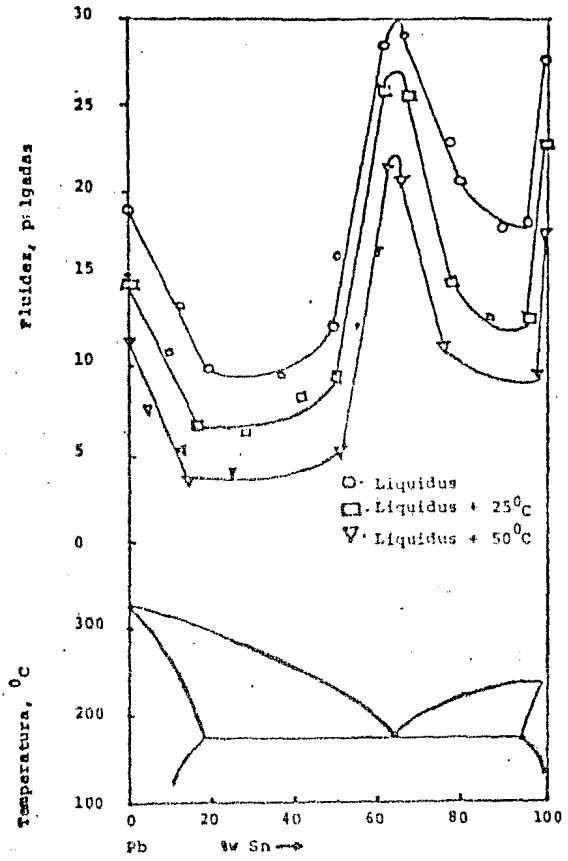


Fig. 3.2. Fluidez en el sistema plomo - estaño  
 Ref. (3)

y de las propiedades térmicas.

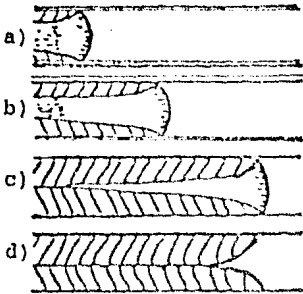
La distancia del flujo es entonces afectada por el volumen de calor específico, el calor latente de fusión y la conductividad térmica de las aleaciones. La influencia de las propiedades térmicas es ejemplificada en el sistema aluminio-silicio, en las cuales la máxima fluidez ocurre en la composición eutéctica como en muchos otros sistemas de aleaciones.

En el caso de las aleaciones hipereutécticas éstas muestran gran fluidez debido al calor de fusión del silicio primario.

Aparte de la composición básica, otras características afectan la fluidez incluyendo la presencia de gases disueltos e inclusiones no metálicas en el baño líquido. figura 3.1.c.

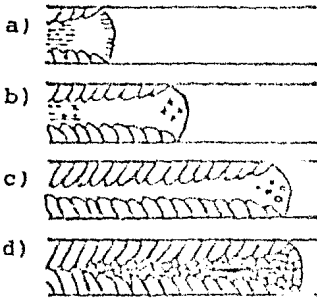
Consideremos ahora el flujo y la solidificación de un metal puro colado en su punto de fusión en un canal de ensayo de fluidez, en el instante que este metal entra al canal, comienza la solidificación en la entrada de éste, mientras prosigue recorriendo el canal la solidificación también comienza en estos sitios. Sin embargo, debido a que la solidificación empezó primero en la entrada del canal es aquí donde el flujo es obstruido. La figura 3.3.1. ilustra el proceso anterior.

## I



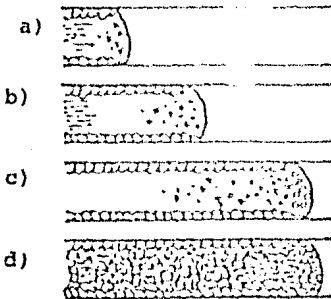
- a) El líquido penetra al canal y se forman granos columnares con una intercara sólido - líquido lisa.
- b) Los granos columnares continúan creciendo hacia el centro de flujo.
- c) Choque de los dos frentes de solidificación.
- d) El líquido residual solidifica, en el frente del flujo, originando un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

## II



- a) El líquido fluye por el canal y se forman granos columnares con una intercara sólido - líquido facetada.
- b) Los granos columnares continúan creciendo, aparecen finos núcleos en el frente del flujo.
- c) Choque entre los dos frentes de avance a la entrada del canal, aunque esta sección no este completamente solidificada.
- d) El líquido residual solidifica con granos equiaxiales.

## III



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

concentración crítica de granos finos en el frente de avance.

d) El líquido residual solidifica como granos equiaxiales, y se forman microrechupes distribuidos en la estructura.

Fig. 3. Mecanismos de solidificación en canales (Ref. 9)

La adición de elementos de aleación a un metal puro siempre disminuye su fluidez (a un sobrecalentamiento dado).

La figura 3.2 muestra resultados típicos para una serie de de aleaciones plomo - estaño. La razón por la cual la fluidez disminuye es que la solidificación ya no tiene lugar con frente plano, las dendritas que se forman crean mas resistencia al flujo de fluido en una etapa mas temprana de la solidificación. La figura 3.3.2 muestra esto esquematicamente para granos columnares tales como los encontrados generalmente en fundiciones de ensayos de fluidez de aleaciones diluidas - con grano sin refinar. En aleaciones de grano refinado, algunos granos finos son transportados junto con el extremo de la corriente de flujo. Así la detención del flujo puede ser por la formación de suficiente sólido en el extremo para bloquear el flujo (como se ilustra en la figura 3.3.2), al aproximarse la composición de la aleación a un eutéctico, se encuentra que la fluidez generalmente aumenta. Las primeras especulaciones - fueron que esto era debido a cambios en la viscosidad del metal cerca del eutéctico, pero ahora se sabe que el aumento -- resulta simplemente debido al comportamiento (modo) de solidificación. El eutéctico solidifica en forma muy semejante al -- metal puro de la figura 3.3.1.

Para ilustrar los parámetros importantes puede hacerse un análisis simplificado, omitiendo los efectos de fricción y y de la aceleración de la gravedad y suponiendo que no ocurre una separación de la corriente de flujo. Este análisis es para un metal puro vaciado sin sobrecalentamiento (figura 3. y suponiendo también que el flujo de calor está controlado por el coeficiente de transferencia de calor "h". La solidificación en cada punto en la entrada del canal ocurre a una velocidad que es independiente del flujo del fluido. Así, la solidificación de cada elemento del canal de longitud dx se lleva a - cabo completamente en un tiempo dado según la ecuación:

$$t_F = \frac{\int_0^s H}{h(T_M - T_0)} \frac{V}{A} \text{-----(1)}$$



donde:

$\rho_s$  = Densidad del metal

$T_m$  = Temperatura de fusión

$T_o$  = Temperatura del molde

$V/A$  = Relación área volumen de la fundición

$h$  = Coeficiente de transferencia

Con  $V/A$  igual a  $a/2$  para un canal de sección transversal circular de radio  $a$ . El elemento que está exactamente en la entrada del canal solidifica en un tiempo  $t_f$  dado por:

$$t_f = \frac{\rho_s H a}{2h (T_M - T_o)} \quad \text{----- (2)}$$

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

Ahora simplifiquemos un poco el problema del flujo de fluido omitiendo los efectos de la fricción y de la aceleración y suponiendo que no ocurre una separación de la corriente de flujo entonces, para una caída de presión aplicada constante  $V$ . La longitud total de flujo antes de que solidifique la entrada del canal (esto es, la fluidez) es por tanto:

$$L_f = \frac{\rho_s H a V}{2h (T_M - T_o)} \quad \text{----- (3)}$$

Donde  $L_f$  es la fluidez. El sobrecalentamiento aumenta la fluidez en una forma simple cuando el flujo de calor está controlado por el coeficiente de transferencia de calor "h".

La longitud adicional de flujo debida al sobrecalentamiento es simplemente la longitud requerida para disipar el sobrecalentamiento de acuerdo a la ecuación

$$T = \frac{2h (T_i - T_o) L}{a \rho_L c V} \quad \text{----- (4)}$$

Combinando las ecuaciones 3 y 4 y con  $s = L$  obtenemos la fluidez para un metal sobrecalentado

$$I_{\text{F}} = \frac{\int s \, aV}{2h (T_M - T_0)} (H + c\Delta T) \text{ -----(5)}$$

Donde  $\Delta T$  es el sobrecalentamiento. La ecuación 5 muestra muchas de las variables importantes que influyen en la fluidez como la considera el fundidor. La longitud de flujo depende sensiblemente del tamaño del canal y del coeficiente de transferencia de calor de la intercara, esta aumenta aproximadamente en forma lineal con el sobrecalentamiento.

La fluidez depende también de la velocidad de flujo y por tanto aproximadamente de la raíz cuadrada de la altura de la caída del metal de acuerdo a la ecuación:

$$h = \frac{v^2}{2g} \text{ -----(6)}$$

Donde:

V= velocidad de flujo

g= aceleración debida a la gravedad

#### MECANISMO DE SOLIDIFICACION(rango de solidificación).

Ya que los cambios en composición de la aleación se reflejan en el mecanismo de solidificación, esto tiene un marcado efecto sobre el índice de fluidez. La forma en que la costra sólida se forma en las paredes del canal del molde, así como su progresivo crecimiento retardan o incrementan el tiempo de flujo del metal en el canal antes de que este solidifique, por tanto la forma de la intercara de avance (forma de cristalización) y la rapidez de solidificación pueden obstruir el flujo de metal líquido durante el llenado del molde.

Un metal puro (rango de solidificación corto), solidifica en forma gradual y progresivamente por crecimiento desde la pared hacia el centro del canal en forma de capas sólidas aparentemente lisas, lo cual no restringe el flujo en el interior del canal (avance planar de la intercara) y el flujo continúa hasta que el canal es cerrado, esto puede ocurrir cerca del punto de entrada del metal, por tanto el modo de solidificación de este tipo presenta una apreciable fluidez, aun cuando se cuele muy cerca -

de la temperatura del líquido el flujo continuara durante la evolución del calor latente de solidificación. ( fig. 3.3.1)

En el caso de aleaciones de composición eutéctica el mecanismo de solidificación es similar al de los metales puros (se consideran de rango de solidificación corto), es decir ocurre la formación de una costra en la pared del molde, la cual progresa lentamente hacia el centro del canal, y cerrándose conforme la solidificación progresa.

La adición de elementos de aleación a un metal puro, generalmente hacen decrecer la fluidez, es decir la aleación tiende a comportarse como una aleación de rango largo de solidificación.

En aleaciones de este tipo en las cuales el sobreenfriamiento constitucional y otros fenómenos producen formas diferentes de la intercara planar, incluso nucleación independiente en la masa del líquido, la fluidez puede ser reducida por efecto de superficies irregulares ( puntas de avance de la intercara) de la costra sólida formada, o puede ser casi totalmente obstruida por la presencia de cristales libres en el líquido.

Aunque la constitución y el modo de solidificación de la aleación son de mucho significado para la fluidez, la comparación de ésta, depende de algunos factores adicionales, aun en el caso que exhiban mecanismos similares de solidificación.

Las relaciones fluidez- sobrecalentamiento- composición no pueden ser idénticas, ya que el tiempo de solidificación a la temperatura de solidificación depende del contenido calórico y propiedades térmicas, mas bien que unicamente de la temperatura, la distancia del flujo (índice de fluidez) por tanto es afectada por el calor específico, el calor latente de fusión y la conductividad térmica de la aleación.

La influencia de las propiedades térmicas se ejemplifica en el caso de las aleaciones aluminio- silicio, en el cual la máxima fluidez ocurre a la composición eutéctica, como en muchas -- otras aleaciones, en este caso las aleaciones hipereutécticas presentan mayor fluidez debido al alto calor de fusión del silicio primario.

Para ejemplificar lo anterior se consideraran las aleaciones aluminio- silicio. Cuando un metal solidifica se involucra la liberación de calor latente de solidificación durante la tran

sición de fase, esta cantidad de calor ha sido definida como calor de cristalización (o de fusión). Este fenómeno se aprecia en la meseta de las curvas de enfriamiento para un metal dado, la longitud de esta meseta esta relacionada con la cantidad total de energía disipada durante la transformación sólido-líquido.

Esto puede apreciarse en la curva de enfriamiento de una aleación eutéctica (12.6% Si) cuando se compara con la de aluminio puro, fig. 3.4, ya que se libera una mayor cantidad de calor cuando el aluminio se alea con el silicio. Esto se debe a que el calor de cristalización del silicio es de 350cal/g., mientras que para el aluminio puro solo es de 95cal/g. En las aleaciones el calor de cristalización esta determinado por la combinación de las cantidades proporcionales de los calores de fusión de cada elemento aleante. A esto se debe la elevación del calor de fusión de la aleación eutéctica aluminio-silicio respecto a la del aluminio puro. Este alto calor de fusión afecta la fluidez por generación de calor (mayor cantidad de calor por disipar) durante la solidificación del metal y esto es un factor importante para la pieza, ya que el metal se mantiene líquido durante mayor tiempo, esto permite al metal fluir mas libremente dentro del molde, en este caso los metales aleantes tienen un efecto beneficioso en el metal que se cuele dentro del molde.<sup>(13)</sup>

Por otro lado, se ha determinado<sup>(12)</sup> que la máxima fluidez se presenta en el punto límite de máxima solubilidad sólida, mientras que los metales puros exhiben elevada fluidez y es aun mas extrema en el caso de composiciones eutécticas; lo anterior es válido, si los ensayos se realizan con un grado de sobrecalentamiento constante arriba de la temperatura del líquido. En un estudio de fluidez en un grupo de aleaciones de aluminio comparado con sus características de solidificación,<sup>(14)</sup> se encontro una relación directa entre la fluidez de las aleaciones y su rango de solidificación.

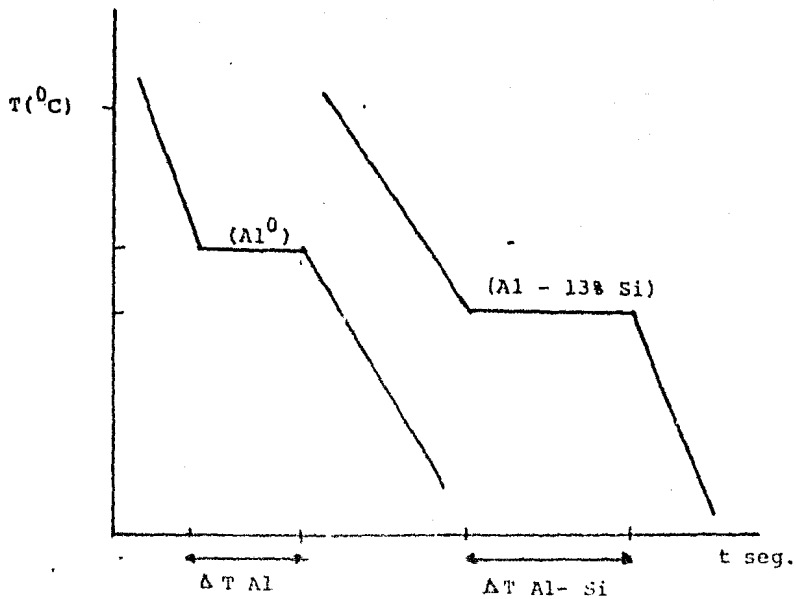


Fig. 3.4. Curvas de enfriamiento para Al puro y para Al - 13% Si.

### III.1.3. TENSION SUPERFICIAL DEL METAL LIQUIDO.

Al igual que cualquier líquido, los metales líquidos poseen también la propiedad de tensión superficial. Los átomos del metal ejercen entre sí fuerzas atractivas, estas fuerzas no están totalmente balanceadas en la superficie líquida, lo cual produce un estado de tensión. De acuerdo a la tensión superficial del metal líquido este se caracteriza por las 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 esto se encuentra 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 con metales líquidos. La tensión superficial puede de algún modo dar parte de la explicación del comportamiento de los metales en la fundición.

La tensión superficial en metales es alta, y tiene variaciones muy pequeñas por efecto de la temperatura.

Comúnmente es cierto que la viscosidad y tensión superficial de un metal líquido son factores raras e importantes que influyen en el comportamiento de la pieza colada. La tensión superficial puede afectar al flujo líquido que viaja a través del molde y por tanto a la fidelidad de reproducción de los contornos del molde. El efecto en la fluidez es pequeño, ya que la presión negativa debida a la tensión superficial del metal es solo una pequeña fracción de la cabeza metalostática usada en piezas comerciales. Una posible excepción se presenta en piezas de sección transversal muy pequeña, pero en general el flujo es detenido por la solidificación y por punto de mínima sección (área transversal) de una pieza no está determinada por la tensión superficial.

Por otro lado la tensión superficial afecta frecuentemente el control de la fidelidad de reproducción de la forma del molde y el acabado superficial de la pieza, estos efectos son

comunmente debidos a la relativamente alta "tensión superficial aparente" causada por la presencia de películas en la superficie del metal.

El efecto de la tensión superficial sobre la fluidez -- esta contenido en las siguientes ecuaciones.

$$v = \sqrt{\frac{2g (Z - Y)}{1 + K''}} \text{ cm/seg} \text{ ----- (7)}$$

$$Y = \frac{4\sigma}{R\delta g} \text{ ----- (8)}$$

Donde :

Y = cambio efectivo en la cabeza metalostática como resultado de la tensión superficial.

Z = Altura de la entrada del canal hacia la parte superior de la superficie libre de metal ( cm).

K'' = Factor adimensional que toma en cuenta las perdidas de cabeza en la entrada de del canal de flujo.

K'' Varía de 0.05 para radios grandes a la entrada a 0.8 para una esquina.

$\sigma$  = Tensión superficial (dina/cm)

R = Radio del tubo (cm)

$\delta$  = Densidad del metal

g = Aceleración debida a la gravedad

Ref. (11)

Estas ecuaciones predicen que cambios relativamente grandes en la tensión superficial no tiene efectos muy significativos en la fluidez cuando el canal de flujo y/o la cabeza del metal no son muy pequeños. En el fundido del acero, la fluidez estará significativamente afectada por la tensión superficial cuando el canal de flujo es menor de 0.2 cm. de diámetro y la cabeza del metal es menor de 8 cm. la fluidez aumenta linealmente en términos aproximados mientras la velocidad de flujo aumenta.

Estudios de la tensión superficial de metales líquidos han sido extensos y particularmente con respecto a constitución de aleaciones y el efecto de diferentes elementos solubles sobre la tensión superficial de un solvente dado. La tensión superficial de metales líquidos y los diagramas de composición binaria muestran que los valores de la tensión superficial caen suavemente sobre la totalidad del rango de composición en un sistema eutéctico simple, pero desviaciones de una curva ligera ocurre en algunos sistemas con fases intermetálicas. El efecto de metales solubles sobre un metal dado está mostrado en la figura 3.5



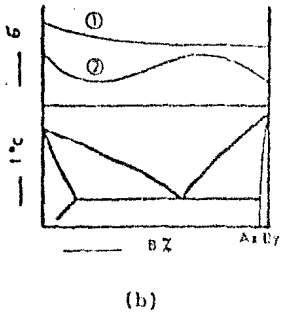
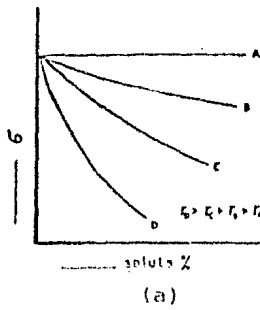


Fig. 3.5.a. Variación de la tensión superficial causada por elementos de diferente radio atómico  $r$ .  
 b) Variación de la tensión superficial de:  
 (1) Un sistema binario ideal y  
 (2) Un sistema binario no ideal.  
 Ref.(11)

### III.1.4. FORMACION DE INCLUSIONES NO METALICAS EN EL METAL LIQUIDO.

Las inclusiones no metálicas en las fundiciones pueden -- considerarse en dos grupos principales.

El primer grupo son las inclusiones "ENDOGENAS" las cuales son el producto de reaccionar en el interior del metal fundido estas son partículas relativamente pequeñas las cuales permanecen suspendidas en la aleación en el intervalo de la colada o las cuales pueden quizas ser precipitadas debido a cambios - en la solubilidad durante el sobreenfriamiento. Ellas pueden ser consideradas no como defectos en el sentido microscópico, pero si como un grado inherente y característico de la aleación y la práctica de la fusión. Estas partículas son normalmente dispersadas a lo largo de la fundición.

Las reacciones que forman inclusiones "endógenas" involucran impurezas comunes tales como el oxígeno, nitrógeno y azufre junto con con el constituyente metálico mas reactivo de la aleación. La reacción universal es la oxidación, sea incidental o deliberadamente buscada para refinación.

En el último caso el contenido final de oxígeno es normalmente establecido como óxidos insolubles por la adición de desoxidante antes de la colada.

Altos puntos de fusión de inclusiones de óxido pueden --- guardar su composición simple, pero escorias complejas pueden ser subsecuentemente formadas por reacciones heterogéneas en la intercara inclusión-metal.

El segundo grupo son las inclusiones "EXOGENAS" las cuales resultan de la entrada de partículas no metálicas durante la colada. Existe una amplia variedad en tamaños y tipos que abarcan escoria, basura y residuos formados y separados en el horno de fusión pero arrastrados junto con la corriente del metal otras fuentes son los fragmentos refractarios del horno y el revestimiento de la cuchara.

Un grupo de inclusiones " exógenas" son promovidos por el molde mismo, constituido de material de moldeo desalojado durante la colada o al final de esta.

las inclusiones "exógenas" pueden considerarse como defectos - específicos y tienden a concentrarse en ciertas regiones de la fundición.

Otras inclusiones resultan de la desviación en el equilibrio de fusión con caídas de temperatura. En las fundiciones la misma precipitación puede venir después de la segregación de elementos de impureza durante la solidificación.

Las inclusiones "endógenas" pueden minimizarse usando materiales de carga y condiciones de fusión limpias.

Muy bajos contenidos de inclusiones son realizados por fusión en vacío o en atmósferas inertes. Es posible en casos especiales desoxidar con carbono o hidrógeno para formar productos gaseosos en lugar de los precipitados normales. Tan pronto son formadas las inclusiones "endógenas" pueden eliminarse por separación gravimétrica, esta tendencia es expresada por la ley de Stokes para partículas pequeñas esféricas suspendidas en un medio líquido.

$$v = \frac{2}{9} \frac{r^2 g (\rho_1 - \rho_2)}{\mu} \text{-----} (9)$$

Donde :

v = velocidad de separación m/seg.

r = radio de la partícula m.

$\rho_1$  = densidad del líquido Kg/m<sup>3</sup>

$\rho_2$  = densidad de la partícula Kg/m<sup>3</sup>

$\mu$  = viscosidad del líquido

La exactitud de la predicción de esta expresión está limitada por otras influencias, pero el radio de la partícula ha sido el factor predominante en esta separación (fórmula-realidad), aquí las partículas grandes pueden separarse relativamente rápido permitiendo al metal fundido permanecer en el horno o en la cuchara, aunque la eliminación de las partículas más pequeñas no se puede llevar a cabo en tiempos cortos. La importancia del tamaño de partícula ha sido demostrada en la práctica de la desoxidación del acero, donde una combinación particular de manganeso y silicio, se encuentra en la relación 4:1

El efecto de las inclusiones no metálicas en el metal líquido (presencia de inclusiones), conduce a resultados erráticos en la medición de la fluidez, ya que durante el enfriamiento y solidificación de los metales líquidos, pueden precipitar algunas partículas no metálicas, esto es particularmente notorio en el caso de hieiros colados y aceros, por ejemplo la formación de inclusiones (silicatos de aluminio y silicio, sulfuros de manganeso y hierro, afectan la fluidez por obstrucción del flujo normal de metal líquido. 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 a iniciado la solidificación no altera sensiblemente la fluidez, ya que los cristales del sólido formado pueden tener una virtual y rápida detención del flujo. Pocas 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 líquido reducen notablemente la fluidez.

### III.1.5 FORMACION DE PELICULAS SUPERFICIALES DE OXIDO.

Algunas aleaciones bajo ciertas condiciones de atmósfera, composición y temperatura, pueden formar películas sólidas extremadamente frágiles, la presencia de estas películas puede parecer trivial ya que estas pueden ser confinadas a las esquinas de las piezas. En el transcurso del llenado de una pieza, la presencia de una película en la superficie metálica puede inhibir el flujo, esto es un factor que conduce a medidas inconsistentes de la fluidez, ya que las variaciones en las prácticas de fusión pueden resultar en la formación o ausencia de tales películas también puede ser gobernada por las condiciones del molde.

Los metales (aleaciones y metales puros), con tendencias a formar películas son particularmente susceptibles a defectos defectuosos (mala reproducción de la pieza), y a la formación de pliegues o arrugas, por tanto se necesitan cuidados especiales al diseñar el sistema de colada. Sin embargo, el efecto de las películas superficiales no es universalmente restrictivo al flujo, una película puede ejercer un efecto positivo durante el llenado, por ejemplo, en el caso de ciertas aleaciones de cobre la adición de fósforo incrementa la fluidez esto es parcialmente explicado por la formación de dichas películas superficiales. Ragone y otros autores consideran la naturaleza de las películas superficiales de óxido en un metal líquido y concluyeron que tenía un efecto significativo (bajo ciertas condiciones) en la fluidez. Las propiedades de las películas de óxido que deben ser consideradas son:

La fuerza total y el punto de fusión. Una película de óxido sólida como la que se forma en las aleaciones líquidas de aluminio, puede formar una envoltura continua con un alto valor de tensión superficial o puede ser descompuesta y mezclada con el metal que fluye y así actuar como un núcleo heterogéneo en la zona de ahogado (choking zone) las películas de óxido que son sólidas a la temperatura de vaciado del metal pueden aumentar significativamente la tensión superficial y reducir la habilidad del metal para llenar pequeños detalles

Utilizando un modelo de prueba de canal recto, Cooksey y otros autores encontrarón que la fluidez del latón 60-40 es disminuida por pequeñas adiciones de aluminio. Esto se atribuye a la fuerza de las películas de óxido sólido  $Al_2O_3$  que no pueden conjuntar una buena fluidez. En concentraciones menores del 0.15% de aluminio la película de óxido es probablemente incompleta o lo suficientemente débil como para ser rota por el flujo de metal.

### III.1.6. VISCOSIDAD DEL METAL LIQUIDO.

Tomando en cuenta la viscosidad del agua y el peso del metal en fase líquida, el peso del metal es mucho mayor que el del agua para un volumen dado, por tanto el metal líquido puede fluir mucho más rápidamente que el agua.

El cambio de viscosidad por efecto de la temperatura y de la composición no es muy grande en relación a las variaciones observadas en la fluidez de los metales.

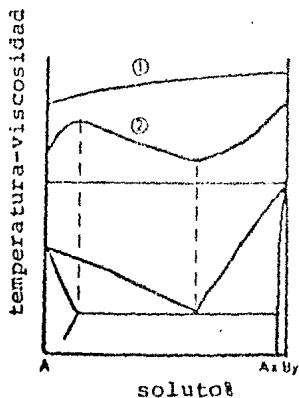


Fig. 3.6. Variación de la viscosidad :

- a) En un sistema binario ideal y
  - b) En un sistema binario no ideal
- Ref. (11)

Se ha determinado que la viscosidad real del metal líquido ya sea baja o del mismo orden que la del agua, no tiene un efecto marcado sobre la longitud de la fluidez y esta última es mas bien controlada por la cantidad de calor extraído desde el metal antes de iniciarse la primera formación de cristales en las paredes del molde y la velocidad a la cual el calor se extrae del molde.

El concepto de flujo viscoso esta basado en la relación de fuerzas externas que producen el movimiento de un líquido y las fuerzas que tienden a regresar el líquido desplazado a una posición de equilibrio como resultado de la fricción interna.

La viscosidad disminuye si la temperatura aumenta. De acuerdo con Korolko<sup>(11)</sup> esto es asociado con una erosión de la estructura del metal líquido y un debilitamiento de las fuerzas interatómicas de atracción. En aleaciones dos áreas de interés son importantes, la viscosidad sobre la línea líquidus y la viscosidad del agregado sólido/líquido bajo la línea líquidus.

El comportamiento de las aleaciones parece similar al de los metales puros sobre la línea líquidus pero una vez que se forma una pequeña fracción de partículas sólidas abajo de la línea líquidus, la viscosidad se incrementa.

Hablando practicamente esto significa que para fundir exitosamente una aleación con un detalle largo y delgado, el flujo de metal en el molde debe estar cercano o arriba de la temperatura del líquidus. El comportamiento de la viscosidad en un sistema de aleación binaria se puede apreciar en la figura 3.6.

### III.2. FACTORES RELATIVOS AL MOLDE

Aunque la fluidez puede solamente ser una propiedad que depende del metal, el flujo del metal bajo una presión de cabeza dada es también fuertemente influenciada por la naturaleza del molde.

Puesto que el flujo del metal es detenido por la solidificación, las condiciones del molde pueden afectar la duración del flujo ya sea directamente por medio de las propiedades térmicas o indirectamente por medio de la velocidad de flujo: si una fuerza restringente reduce esta velocidad, aumenta el tiempo para la pérdida de calor por unidad de longitud de la pared del pasaje causando la detención final, ocurriendo esta a una pequeña distancia. La razón de enfriamiento a la temperatura a la cual el flujo cesa es determinado por la difusividad de el material de moldeo.

#### III.2.1. HUMEDAD DEL MOLDE.

La fluidez como una función de la humedad de la arena no ha sido un factor al que se le haya dado mucha importancia en los trabajos publicados a la fecha. Dependiendo tanto de las condiciones experimentales usadas como del tipo de aleación -- investigada se puede decir en una forma muy general que la humedad de la arena sigue un comportamiento lineal con respecto a la fluidez .

El mecanismo de la eliminación de calor en molde durante la solidificación se lleva a cabo en dos etapas es decir que no muestra una rapidez de enfriamiento constante.

Las dos etapas que se presentan son las siguientes:  
ETAPA "A"

Estado de enfriamiento por medio de una capa de vapor.



En esta etapa, la temperatura del metal líquido es tan alta que el medio de enfriamiento (mezcla arena - humedad), el agua se vaporiza en la intercara formandose una película delgada y estable de vapor la cual rodea al metal caliente por tanto el enfriamiento se efectua por conducción y radiación a través de la película gaseosa y como las películas son pobres conductoras de calor, la rapidez de enfriamiento es relativamente -- lenta.

#### ETAPA "B"

Esta segunda etapa se inicia cuando la película de vapor ya no es estable, de tal forma que el metal humecta la pared del molde, provocando una ebullición del agua que a su vez favorece la generación de gases ( $H_2$ , vapor de agua, etc) en el molde, los cuales se disuelven en el metal líquido, en esta etapa el calor del metal se elimina rapidamente como calor latente de solidificación, lo que provoca al final de esta la detención del flujo metálico.

Analizando lo anterior, en la primera etapa la película de vapor podría actuar como un colchón que evita la fricción entre el metal y el molde, provocando un incremento en la fluidez del metal, la interrogante sería cuanto tiempo dura esta etapa y si este lapso de duración influye verdaderamente en el indice de fluidez, así como los parametros de los cuales depende esta etapa (masa del metal, temperatura de colada, area de contacto, etc.)

### III.2.2 COMPOSICION DEL MOLDE.

Esta variable puede afectar fuertemente la fluidez. Características tales como la capacidad térmica y superficie del molde ( tamaño de grano y % de aglutinante), alteran la habilidad de movimiento del flujo metálico. Las diversas composiciones de las mezclas de arena de moldeo determinan las propiedades mecánicas de la mezcla, como son la permeabilidad y la resistencias ( tracción, compresión, corte) las cuales en forma particular pueden afectar la fluidez. Algunos autores<sup>(12)</sup> han determinado que una variación normal en la humedad de la mezcla tiene influencias relativamente insignificante. El factor que afecta mas marcadamente la fluidez es la superficie del molde.

### III.2.3. CABEZA ESTÁTICA Y VELOCIDAD

La cabeza estática y la velocidad depende de las condiciones de la colada y de la rapidez de la colada. A mayor cabeza - estática ( H ), la velocidad del líquido ( ecuación 10)

$$v = \sqrt{2gh} \text{ -----(10)}$$

será mayor y por tanto la fluidez se incrementara, sin embargo cuando se aplica este concepto a llenado de moldes de arena, deben considerarse los factores de diseño de colada asi como las velocidades máximas de llenado tolerables para evitar atrapamiento de gases, arrastre de escoria, erosión de arena, etc. Por otra parte los ductos de venteo ( canales para la expulsión de aire del molde), son necesarias para evitar la contrapresión que retarda el flujo y produce una aparente pérdida de la fluidez cuando el metal penetra en el molde, debido a esto se necesita una rigida estandarización de las condiciones del molde para el ensayo de fluidez.

La cabeza de presión es el producto de la altura a la que es vaciado el metal, la densidad del metal y la aceleración debida a la gravedad. Así la cabeza de presión tiende a llenar el detalle (pieza) en el fondo del molde mas que en la parte de arriba del molde, es por esto que la cabeza de presión es considerada como una variable de molde.

Las dificultades experimentales se encuentran en el estudio de la cabeza de presión cuando los límites de la fluidez son dinámicos, las fluctuaciones en la cabeza de presión durante el vaciado pueden causar resultados de fluidez erráticos.

El problema primario en el vaciado es que al hacer la aplicación de la cabeza de presión mas consistente el control de temperaturas se vuelve mas difícil. Esto es porque los dispositivos utilizados son masivos relativamente en relación al peso de metal vaciado, la acción y la temperatura del metal es rápida y reproduciblemente disminuida en estas condiciones.

Kondic reporta que grandes errores debidos a la variación en la cabeza de presión durante el vaciado pueden ser evitados llenando la olla de colada con la cantidad exacta de metal a ser vaciado y luego vaciarla tan rapido como sea posible, utilizando esta técnica se encontro que la fluidez aproximadamente es una función lineal de la cabeza de presión. La cabeza de presión crítica es la cabeza mínima requerida para sobrepasar la tensión superficial. Si uno asume que el metal no moja el molde entonces la cabeza del metal crítica "z" puede ser calculada de la siguiente manera:

$$z'' = \frac{2 \sqrt{\sigma}}{R \rho g}$$

Donde:

$\sigma$  = tensión superficial (dina/cm)

R = radio del tubo (cm)

$\rho$  = densidad del metal ( $\text{gm/cm}^3$ )

$g$  = aceleración de la gravedad ( $\text{cm/seg}^2$ )

Flemings y otros autores estudiaron la fluidez del aluminio en unos tubos de vidrio de 0.18 cm. de diámetro utilizando la prueba de fluidez al vacío. la figura 3.7 es un resumen de la información en términos de fluidez vs cabeza de metal.

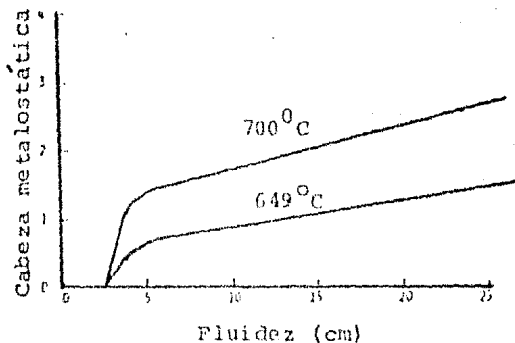


Fig.3.7 variación de la fluidez en función de la cabeza metalostática. Ref. (11)

### III.2.4. TEMPERATURA DEL MOLDE.

La temperatura del molde influye en la fluidez, ya que la velocidad a la cual el calor es removido del metal líquido -- afecta sobre el tiempo de solidificación del metal, lo cual da tiempo a que aumente el tiempo de vida del flujo de metal.

Variaciones normales de la temperatura de operación del molde tienen un efecto insignificante sobre la fluidez, sin embargo condiciones de diferentes temperaturas de molde fijadas (por ejemplo molde metálico) influyen considerablemente en el índice de fluidez. Se ha determinado que los factores que controlan la fluidez relacionada con las propiedades del molde, las determinan las prácticas normales de moldeo.

El elevar la temperatura del molde es una técnica que ayuda a llenar de una mejor manera el detalle en el molde. Dado - que el flujo de calor del metal al molde es una función de la diferencia de temperaturas entre el metal y el molde. El elevar la temperatura del molde incrementa la vida del fluido si otros factores se mantienen constantes, el elevar la temperatura del molde incrementará la fluidez de un material, cuando la elevación de la temperatura del molde es muy alta pueden existir -- grandes cambios en la tensión superficial. Para el hierro y para las aleaciones Fe - C la tensión superficial cambia solo - un pequeño porcentaje en relación a los cambios de temperatura de varios cientos de grados. El aluminio, zinc y aleaciones aluminio - zinc exhiben aproximadamente un 3% de disminución en la tensión superficial con un incremento de 100<sup>o</sup>c

### III.2.5. SUPERFICIE DEL MOLDE.

Se ha encontrado que si las superficies del molde son lisas la fluidez es mayor y viceversa, esto hecho se explica en base a que las fuerzas de fricción restringen el flujo en los canales debido a la rugosidad de la superficie del molde, la cual se relaciona al tamaño de grano del material de moldeo, - esto explica la preferencia por las arenas de grano fino.

Se ha encontrado que la fluidez se incrementa en moldes que poseen recubrimientos, esto puede ser usado para reducir la fricción al proveer una superficie lisa, el uso de recubrimientos reactivos también incrementa el flujo estas se diseñan para afectar las características de humectación de la intercara molde - metal.

Algunos autores reportan que gases implicados en moldes permeables retardan el flujo metálico. Por otro lado el hexa--cloroetano a sido usado como un recubrimiento reactivo, el cual genera cloro activo incrementando notoriamente la distancia de flujo para aleaciones de aluminio, esto induce a pensar que se inhibe la aparición de películas de óxido que restringen el --flujo. También la atmósfera creada por el molde puede ser un -factor importante, si la atmósfera es oxidante se favorece la formación de películas de óxido que disminuyen el flujo, mientras que atmósferas reductoras promueven el llenado del molde.

### III.2.6 .TAMANO Y FORMA DEL MOLDE.

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

La característica de tamaño y forma del molde de ensayo puede ser enfocado o relacionado a determinar la fluidez en piezas de una geometría dada, esta geometría sera un factor que depende exclusivamente de las características de diseño de la pieza y no pueden alterarse.

Segun (9) la fluidez esta limitada por el espesor de la pieza, para piezas coladas en arena este límite es alrededor de 1/8 de pulgada para aleaciones no ferrosas y de 1/4 de pulgada para aceros

#### IV. ENSAYO DE FLUIDEZ PROPUESTO.

El modelo utilizado para el ensayo de fluidez fue del tipo de canales rectos (tiras planas). El modelo original (fig. 2.7), fue modificado de tal manera que todos los canales rectos tuvieran el mismo espesor (2mm), se efectuó una reducción en el canal principal (escalonamiento del canal), de tal forma que se mantuviera el mismo gasto en los cuatro canales rectos que componen el modelo. Las dimensiones pueden apreciarse en la Fig. 4.1. El área transversal más pequeña se sitúa en la unión bañada-canal principal (o escalonado) de tal modo que nos permite controlar el gasto máximo permisible en este punto y mantener lleno de metal líquido el canal principal y el flujo metálico se repartiera por igual en todos los canales rectos. El espesor seleccionado (2mm) de los canales rectos, se determinó en base al modelo original y que además fuera sensible a las variaciones de humedad del molde utilizado (baja relación V/A).

#### V. DISEÑO DEL EXPERIMENTO.

El experimento se diseñó para manejar tres variables, las cuales fueron:

Temperatura de colada ( Tc )

Composición del metal ( C )

Humedad del molde ( H )

La variable Tc para las aleaciones ensayadas, fueron las siguientes:

$$Tc_1 = Tm + 25^{\circ}C$$

$$Tc_2 = Tm + 50^{\circ}C$$

$$Tc_3 = Tm + 75^{\circ}C$$



Donde:

T<sub>m</sub> es la temperatura de fusión del metal puro o la aleación ensayada.

Las composiciones ensayadas durante el experimento son:

Aluminio puro grado comercial

Aluminio - 5% Silicio y

Aluminio - 13% silicio ( composición eutectica )

H4 = Humedad al 4%

H6 = Humedad al 6%

H8 = Humedad al 8%

Las variables anteriores arrojan un total de 27 pruebas experimentales.

#### V.1. CONDICIONES EXPERIMENTALES.

Para evitar variaciones drásticas en las condiciones experimentales, se llevo a cabo el siguiente control en los materiales utilizados.

##### a) CONTROL DE ARENAS.

La técnica de preparación de arena en verde, fue la siguiente . Se utilizo un molino chileno de 3 Kg de capacidad, primeramente se agrego la arena con la mitad de agua correspondiente dandose 2 minutos de mezclado, despues de este lapso se detuvo el molino y se agrego la cantidad de bentonita correspondiente y se agrego la mitad del agua restante, despues de esta operación se dieron 3 minutos mas de mezclado. Se extrajo la arena del molino y se efectuó el control de propiedades, obteniendose los resultados que se muestran en la tabla numero V.1 .

los calculos para obtener la arena con la humedad deseada se muestran a continuación;

La capacidad del molino es de 3 Kg por tanto para preparar

la arena con la humedad deseada se siguieron los siguientes pasos:

LA BASE SECA ES DE 3 Kg.

% de arena

+ % de bentonita o aditivos

+ % de humedad

---

= 100%

Si la humedad de la arena es de 4% por ejemplo entonces tenemos lo siguiente:

4% de humedad =  $0.04 * 3000 = 120$  ml de agua

15% de arcilla =  $0.15 * 3000 = 450$  gr de arcilla

120 ml de agua + 450 gr de arcilla + x gr de arena = 3000  
por tanto la cantidad de arena es = 2430 gr

De la misma manera se calculo para para 6% y 8% de humedad

La arena utilizada fue número 90 AFS, con 15% de bentonita sodica, mezcla recomendada por la AFS para aluminio y aleaciones coladas en arena

#### b) TECNICA DE FUSION

La fusión se llevo a cabo en un horno eléctrico de resistencia con controlador - indicador de temperatura integrado - ( termopar cromel - alumel ). se utilizo un crisol de carburo de silicio (SiC). La técnica para el tratamiento del baño fue la siguiente:

Como cubierta protectora se utilizo una mezcla de sales, 50% KCl - 50% NaCl, la cual se adiciona poco a poco antes de fundirse la carga, una vez alcanzada la temperatura adecuada del

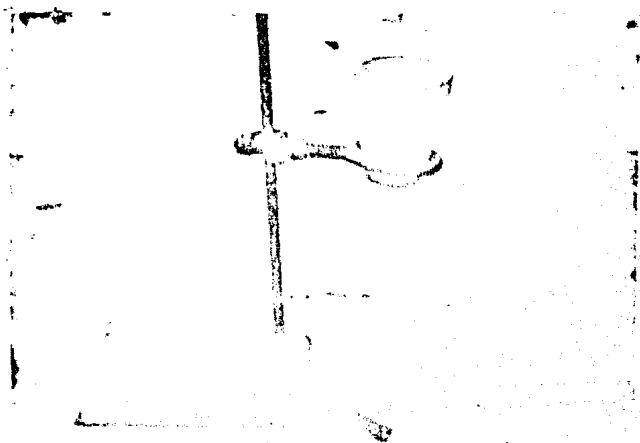
metal para la colada correspondiente, se desgasifica el baño líquido con desgasador 200 (Poseco - pastillas a base de hexa--cloroetano) en la cantidad indicada, cesada la reacción del desgasificador se dan aproximadamente 5 min. de reposo al baño antes de efectuar la colada. La preparación de las cargas fue la siguiente:

- a) Fusión directa de aluminio comercialmente puro para el ensayo con aluminio puro.
- b) Fusión directa de la aleación aluminio - 5% Si comercial.
- c) Balance de carga para la preparación de la aleación Al 13% Si (eutéctico), usando como material base -- Al- 5% Si y Al - 50% Si.

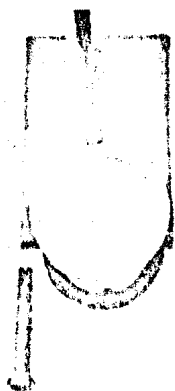
#### c) CONTROL DE LA CABEZA METALOSTÁTICA

Para evitar variaciones en la presión metalostática y causar modificaciones a la velocidad del flujo metálico, se utilizo un dispositivo en forma de olla de colada a una altura fija ( 15cm ) y con un diámetro fijo(7.5 mm ) para no alterar el gasto metálico que llega al molde (fotografía 1).

La olla de colada fue precalentada (aprox. 500 °c ) -- para evitar pérdidas grandes de temperatura al pasar el metal del crisol a la olla de colada. La temperatura de colada se -- tomo casi inmediatamente antes de la colada con un indicador de temperatura digital, integrado con una unidad térmica (termopar) cromel - alumel.



Fotografia. 1(a)



Fotografia 1(b)

Fotografias 1(a) Y 1(b). Dos vistas diferentes del sistema de control de velocidad y cabeza metalostatica utilizado para el ensayo de fluidez.

TABLA V.1

PROPIEDAD	48	68	88
PERMEABILIDAD (Psi)	42.2	43.5	34.3
RESISTENCIA A LA COMPRESION (Psi)	21.0	16.6	15.0
RESISTENCIA AL CORTE (Psi)	7.2	6.1	5.5
COMPACTABILIDAD (%)	53	52	60
MOLDEABILIDAD (%)	25	18.5	7.5
DENSIDAD (lb/ft <sup>3</sup> )	89.7	95.2	98.5
DUREZA(arbitraria)	87	91	84

El control de la arena se realizo en muestras ensayadas por triplicado. El resultado presentado aqui es un promedio de las tres muestras ensayadas.

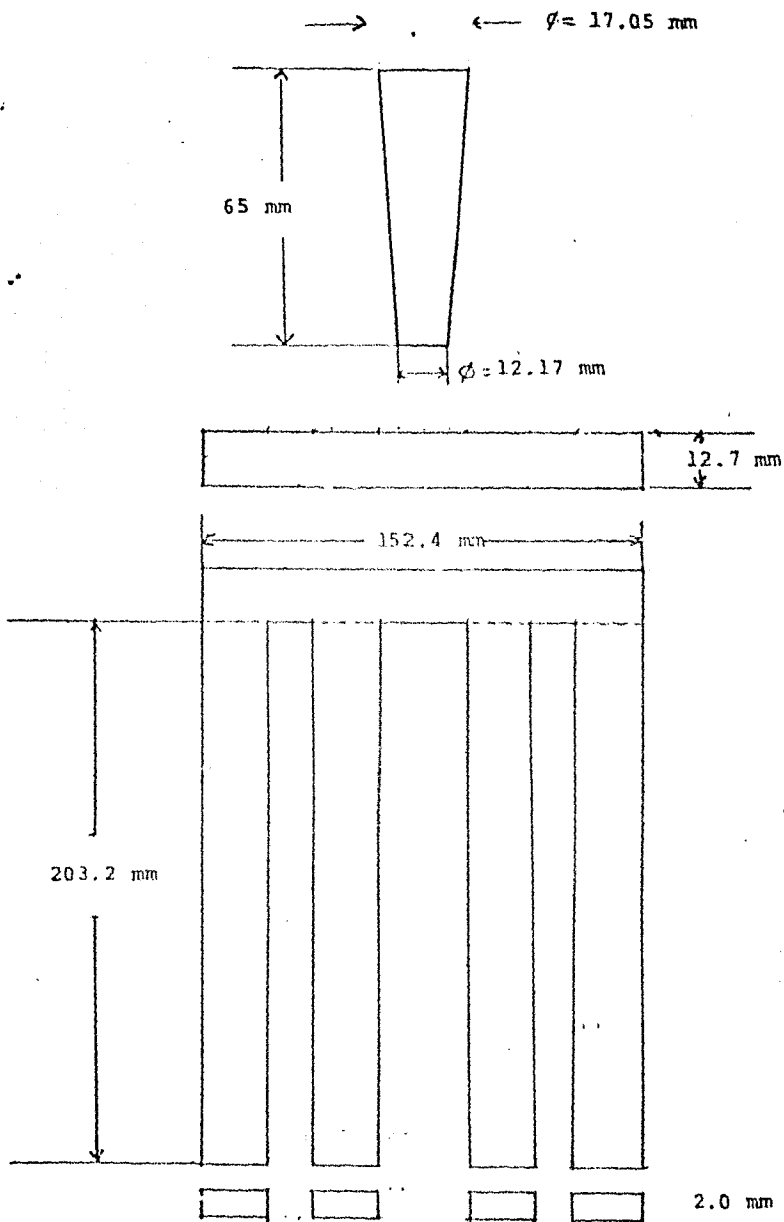


Fig. 4.1. Modelo corregido para el ensayo de fluidez

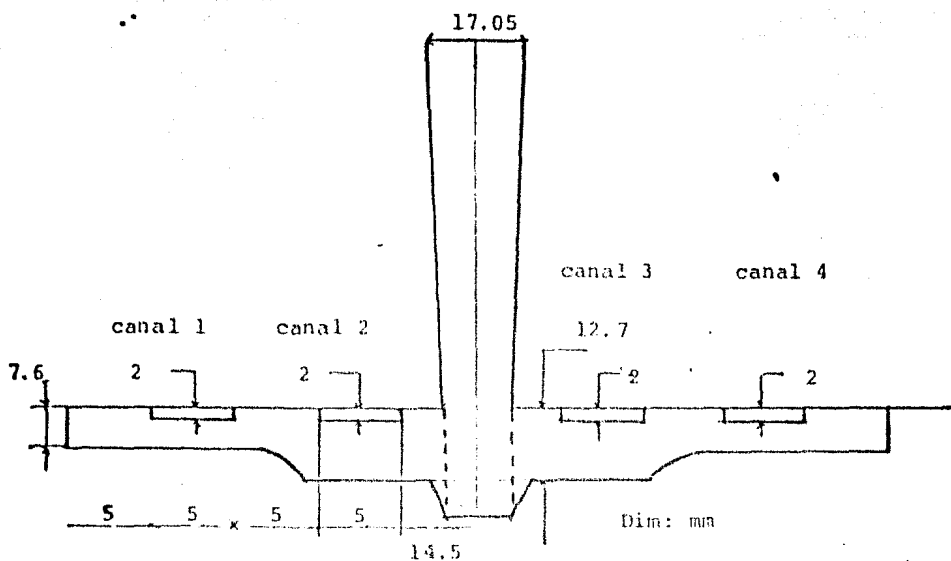
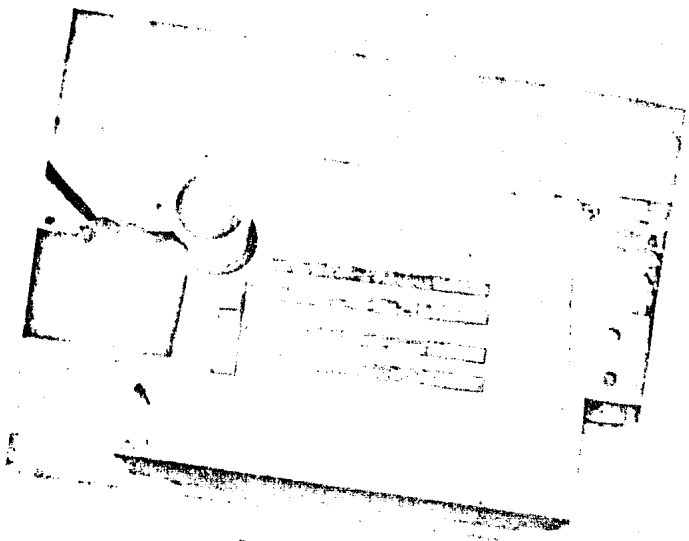
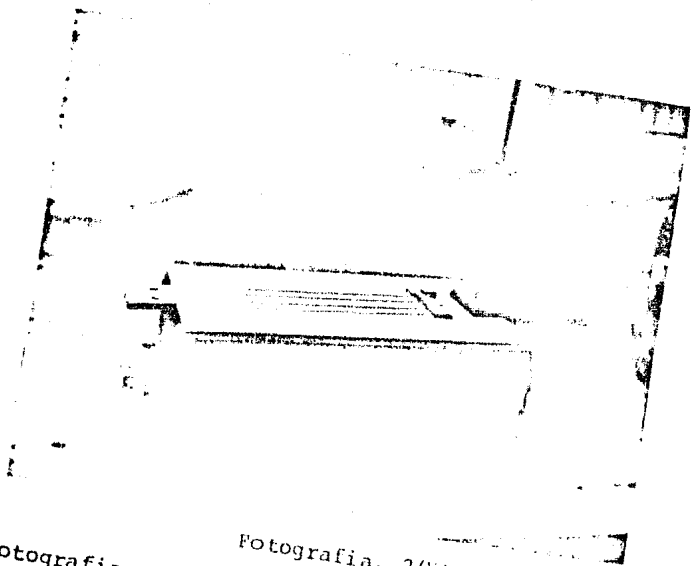


Fig. 4.2. Corte transversal del modelo corregido para el ensayo de fluidez.



Fotografía. 2(a)



Fotografía. 2(b)

Fotografías 2(a) y 2(b). Dos vistas diferentes del modelo corregido y el sistema de control de velocidad y cabeza metalostática utilizado para la prueba de fluidez.



## VI. PROCEDIMIENTO

El molde de arena se prepara por moldeo a mano, tratando de mantener la misma dureza obtenida en el control de la arena (90) durante el apisonado las cajas utilizadas fueron de -- 30 \* 45 \* 10/10 cms.

Se colocaron vientos al final de cada canal recto (orificios de diametro igual a 2 mm) para que el aire contenido en el molde no se opusiera al flujo metálico.

### VI.1 . RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados en cada una de las etapas del trabajo experimental. Las etapas experimentales fueron las siguientes:

a) Obtención de las piezas fundidas para la determinación de la fluidez

b) Medición de las longitudes de fluidez

c) Calculo del indice de fluidez

d) Graficas de temperatura vs. fluidez

Los resultados obtenidos se pueden apreciar en las gráficas 5.1 a, b, y c. Asi como en las tablas 1, 2 y 3.

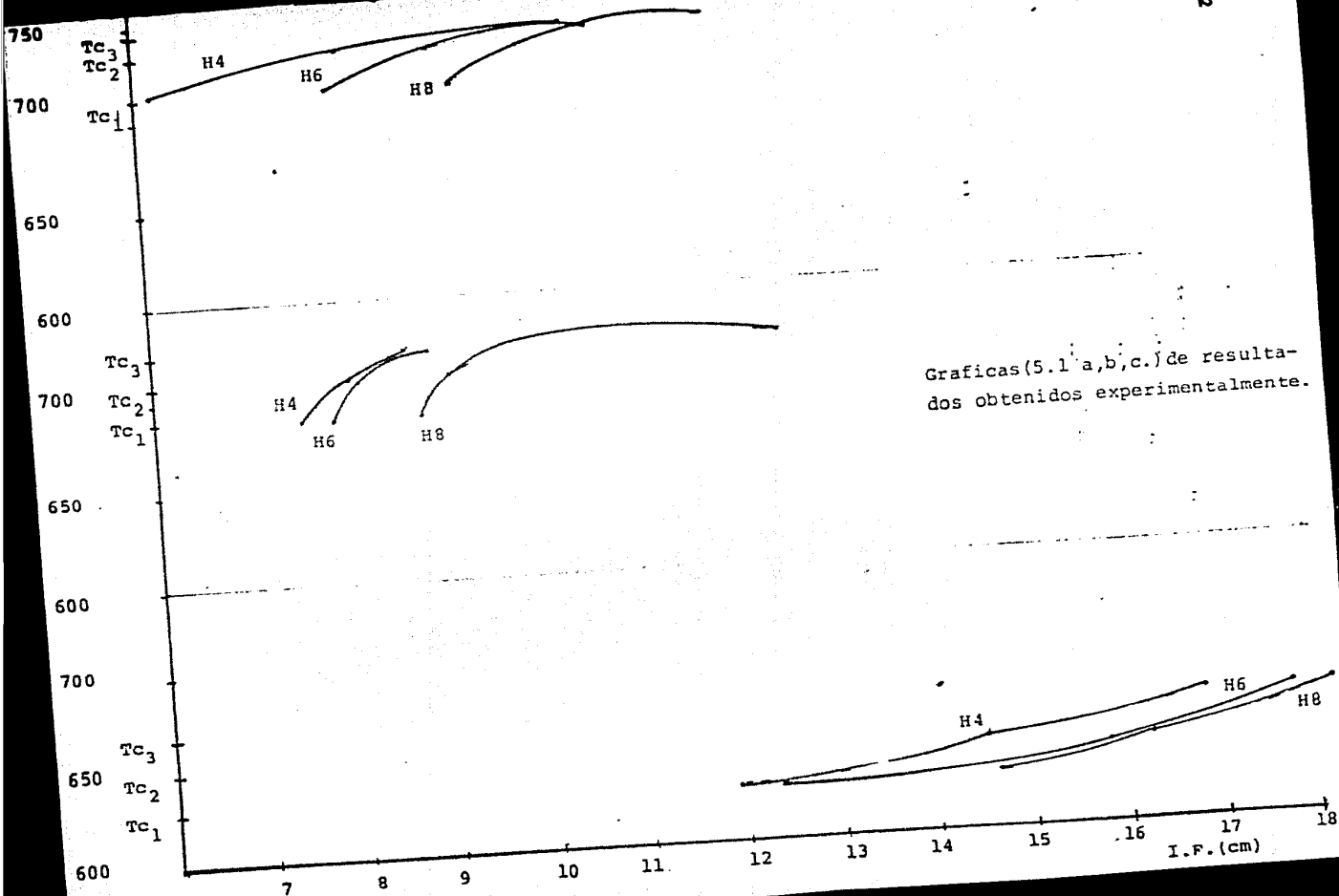


TABLA 1. Se muestra la longitud que fluyo la aleación 1 (100% Al), antes de solidificar.

HUMEDAD 4%					
TEMPERATURA DE VACIADO, °C	CANAL 1	CANAL 2	CANAL 3	CANAL 4	I.F
718	4.60	7.20	7.70	5.40	6.22 c
738	4.80	8.20	9.90	9.90	8.20 "
748	10.40	11.80	11.30	8.60	10.52"

HUMEDAD 6%					
TEMPERATURA DE VACIADO, °C	CANAL 1	CANAL 2	CANAL 3	CANAL 4	I.F
718	8.70	8.80	7.80	6.60	7.97 c
738	11.90	9.20	9.20	6.50	9.20 "
748	12.60	12.40	9.60	8.60	10.80 "

HUMEDAD 8%					
TEMPERATURA DE VACIADO, °C	CANAL 1	CANAL 2	CANAL 3	CANAL 4	I.F
718	7.20	7.70	12.20	10.40	9.30 c
738	10.0	11.50	10.50	8.50	10.12 "
748	8.30	13.70	14.70	12.00	12.17 "

TABLA 2. Se muestra la longitud que fluyo la aleación 2 ( Al - 5% Si ) , antes de solidificar

HUMEDAD 4%					
TEMPERATURA DE VACIADO, °C	CANAL 1	CANAL 2	CANAL 3	CANAL 4	I.F
690	7.10	8.80	9.20	4.90	7.50 cm
710	7.60	8.40	10.80	6.00	8.20
725	7.20	9.20	10.50	7.80	8.67

HUMEDAD 6%					
TEMPERATURA DE VACIADO, °C	CANAL 1	CANAL 2	CANAL 3	CANAL 4	I.F
690	8.50	11.10	5.72	6.00	7.83 cm
710	5.20	10.70	9.90	7.30	8.27 "
725	8.80	9.40	11.90	5.50	8.90 "

HUMEDAD 8%					
TEMPERATURA DE VACIADO, °C	CANAL 1	CANAL 2	CANAL 3	CANAL 4	I.F
690	10.10	8.60	12.20	4.30	8.80 cm
710	7.10	10.00	10.40	10.60	9.52 "
725	11.40	13.90	13.70	11.50	12.62 "

Tabla 3. Se muestra la longitud que fluyo la aleación 3 (Al - 13% Si ), antes de solidificar

HUMEDAD 4%					
TEMPERATURA DE VACIADO, °C	CANAL 1	CANAL 2	CANAL 3	CANAL 4	I.F
630	11.30	12.70	11.40	12.28	11.92
650	13.70	17.90	16.10	10.30	14.50
670	18.60	17.80	18.10	12.90	16.85

HUMEDAD 6%					
TEMPERATURA DE VACIADO, °C	CANAL 1	CANAL 2	CANAL 3	CANAL 4	I.F
630	12.40	15.40	14.80	6.80	12.35
650	15.20	17.10	19.00	12.00	15.82
670	16.80	17.50	19.00	18.00	17.82

HUMEDAD 8%					
TEMPERATURA DE VACIADO, °C	CANAL 1	CANAL 2	CANAL 3	CANAL 4	I.F
630	11.80	18.20	17.60	11.40	14.75
650	13.70	14.60	18.40	18.38	16.27
670	17.00	19.20	21.00	15.00	18.03

## VII. DISCUSION DE RESULTADOS

Considerando los resultados experimentales se puede argumentar lo siguiente para explicarlos:

a) Respecto a la temperatura de colada, los resultados estuvieron de acuerdo a otros experimentos reportados, esto se explica en base al contenido de calor dado para una aleación - como función de su temperatura de colada, es decir cuanto mas alto es la temperatura de colada, el contenido calorífico en esa masa metálica líquida sera mayor, y mas tiempo tardara en ser disipado, por tanto el metal líquido tiene un período mas largo de vida en estado líquido lo que se manifiesta como un mayor índice de fluidez.

b) Los resultados obtenidos por influencia de la composición química, parecen contraponerse con los reportados en otros estudios para aleaciones de rango de solidificación largo es decir, para el aluminio puro y la aleación eutectica el comportamiento cualitativo concuerda ( elevada fluidez ) pero para la aleación Al - 5% Si no es así. La explicación de este resultado que va en desacuerdo con la literatura, se puede argumentar desde varios puntos de vista:

Primero, si se considera que la aleación se comporta como de rango corto de solidificación, teóricamente y de acuerdo a su mecanismo de solidificación, debiera tener un índice de fluidez menor que que el aluminio puro y la aleación eutectica, ya que su solidificación procedería probablemente con una intercara facetada y dendrítica lo que disminuiría fuertemente la fluidez.

Segundo, enfocada desde el punto de vista del contenido calórico de la aleación, el calor latente involucrado durante la transformación líquido - sólido esta dado por la combinación de los calores latentes de los elementos aleantes  $L_m(\text{Al})=95 \text{ cal/g}$  y  $L_m(\text{Si}) = 350 \text{ cal/g}$ . Como una función de las cantidades proporcionales de cada uno en la aleación, si el calor latente de la mezcla supera en buena medida al del aluminio, entonces esto

podría ser una explicación para los resultados obtenidos es decir la mayor fluidez de la aleación Al - 5% Si respecto a la de aluminio puro probablemente se debiera a que el calor liberado durante la transformación líquido - sólido es mayor para la aleación que para el aluminio, por tanto se ocasiona un período de vida mas largo del metal líquido para la aleación disminuyéndose por este concepto la influencia del mecanismo de solidificación.

Tercero, tomando en cuenta la clasificación de Schmidt (12) para los rangos de solidificación de aleaciones de cobre la cual nos dice que el  $AT = T_{liq} - T_{sol}$  ( rango de solidificación), para el caso de metales con rango de solidificación corto  $AT < 50^{\circ}C$ , rango intermedio  $50^{\circ}C < AT < 117^{\circ}C$  y rango largo  $AT = 117$  a  $167^{\circ}C$ . Siendo AT para la aleación Al - 5% Si de aproximadamente  $50,5^{\circ}C$ , esta probablemente se comporta como una aleación de rango intermedio y quizas debido al calor latente de cristalización de la mezcla por la influencia del silicio haya probablemente una fuerte tendencia a comportarse como de corto rango de solidificación

c) Respecto a la humedad de la arena, los resultados obtenidos concuerdan con los mecanismos de eliminación de calor detallados en la sección III.2.1, es decir que el comportamiento lineal (a mayor humedad mayor fluidez), Aunque una excesiva humedad en moldes de mezclas de arena en verde, pueden causar marcados defectos en las piezas coladas, a esta causa se atribuyen por ejemplo las sopladuras, llenados incompletos, porosidades finas en forma de cabeza de alfiler (pinholes), rechupes y expansión del molde (shrink and oversive casting), etc. En cierta medida esto se explica en base a que elevadas humedades en las arenas de moldeo producen una tendencia a enfriar violenta y rapidamente (templar) el metal líquido evitando que este fluya a lo largo de toda la cavidad del molde.

### VIII. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos podemos concluir que el índice de fluidez es afectado de una manera determinante por los siguientes factores:

- a) Sobrecalentamiento (a mayor temperatura de colada mayor índice de fluidez)
- b) Rango de solidificación (Cuando la aleación es de rango corto p.ej. Aluminio puro y Al-13%Si, el I.F. es grande y cuando la aleación es de rango largo p.ej. Al-5%Si, el I.F. es pequeño)
- c) Temperatura del molde (a mayor temperatura del molde mayor I.F.)

También se puede observar que factores como tipo de material del molde, humedad del molde y cabeza metalostática necesitan una mayor atención en cuanto a pruebas experimentales ya que los estudios realizados a la fecha no han prestado mucha atención a estos factores los cuales pueden afectar de una manera importante el I.F.

Con respecto a la tensión superficial, viscosidad del metal líquido, películas superficiales de óxido y mezcla del molde estos parámetros parecen no ser tan importantes para las condiciones que se presentan en la práctica de la fundición.

En cuanto al modelo corregido se concluyó que este (modelo) presenta una buena reproducibilidad en la práctica, además que muestra una repartición de flujo bastante regular en cada uno de los canales.



## RECOMENDACION PARA TRABAJOS POSTERIORES

- 1) En trabajos futuros se podría estudiar el efecto de refinadores de grano así como modificadores del tamaño de grano en la olla de colada (antes de colar)
- 2) En el presente trabajo se usó Aluminio y aleaciones de Al-Si se recomienda repetir este trabajo con otros tipos de metales y sus respectivas aleaciones p.ejem. Cu, Ni, Zn, Fe, etc.
- 3) Se podría estudiar también diversos tipos de factores relativos al molde como pueden ser la cabeza metalostática, material del molde (metal, cera perdida, shell, etc.) y la relación  $V/A$  de los canales del modelo (tiras).

## BIBLIOGRAFIA.

- (1).-Kondic, V. "Experimenting with the measurement of fluidity in the casting of metals". Metals and materials. Octubre 1972; 440-441.
- (2).-Beeley, P.R. Foundry technology. Butterworths. Capítulo 1.
- (3).-Ragone, D.V. et al. Trans. A.F.S., 1956, vol.64, p.640
- (4).-Flemings, M.C. "Fluidity of metals- Techniques for producing ultra-thin section castings", The British Foundryman., - julio 1964, p. 312-324.
- (5).-C.J. Cooksey et al. " The casting fluidity of some foundry Alloys", The British Foundryman., Septiembre 1959, p. 381-386.
- (6).-Kondic, V. " The Effect of liquid metal properties on the casting Casting Fluidity of Alloys", Proc. Inst. Brit. Foundry man., 1950, vol. 43, p. A152-A157.
- (7).-Applying Metallurgical Principles. Aluminium Alloys, Part. 2, Modern casting, Sep. 1984, p.36.
- (8).-D.G. Smidt Gating of cooper Alloys, A.F.S. Trans. 1980 v. 88, p. 805-812.
- (9).-Flemings, M.C. Solidification processing. McGraw-Hill. capitulos 1 y 7.
- (10).-L.E. Mondolfo. Aluminium Alloys, Structure and properties Butterworths 1976.
- (11).-J.A. Capadona Review of Fluidity testing As Applied to - Lost-Polystyrene Investment casting, Trans. A.F.S. 1978, p.43-53.

(12).-L.F. Porter and P.C. Rosenthal "Factors Affecting Fluidity of cast Iron", Trans. A.F.S. vol 60, p.725 (1952).

(13).-Ignacio Alfaro Abreu. "Principales conceptos de la teoria del moldeo". Revista fundición, Enero 1978, vol 209, p.19-27.

(14).-Portévin A.M. and Bastien V. Inst. Metals, 54,55(1954)