

24/17



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Facultad de Química



EXAMEN DE TITULACION  
FACULTAD DE QUIMICA

## CALCULO DE FACTORES DE PERDIDA DE VELOCIDAD POR FRICCION EN SISTEMAS DE COLADA

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO QUIMICO METALURGICO  
P R E S E N T A :  
JOSE ANTONIO SANCHEZ ESTRADA



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **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.

# I N D I C E .

	PAG.
INTRODUCCION	1
GENERALIDADES	
CAPITULO 1.-SISTEMAS DE COLADA O LLENADO.	
1.1    CONCEPTO	3
1.2    ELEMENTOS O COMPONENTES	5
1.3    CLASIFICACION DEL SISTEMA DE COLADA	9
CAPITULO 2.-FUNDAMENTACION TEORICA.	
2.1    LA HIDRAULICA EN LOS SISTEMAS DE LLENADO	12
2.2    LOS PROBLEMAS HIDRAULICOS EN LOS SISTEMAS DE LLENADO	13
2.3    DINAMICA DE FLUIDOS EN SISTEMAS DE LLENADO POR GRAVEDAD Y COLADA EN ARENA	15
2.3A    COPA DE COLADA	18
2.3B    SISTEMA CON COPA DE COLADA Y CANAL VERTICAL	21
2.3C    SISTEMA COPA DE COLADA, CANAL VERTICAL Y CANAL HORIZONTAL	23
2.3D    SISTEMA COPA DE COLADA, CANAL VERTICAL, CANAL HORIZONTAL Y ENTRADA	25
2.3E    RELACION HIDRAULICA DE LA VELOCIDAD DE FLUJO Y EL TIEMPO DE LLENADO DEL MOLDE	27
PARTE EXPERIMENTAL	
CAPITULO 3.-DESARROLLO EXPERIMENTAL	
3.1    ELABORACION DEL MODELO Y SISTEMA DE COLADA	28
3.2    CONTROL DE ARENAS	31

	PAG.
3.2A CARTAS DE CONTROL DE PROPIEDADES DE ARENAS	35
3.3 TECNICA DE FUSION	44
3.3A PREPARACION DE LA ARENA DE CAREO	44
3.3B PREPARACION DE LA ARENA DE RELLENO	44
3.4 CALCULO TEORICO DEL FACTOR DE PERDIDA DE VELOCIDAD POR FRICCION	47
3.5 CALCULO EXPERIMENTAL DEL FACTOR DE PERDIDA DE VELOCIDAD POR FRICCION	50
3.6 GRAFICAS	52
COMENTARIOS	55
CONCLUSIONES	58
BIBLIOGRAFIA	60

## INTRODUCCION.

Los diseños y dimensiones de los elementos de llenado en la producción de piezas coladas, es uno de los más importantes campos en donde todavía sobrevive el método empírico, la habilidad y la experiencia dentro de la fundición y en donde los métodos experimentales son por naturaleza difíciles, es por ésto que el desarrollo de la hidráulica en fluidos metálicos ha sido mínima.

El presente trabajo, tiene su origen en la necesidad de recurrir a un método experimental eficiente, accesible y confiable, que nos permita contribuir con mayor información para la práctica de los sistemas de llenado, apoyándose en fundamentos teóricos en donde la hidráulica juega un papel muy importante para el calculo de factores de perdida de velocidad por fricción en sistemas de colada.

El primer capítulo, está destinado al estudio de los sistemas de llenado, en donde se plantea su utilidad y las características que deben de reunir cada uno de los componentes del sistema para que se cumpla con las necesidades del llenado del molde y se obtenga una pieza colada de buena calidad.

El segundo capítulo, contiene el fundamento teórico del trabajo y en él se dan las consideraciones hidráulicas y metalúrgicas accesibles y pertinentes para la elaboración de un modelo matemático aplicable a los sistemas de llenado.

El desarrollo experimental queda contenido en el capítu-

lo tercero, donde se mencionan las condiciones experimentales requeridas, así como la forma en la cual se experimentó. Dentro de este mismo capítulo, se incluyen las tablas de datos y resultados obtenidos, así como las gráficas correspondientes.

Finalmente se concluye en base a los resultados obtenidos.

## GENERALIDADES

## CAPITULO 1

### SISTEMAS DE COLADA O LLENADO

### 1.1. CONCEPTO.

El sistema de colada o llenado, es un sistema de canales por el cual el metal líquido fluye hasta la cavidad del molde.

Metalúrgicamente hablando, un sistema de llenado podría mantener la calidad del metal durante el flujo, evitando su oxidación, además de la entrada de gas, escoria y material del molde. Sin embargo ésto no es su único propósito, sino que además tiene las siguientes funciones.

- Que sea fácil la colada a los moldes con el equipo con que se disponga la fundición para esta operación.
- Llenar el molde en un tiempo adecuado, sin interrupciones en la colada y sin excesivo sobrecalentamiento del metal.
- Transformar en el menor tiempo posible el flujo turbulento de los instantes iniciales de la colada en flujo laminar, con velocidades tales que no erosionen las paredes de la cavidad del molde.
- Ayudar a la obtención de gradientes térmicos adecuados para lograr la solidificación direccional de las piezas fundidas.

Estas son las principales razones de el desarrollo y uso de diferentes sistemas de llenado, para el diseño de colada y sus procesos, además de los diferentes métodos de producción y moldeo.

En resumen, la calidad de las piezas coladas depende en

gran medida del sistema de colada o llenado y entre los defectos comunes que aparecen en las piezas por un mal diseño en el sistema de llenado, ya sea por su dimensionamiento o la falta de alguno de sus elementos, podremos citar: zonas calientes, penetraciones de arena, erosión del molde, arrastre de escoria y suciedad, movimiento de corazones, etc.

## 1.2. ELEMENTOS O COMPONENTES.

Un sistema de llenado comprende ciertos elementos básicos, como se muestra en la figura 1.

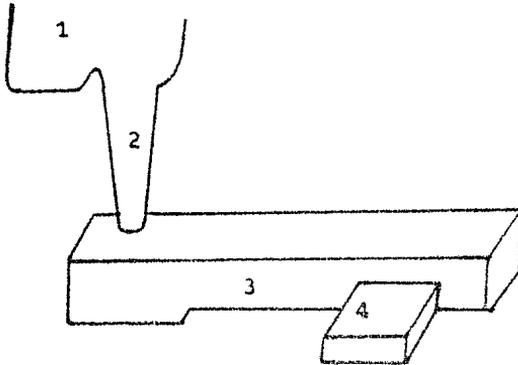


fig. 1

- 1.- Bebedero o copa de colada
- 2.- Bajada cónica o canal vertical
- 3.- Canal horizontal
- 4.- Entrada

1.- El bebedero o copa de colada es un recipiente o canal de llenado que se ubica en la parte superior del molde, unida con la parte superior de la bajada o canal vertical, es la primera parte del sistema de llenado el cual entra en contacto con el metal líquido y lo conduce dentro de la cavidad del molde. Esta copa debe cumplir con los siguientes requisitos.

- Debe tener un tamaño adecuado en relación al diámetro de la bajada, de tal manera que pueda llenarse fácilmente durante la colada.
- Tener suficiente profundidad para prevenir salpicaduras y disminuir las turbulencias en la etapa inicial de llenado.
- Deben estar situados en un área de la caja de moldeo, de tal manera que pueda ser vista y alcanzada por el operador de la olla de colada.
- Promover la entrada del metal limpio a la siguiente parte del sistema de llenado.
- Tener una forma adecuada para prevenir la posible erosión durante la colada.

2.- El siguiente componente, llamado bajada o canal vertical, es un pasaje a través del cual el metal líquido entra al canal horizontal, está situado entre la copa de colada y el canal horizontal, al igual que la copa de colada debe cumplir con ciertos requisitos.

- El efecto y el flujo de metal líquido debe ser controlado por un diseño apropiado de la bajada.
- La bajada debe tener una cierta conicidad de tal modo que elimine la probabilidad de que aire o gases provenientes del molde, sean introducidos a través del flujo metálico hasta la cavidad del molde.
- La altura de la bajada no debe ser demasiado grande de acuerdo al tamaño de la pieza colada, para evitar el flujo

turbulento en el chorro del metal líquido.

- La bajada debe llenarse lo mas rápidamente posible y conservarse totalmente llena durante la colada.
  - La menor área transversal en la unión con el canal horizontal, crea una reducción de tal modo que se disminuye la velocidad, minimizando por tanto la turbulencia y reduciendo la posibilidad de erosión del molde y arrastre de aire y gases, dando oportunidad a que la escoria que pudo haber entrado flote y quede atrapada en el canal horizontal.
- 3.- El canal horizontal es un canal dispuesto en el plano horizontal de la línea de partición, es un ducto a través del cual el metal líquido fluye a la(s) entrada(s). Está situado entre el canal vertical y la(s) entrada(s), al igual que los anteriores debe cumplir con ciertos requisitos:
- Actuar normalmente como una trampa de escoria.
  - Tener un diseño tal que provea un flujo uniforme y tranquilo a la(s) entrada(s), si está dividido o ramificado en más de un canal, los gastos por éstos deben ser iguales, si está unido con más de una entrada el gasto debe ser igual a todas.
  - De preferencia deben ser adicionados a éste, accesorios que disminuyan la energía cinética del flujo metálico proveniente del canal vertical y evitar de este modo la erosión de los canales y dar tiempo suficiente a que flote la

escoria.

- 4.- El último componente del sistema de llenado de molde de fundición, es llamado arbitrariamente entrada y es un ducto que tiene acceso directo a la cavidad que conformará a la pieza, generalmente es un pasaje de corta longitud, conectado al canal y la cavidad del molde, debe tener también ciertas características las cuales son:
- Tener un diseño tal que, el flujo metálico llegue tranquilamente a la cavidad del molde.
  - Tener un tamaño adecuado de tal modo que el metal no solidifique prematuramente y se llene totalmente la cavidad del molde.
  - Tener una apropiada localización para asegurar una velocidad lenta dentro de la cavidad del molde.
  - Facilidad para ser retiradas de la pieza sin ocasionarle daño a ésta.

### 1.3. CLASIFICACION DEL SISTEMA DE COLADA

Según la A.F.S. se pueden clasificar en dos tipos:

- 1.- Sistemas de colada horizontales (Fig. 1)
- 2.- Sistemas de colada verticales (Fig. 2)

En los sistemas de colada horizontales, los canales de llenado están orientados en el plano horizontal respecto a la línea de partición del molde, o sea mantiene un nivel horizontal con ésta, este tipo de sistema de colada es el más utilizado en la manufactura de piezas coladas de mediano y pequeño tamaño, obtenidas por moldeo de arena en verde.

Los sistemas de colada vertical, como su nombre lo indica, los canales de llenado del molde, están orientados en un plano vertical respecto a la línea de partición del molde, en vez del lineamiento horizontal del anterior. Esta técnica es comúnmente utilizada en moldeo por cáscara (Shell), moldes permanentes y en algunos de arena.

A su vez éstos podrán adoptar el sistema de colada que se describe a continuación:

- a) Sistema de colada con flujo controlado en el canal/entrada(s). Son aquellos en los cuales la estrangulación (área mínima de su sección transversal), se encuentra en la(s) entrada(s) que comunica con la cavidad principal del molde y con una velocidad correspondiente a la presión metalostática de vaciado total, desde la altura del labio de la

- olla de colada hasta el extremo final de la(s) entrada(s).
- b) Sistema de colada con flujo controlado en la bajada/canal. Son aquellos cuya área transversal más pequeña está en la unión de la bajada con el canal de colada. La velocidad de flujo del metal a través de las entradas dependerá de la estrangulación (al menos inicialmente). Será menor en un sistema de colada con flujo controlado en el canal/entrada(s) de igual estrangulación.
- c) Sistemas de colada híbridos. Estos incorporan algunas características de diseño de los sistemas de control bajada/canal y canal/entrada(s). El ejemplo más simple del sistema de colada híbrido es aquel en el que, el área total de la sección transversal de la(s) entrada(s) es más grande que la estrangulación en la bajada, pero debido a lo relativamente alto de la bajada la(s) entrada(s) sigue(n) controlando el flujo.

En realidad los sistemas de colada con flujo controlado en el canal/entrada(s) se prefiere en la mayoría de los casos ya que suministran una mayor protección contra la escoria en el periodo inicial de colada (que es por cierto el instante más crítico en la operación de llenado de un molde) y como regla son más favorables para producir piezas coladas de aceptable calidad.

Los sistemas de colada con flujo controlado en la bajada/canal, son más grandes y por tanto, son más difíciles de co-

locar y remover. Sólo se recomienda la utilización de estos sistemas en los siguientes casos:

- \_ Cuando la línea de partición del molde es vertical (sistemas de colada verticales).
- \_ Cuando se fabrica un gran número de piezas pequeñas colocadas en un solo molde.
- \_ Cuando las entradas deben ramificarse hacia el centro de un canal redondo.

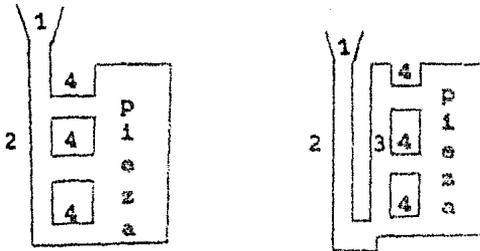


fig.2. Sistemas de colada vertical

CAPITULO 2.

FUNDAMENTACION TEORICA

## 2.1. LA HIDRAULICA EN LOS SISTEMAS DE LLENADO.

Los sistemas de canales utilizados en fundición no se encuentran normalmente dentro de las aplicaciones de la hidráulica y solo algunos aspectos de los tratados teóricos y datos prácticos sobre lo más complejo de sistemas de llenado están dados en los libros de texto. La hidráulica en los sistemas simples consta de dos o tres elementos patrón que son fácilmente tratables a conceptos teóricos, pero considerablemente difíciles para sistemas de llenado complejos o múltiples.

Una parte esencial en la aplicación del estudio de la hidráulica en los sistemas de llenado es el cálculo de la velocidad del metal, la presión y la energía perdida en el sistema (usando los datos disponibles tanto de las propiedades de los líquidos como de las dimensiones y forma de los canales). Los cambios de energía por el trabajo externo, para un sistema de comportamiento ideal y su efectividad se determinan experimentalmente. Las ecuaciones para un flujo ideal son transformadas de tal manera que se pueda obtener una relación de flujo empírica aplicable a determinados problemas dentro de un sistema de llenado.

## 2.2. LOS PROBLEMAS HIDRAULICOS EN LOS SISTEMAS DE LLENADO

Las relaciones hidráulicas de llenado tratan con tres cantidades básicas que son:

- a) La velocidad ( $v$ ).
- b) La presión ( $p$ ) en un punto determinado dentro del sistema de flujo.
- c) La distribución del flujo en los múltiples elementos del sistema de llenado.

La velocidad del flujo se define en orden al cálculo del tiempo del llenado del molde.

La necesidad de conocer la presión de distribución en un sistema de llenado se usa por dos razones. Primero, si la presión de una sección dada en un sistema de llenado es por debajo a la atmosférica, entonces existe el riesgo de que el chorro líquido arrastre aire o gas del mismo molde al interior, lo cual podría dañar la calidad del metal. Segundo, para algunas aleaciones es esencial que la presión y la velocidad dentro del sistema de canales deba ser tan baja como sea posible y así reducir la turbulencia y la agitación evitando causar deterioros en la calidad de la pieza terminada.

El valor de los datos en la distribución del metal en un sistema de llenado múltiple se relaciona con la solidificación de la pieza colada. Dependiendo del diseño de la pieza y su proceso de colada, es frecuentemente deseable que una pie-

za colada pudiera solidificar en una dirección selectiva. Para alcanzar ésto, el metal deberá entrar al molde por las secciones a las velocidades requeridas.

### 2.3. DINAMICA DE FLUIDOS EN SISTEMAS DE LLENADO POR GRAVEDAD Y COLADA EN ARENA.

Como se definió anteriormente, los sistemas de llenado \_ usados para coladas en arena pueden ser sistemas horizontales o verticales. Solo serán considerados los sistemas horizontales. Estos normalmente contienen uno o más de los siguientes elementos de llenado: Copa de colada, canal vertical, canal horizontal y entrada(s). La dinámica de fluidos \_ de cada elemento será considerado separadamente y gradualmente se irá construyendo un sistema de llenado completo.

Dos principios fundamentales que se aplican al flujo de fluidos son de especial interés para el desarrollo teórico \_ del sistema de llenado.

- a) El principio de la conservación de la masa, a partir del \_ cual se establece la ecuación de continuidad.
- b) El principio de conservación de la energía, a partir del \_ cual se deducen ciertas ecuaciones aplicables al flujo.

La ecuación de continuidad es una consecuencia del principio de conservación de la masa. Para un flujo permanente e incompresible, la masa que atraviesa cualquier sección de \_ una corriente de fluido por unidad de tiempo, es constante. \_ Esta puede calcularse con la relación siguiente:

$$Q = a_1 v_1 = a_2 v_2 \quad \dots(1)$$

Donde:

Q= gasto metálico (cm<sup>3</sup>/seg)

$a_1$  ,  $a_2$  = áreas de las secciones transversales del flujo por los canales respectivos en los puntos 1 y 2 ( $\text{cm}^2$ )

$v_1$  ,  $v_2$  = velocidad del metal en el punto 1 y 2 respectivamente. ( $\text{cm/seg}$ )

El segundo principio está determinado por la ley de la conservación de la energía en donde, en el sistema de flujo sujeto a estudio, la energía potencial es la energía manejada por el sistema, la cual es convertida en otras tres formas de energía.

- 1) Energía cinética ( $mv^2/2$ ), que para un determinado peso de líquido será  $v^2/2g$ , donde  $v$  es la velocidad promedio del flujo a través de la sección transversal del sistema y  $g$  es la aceleración debida a la gravedad.
- 2) La energía debida a la presión está dada por  $pV$ . donde  $p$  es la presión y  $V$  es el volumen, el cual para un peso determinado de líquido se convierte en  $p/\rho$  , siendo  $\rho$  la densidad del líquido.
- 3) La energía perdida en el sistema durante el flujo, es usualmente expresada en términos del coeficiente de pérdidas  $K$ . El valor de  $K$  es determinado en varias partes del sistema y para varias condiciones de flujo y así obtener una medida de partida del flujo desde las condiciones ideales.

La ley de la conservación de la energía aplicada a un

sistema de flujo permanente incompresible, considera que todas las energías a una sección transversal dada del sistema, es igual al total de las energías para alguna otra sección transversal de el flujo y se traduce en la siguiente ecuación, al hacer un balance de la misma:

Energía en la sección 1 + Energía añadida - Energía perdida - Energía extraída = Energía en la sección 2

En términos de las energías previamente consideradas (por unidad de peso), esta ley se convierte, para un sistema en los que los elementos están llenos en:

$$h_1 + v_1^2/2g + p_1/\rho = h_2^0 + v_2^2/2g + p_2/\rho = \text{constante} \quad \dots(2)$$

Esta relación es conocida como la ecuación de Bernoulli, en términos de h, v y p vistas anteriormente. Los valores de los términos K omitidos en la ecuación se consideran en el ejemplo de flujo para los diferentes elementos del sistema de llenado. Todas las cantidades deben ser usadas con cálculos numéricos consistentes y unidades físicas apropiadas.

### 2.3A. COPA DE COLADA

El metal líquido es vertido dentro de la copa desde la olla de colada y el nivel es mantenido constante por el derramamiento continuo del metal, hasta que el molde esté lleno. Existen dos factores importantes en esto, la altura del metal líquido en la copa y las dimensiones y diseño del agujero de salida. (Fig. 3)

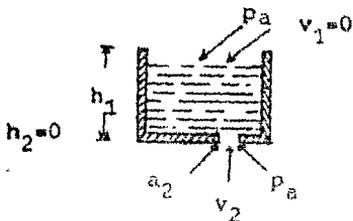


Fig. 3 Copa de colada

La ecuación de continuidad aplicada a la copa de colada dice:

$$a_1 v_1 = a_2 v_2 = \text{constante}$$

Donde  $a_1$  y  $a_2$  son las áreas de la copa de colada y la salida respectivamente,  $v_1$  y  $v_2$  son las correspondientes velocidades de flujo.

La ecuación de Bernoulli primeramente se aplica en el sistema de flujo para la copa de colada. El sufixo 1 es usado en este ejemplo para todas las energías de entrada, o nivel superior de la copa de colada, y el sufixo 2 para el nivel

de salida. En la entrada, el peso del líquido tiene una energía potencial  $h$  con relación a la salida. La velocidad del flujo del nivel 1 es cero y la presión es la atmosférica ( $p_a$ ) pero a la salida la velocidad es  $v_2$  mientras que la presión sigue siendo la atmosférica, y la energía potencial es cero, debido a que el nivel 2 es la línea de referencia en este ejemplo. Entre el nivel 2 y el nivel 1, hay una mayor pérdida de energía al entrar el líquido dentro del agujero de salida de la copa, tomando en consideración esta pérdida debida al cambio de dirección del flujo, teniendo como ecuación igual a  $K \cdot v_2^2 / 2g$ , y relacionando todas las energías de los niveles 1 y 2, la ecuación de Bernoulli es entonces:

$$h_1 + 0 + p_a/\rho = 0 + v_2^2/2g + p_a/\rho + K_2 v_2^2/2g \quad \dots(3)$$

La velocidad ( $v_2$ ) del flujo en la salida de la copa de colada mediante la relación de Torricelli es por tanto.

$$v_2 = \sqrt{\frac{2gh_1}{1 + K_2}} = \xi_2 \sqrt{2gh_1} \quad \dots(4)$$

$$\text{El valor de } \xi_2 = \sqrt{\frac{1}{1 + K_2}} \quad \dots(5)$$

el cual es menor que uno, es conocido como factor de pérdida de velocidad por fricción. El valor numérico de  $K$ , (el cual en éste caso depende del diseño del agujero de salida), tiene que ser determinado experimentalmente.

El volumen del líquido que fluye desde la salida de la copa de colada se obtiene a partir de la ecuación de volumen

constante,  $Q = a_2 v_2$ , donde  $a_2$  es el área de la sección transversal de salida del líquido.

2.3B. SISTEMA CON COPA DE COLADA Y CANAL VERTICAL

En el sistema con copa de colada y canal vertical, la salida de la copa de colada se extiende hasta el canal vertical. Las dos leyes básicas son aplicables a este sistema como en el ejemplo anterior, mientras que el nivel 1 y el 2 quedan como antes, el nivel cero o nivel base cambiará a la salida del canal vertical (nivel 3), fig.4.

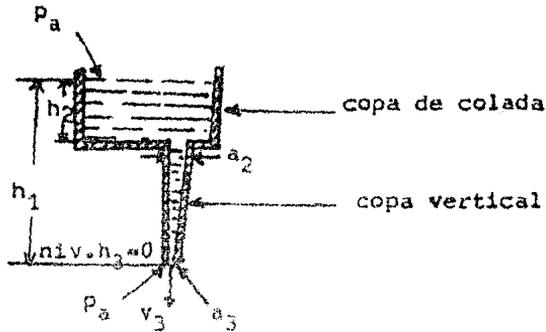


Fig. 4

Tendremos entonces la relación de Bernoulli para los niveles 1 y 3.

$$h_1 + 0 + P_a/\rho = 0 + v_3^2/2g + P_a/\rho + K_2 v_2^2/2g + K_3 v_3^2/2g \quad \dots (6)$$

Donde  $K_2 v_2^2/2g$ , es la energía perdida en la entrada de la copa de colada, y  $K_3 v_3^2/2g$ , es la energía perdida en el canal vertical, donde esta última es debida a la fricción de la pared y puede ser expresada de la siguiente manera.  $K_t v_3^2/2g \cdot l/D$

Siendo  $K_t$  la pérdida por fricción en la pared,  $l$  la longitud del canal vertical y  $D$  el diámetro del mismo para un canal vertical redondo. Esto requiere que  $K_3 = K_f(l/D)$ , cuando el sistema de colada está totalmente lleno  $a_2v_2 = a_3v_3$ , así la ecuación de Bernoulli puede ser expresada en estos términos.

$$v_3^2/2g \left[ 1 + K_2(a_3/a_2)^2 + K_3 \right] = h_1 \quad \dots(7)$$

$$v_3 = \xi_3 \sqrt{2gh_1}$$

donde  $\xi_3 = \sqrt{\frac{1}{1 + K_2(a_3/a_2)^2 + K_3}} \quad \dots(8)$

y su interpretación es la misma que la ecuación de flujo obtenida únicamente para la copa de colada.

2.3C. SISTEMA COPA DE COLADA, CANAL VERTICAL Y CANAL HORIZONTAL.

La ecuación de energía para este sistema, no supone algún factor nuevo, así usando el sistema mostrado en la figura 5, obtendremos:

$$h_1 + 0 + p_a/\rho = 0 + v_4^2/2g + p_a/\rho + K_2 v_2^2/2g + K_3 + v_3^2/2g + K_3 b v_3^2/2g + K_4 f v_4/2g \quad l_r/D_r \quad \dots(9)$$

Sustituyendo a  $v_2$  y  $v_3$  de  $a_4 v_4 = a_3 v_3 = a_2 v_2$ , resulta:

$$h_1 = v_4^2/2g \left[ 1 + K_2 (a_4/a_2)^2 + K_3 f (a_4/a_3)^2 \right] l_s/D_s + K_3 b (a_4/a_3)^2 + K_4 f l_r/D_r \quad \dots(10)$$

donde:  $f$  = fricción

$b$  = cambio de dirección

$s$  = canal vertical

$r$  = canal horizontal

De la ecuación anterior obtenemos:

$$v_4 = \xi_4 \sqrt{2gh_1} \quad \dots(11)$$

$$y \quad \xi_4 = \sqrt{\frac{1}{1 + K_2 (a_4/a_2)^2 + K_3 f (a_4/a_3)^2 \cdot l_s/D_s + K_3 b (a_4/a_3)^2 + K_4 f \cdot l_r/D_r}} \quad \dots(12)$$

Así tenemos que la relación de flujo en la sección 4, es:

$$Q = a_4 v_4 = a_4 \xi_4 \sqrt{2gh} \quad \dots(13)$$

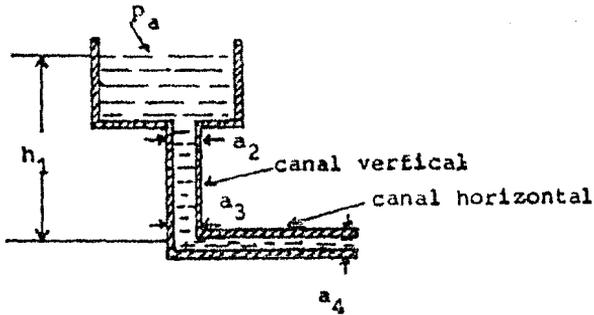


Fig. 5

2.3D. SISTEMA COPA DE COLADA, CANAL VERTICAL, CANAL HORIZONTAL Y ENTRADA.

Cuando una sola entrada es adicionada al canal horizontal, fig. 6, el sistema puede ser tratado hidráulicamente de una manera análoga a los ejemplos anteriores, así obtenemos:

$$h_1 + 0 + p_a/\rho = 0 + v_5^2/2g + p_a/\rho + K_2 v_2^2/2g + K_3 f v_3^2/2g + K_3 b v_3^2/2g + K_4 f v_4/2g \cdot 1_r/D_r + K_4 b v_4^2/2g + K_5 f v_5/2g \cdot 1/D \quad \dots(14)$$

sustituyendo a  $v_2$ ,  $v_3$  y  $v_4$  de  $a_5 v_5 = a_4 v_4 = a_3 v_3 = a_2 v_2$ , resulta:

$$h_1 = v_5^2/2g \left[ 1 + K_2 (a_5/a_2)^2 + K_3 f (a_5/a_3)^2 \cdot 1_g/D_s + K_3 b (a_5/a_3)^2 + K_4 f (a_5/a_4)^2 \cdot 1_r/D_r + K_4 b (a_5/a_4)^2 + K_5 + 1g/Dg' \right] \quad \dots(15)$$

Donde:  $f$  = fricción

$b$  = cambio de dirección

$s$  = canal vertical

$r$  = canal horizontal

$g'$  = entrada

De la ecuación anterior obtenemos:

$$v_5 = \xi_5 \sqrt{2gh_1} \quad \dots(16)$$

$$\xi_5 = \sqrt{\frac{1}{1 + K_2 \left(\frac{a_5}{a_2}\right)^2 + K_3 f \left(\frac{a_5}{a_3}\right)^2 \frac{1}{D_s} + K_3 b \left(\frac{a_5}{a_3}\right)^2 + K_4 f \left(\frac{a_5}{a_4}\right)^2 \frac{1}{D_r} + K_4 b \left(\frac{a_5}{a_4}\right)^2 + K_5 f \frac{1}{D_g}} \dots (17)$$

De esta manera obtenemos que la relación de flujo en la sección 5 es:

$$Q_5 = a_5 v_5 = a_5 \xi_5 \sqrt{2g h_1} \dots (18)$$

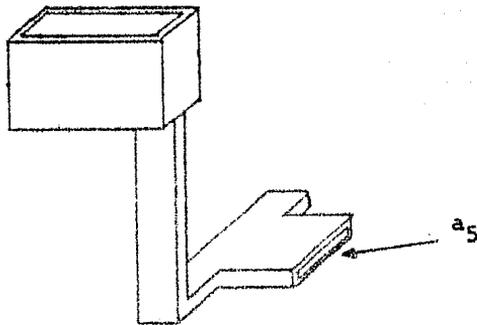


Fig. 6

2.3E. RELACION HIDRAULICA DE LA VELOCIDAD DE FLUJO  $v$  Y EL TIEMPO DE LLENADO DEL MOLDE

La velocidad del flujo para el sistema de colada a tratar, puede ser obtenida mediante la relación de Bernoulli, usando los valores apropiados de  $K$ . Con el cálculo de la velocidad y el volumen del flujo  $Q$  a través de un área, esta última podrá ser determinada debido a que  $Q = av$  y el tiempo requerido para llenar un molde de volumen  $v$  será por lo tanto:

$$t = v/Q = \frac{w}{\rho a_1 v_1} \quad \dots(19)$$

Empleando la ecuación 18:

$$t = \frac{w}{\rho a_5 v_5} = \frac{w}{\rho a_5 \xi_5 \sqrt{2gh_1}}$$

Donde:

$w$  = peso de la pieza colada

$\rho$  = la densidad del metal líquido

$g = 980 \text{ cm/s}^2$

$h_1$  = altura que toma el metal

$\xi_5$  = factor de pérdida de velocidad por fricción

El cálculo se complica si  $h$  no es constante durante el llenado del molde, por ejemplo en sistemas de colada de llenado por el fondo, donde el valor de  $h$  cambia continuamente a medida que el molde se llena.

## **PARTS    EXPERIMENTAL**

CAPITULO 3

DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 3.1. ELABORACION DEL MODELO Y SISTEMA DE COLADA.

El objeto de esta sección es describir de manera general las condiciones y la forma de la elaboración del modelo y su sistema de colada que se utiliza en la evaluación experimental.

En principio, el modelo se elaboró con el fin de recibir cierta cantidad de aluminio, para así, en función de ésta, analizar el factor de pérdida de velocidad por fricción. Es por esto que se experimentó con tres pesos de pieza en aluminio, siendo de 0.5 kg, 1 kg y 1.5 kg, que corresponden a un volumen de  $185 \text{ cm}^3$ ,  $370 \text{ cm}^3$  y  $555 \text{ cm}^3$  respectivamente, tomando como base la densidad del aluminio puro ( $2.7 \text{ gr/cm}^3$ ). Con estas últimas especificaciones se fabricaron los modelos en madera, de tal manera que tubieron una geometría sencilla, debido a que dentro del objetivo de este trabajo no se contempla la forma.

El sistema de colada para el modelo se elaboró con las características definidas en 1.2, de tal modo que los elementos del sistema reunieron en resumen lo siguiente:

- La copa de colada se confeccionó de tal manera que disminuiera las turbulencias en la etapa inicial y con una forma adecuada para preveer la posible erosión durante la colada
- El canal vertical se diseñó con cierta altura que de acuerdo a las dimensiones de la caja de moldeo fue de 8 cm, para obtener así una velocidad tal que minimizara las turbu-

lencias, a este canal se le dio una conicidad establecida entre un diámetro superior de 2.5 cm, e inferior de 1.65 cm, con el fin de evitar la posibilidad de entrada de aire o gases al interior del molde.

El canal horizontal se elaboró, como un ducto de sección cuadrada de 2 cm por lado, con la finalidad de que actuara como una trampa de escoria y con una longitud de 12 cm para así dar tiempo suficiente a que flote ésta, además de tratar de provocar un flujo uniforme hacia la entrada.

La entrada cuyas medidas fueron de 3 cm X 1 cm de sección y 3 cm de longitud, se consideraron adecuadas para evitar la solidificación prematura y dar lugar a que un flujo tranquilo llegue a la cavidad del molde.

El sistema de colada propuesto, actuó dentro de los ensayos experimentales con cierta perfección, ya que se obtuvieron piezas de muy buen acabado superficial. Las dimensiones de los elementos del sistema de colada se calcularon basados en la referencia (4).

Tanto el modelo como los elementos de su sistema de colada se fabricaron en madera y las dimensiones propuestas se respetaron hasta donde fue posible, habiéndose tenido mucho cuidado en el corte y desbastado del material, además de recurrir al calibrador (Vernier) para darle una exactitud adecuada. A estos componentes se les trató con cera líquida caliente en donde se sumergieron aproximadamente una hora, se les extrajo dejándolos secar para proceder a pulir la super-

ficie de cada uno de ellos, para a continuación darles un acabado con barniz y por último armar el modelo sobre una tabla previamente preparada que forma parte de la caja de moldeo. Los elementos del modelo se armaron de tal manera que en una cara de la tabla quedara el modelo en sí, la entrada, y la mitad del canal horizontal, y en la cara posterior la otra mitad del canal horizontal, el canal vertical y la copa de colada. La figura 7, muestra lo expuesto. Como la finalidad es medir el tiempo de llenado del molde, se le agregó un apéndice pequeña en el extremo del molde unida a un canal que actuaría como indicador de llenado y facilitara la expulsión del aire contenido en la cavidad que conforma la pieza.

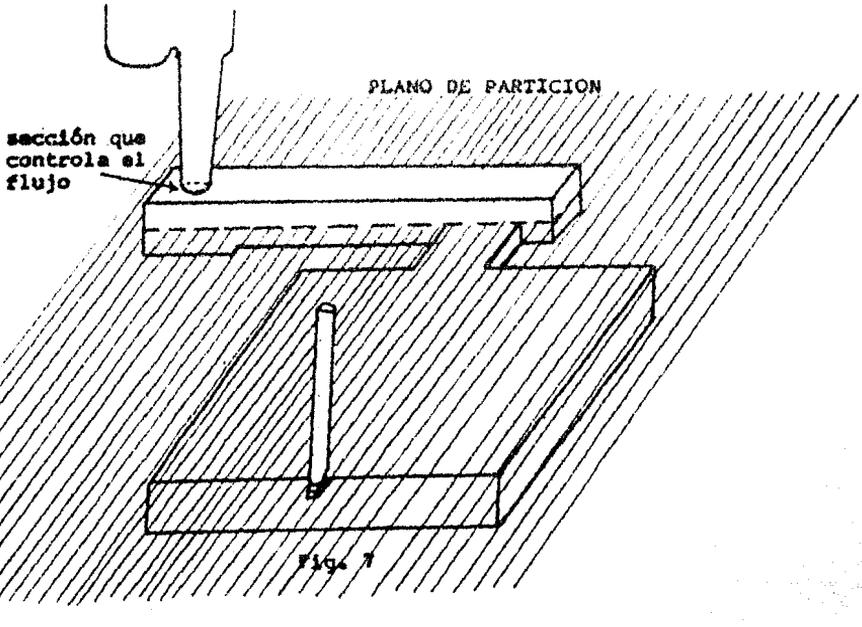


Fig. 7

### 3.2. CONTROL DE ARENAS.

En esta sección se listarán las propiedades y composición de la arena natural de moldeo que fue empleada con buenos resultados para el moldeo de aluminio en la práctica experimental de este trabajo.

Según ref. 1, se recomienda para el moldeo de aluminio una arena cuya fineza sea de 130 de especificación AFS, pero debido a la carencia de ésta en el laboratorio se utilizó la arena mas fina existente, cuya especificación AFS es de 80/-90. A pesar de esto, el acabado superficial de la pieza moldeada con esta arena fue bueno y las propiedades mecánicas de la arena que a continuación se mencionarán son aceptables.

En la práctica se usó el moldeo de arena en verde, en donde la humedad juega un papel muy importante, en referencia 2 se recomienda que ésta esté comprendida entre el 4% y el 6%, con el objeto de evitar la excesiva liberación de vapor de agua en el momento de la colada, si está en exceso. Se tomó un promedio entre éstas (5%) y se experimentó también con un ligero exceso de humedad (7%), a fin de estudiar la influencia de ésta en el factor de pérdidas de velocidad.

La cantidad de Bentonita cálcica agregada a la arena fue del 15%, cantidad recomendada en referencia 1, el aglomerado final dio lugar a buenas características de moldeabilidad y compactación, evitando el desmoronamiento y en buena parte la erosión del molde de arena al paso del flujo metálico.

Las propiedades mecánicas de la arena con las especificaciones mencionadas anteriormente reportaron los siguientes

valores:  $x_p$  = promedio parcial  
 $x_t$  = promedio general  
 $w$  = diferencia entre el valor maximo y minimo

Humedad 5%				$\bar{x}_p$	$\bar{x}_t$	$w$
muestra 1	46.6	47.6	49.6	47.93	49.69	2.87
muestra 2	50	50	51	50.33		
muestra 3	52.3	50	50	50.8		
Humedad 7%				$\bar{x}_p$	$\bar{x}_t$	$w$
muestra 1	39.5	38.8	36.7	38.33	40.12	3.17
muestra 2	40.7	42.2	38.7	40.53		
muestra 3	39.3	41	41.5	41.5		

Tabla 1 PERMEABILIDAD (Dieter)

Humedad 5%				$\bar{x}_p$	$\bar{x}_t$	$w$
muestra 1	11.88	12.17	12.15	12	12.33	0.8
muestra 2	12.82	12.89	12.68	12.8		
muestra 3	12.13	12.2	12.27	12.2		
Humedad 7%				$\bar{x}_p$	$\bar{x}_t$	$w$
muestra 1	8.76	8.72	9.17	8.88	9.89	1.85
muestra 2	10.82	11.31	10.06	10.73		
muestra 3	10.34	9.86	10	10.07		

Tabla 2 RESISTENCIA A LA COMPRESION (N/cm<sup>2</sup>)

Humedad 5%				$\bar{x}_p$	$\bar{x}_t$	w
muestra 1	89	88	87	88	87.5	1
muestra 2	87	87	87	87		
muestra 3	87	87.5	88	87.5		
Humedad 7%				$\bar{x}_p$	$\bar{x}_t$	w
muestra 1	85	85	85	85	85.44	0.6
muestra 2	85	86	86	85.6		
muestra 3	87	85	85	85.6		

Tabla 3 DUREZA (DIETER)

Humedad 5%				$\bar{x}_p$	$\bar{x}_t$	w
muestra 1	2.93	3.10	3.45	3.16	3.45	0.45
muestra 2	3.52	3.72	3.58	3.61		
muestra 3	3.69	3.62	3.45	3.58		
Humedad 7%				$\bar{x}_p$	$\bar{x}_t$	w
muestra 1	2.48	2.41	2.55	2.48	2.71	0.39
muestra 2	2.83	2.96	2.62	2.8		
muestra 3	2.89	2.89	2.83	2.87		

Tabla 4 RESISTENCIA AL CORTE (N/cm<sup>2</sup>)

Humedad 5%		$\bar{x}_t$	w
muestra 1	10	12.16	5.3
muestra 2	13.3		
muestra 3	11.2		
Humedad 7%		$\bar{x}_t$	w
muestra 1	10.7	6.32	6.1
muestra 2	4.6		
muestra 3	5		

Tabla 5 MOLDEABILIDAD (%)

Humedad 5%		$\bar{x}_t$	w
muestra 1	1.42	1.45	0.04
muestra 2	1.46		
muestra 3	1.45		
Humedad 7%		$\bar{x}_t$	w
muestra 1	1.51	1.51	0.04
muestra 2	1.52		
muestra 3	1.48		

Tabla 6 DENSIDAD (gr/cm<sup>3</sup>)

### 3.2A. CARTAS DE CONTROL DE PROPIEDADES DE ARENAS.

Debido a que ciertas variables como el medio ambiente, el molino usado, el error en el pesado etc., son inherentes a la preparación de la mezcla arenosa, éstas crean ciertas fluctuaciones en las propiedades de la arena preparada, por lo tanto, se recomienda llevar a cabo una rutina en la medición de las propiedades mecánicas en cada mezcla elaborada y checar los resultados mediante gráficas llamadas cartas de control, las cuales permiten en la técnica de la arena detectar alguna desviación peligrosa de las normas.

Las cartas de control se realizaron de la siguiente manera mediante el siguiente tratamiento estadístico.

$$\text{Límites de control} = \bar{x}_t \pm (A' 0.001 \times \bar{w})$$

Donde:  $\bar{x}_t$  = promedio general de los valores de las tres muestras.

w = es el rango dado por la diferencia entre el valor máximo y mínimo.

A' = porcentaje admisible de error.

#### Método:

- 1.- Se prepararon las mezclas de arena en tres diferentes días (periodos), tomando tres muestras por cada periodo, llevando a cabo la medición de las propiedades mecánicas para cada uno. (para n=3 periodos el valor de A'0.001 es 1.05 según tabla 25 de referencia 3)
- 2.- El siguiente procedimiento es el obtener la media aritmética parcial ( $\bar{x}_p$ ) para cada una de las muestras.

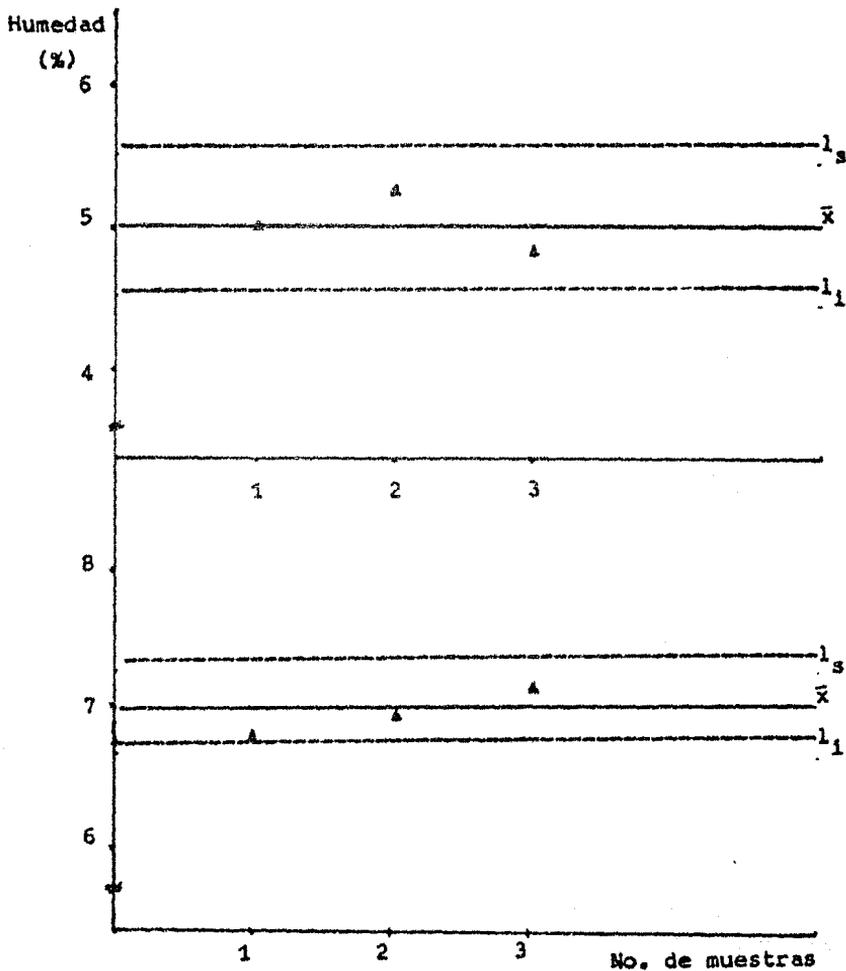
- 3.- El rango  $w$  es también tabulado, el cual es la diferencia entre el valor máximo y mínimo de las tres muestras de \_ cada periodo.
- 4.- La media aritmética total ( $\bar{x}_t$ ) es el valor promedio de\_ las medidas parciales ( $\bar{x}_p$ ).
- 5.- El valor del rango  $\bar{w}$  es la media aritmética de todos los valores  $\bar{w}$  en el periodo.

Así los valores obtenidos, después son trazados tomando como ordenada a los valores de las propiedades y como abscisa a el periodo, luego las líneas son dibujadas para mostrar \_ los límites de control, con el objeto de obtener los rangos\_ de aceptación para las futuras pruebas experimentales.

En las siguientes cartas de control se reportan los resultados obtenidos para cada una de las pruebas.

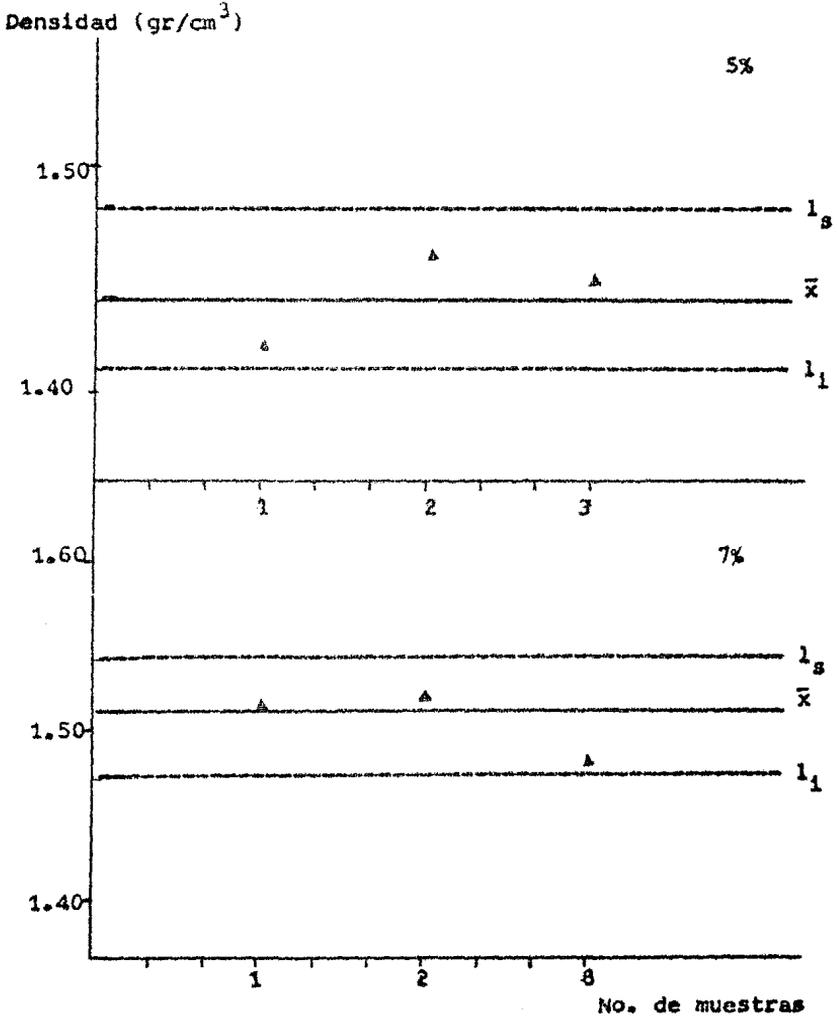
1.- CARTA DE CONTROL DE HUMEDAD

	5%	7%
$(l_s)$ límite superior	5.55	7.23
promedio	5.03	6.94
$(l_i)$ límite inferior	4.5	6.64



2.- CARTA DE CONTROL DE DENSIDAD

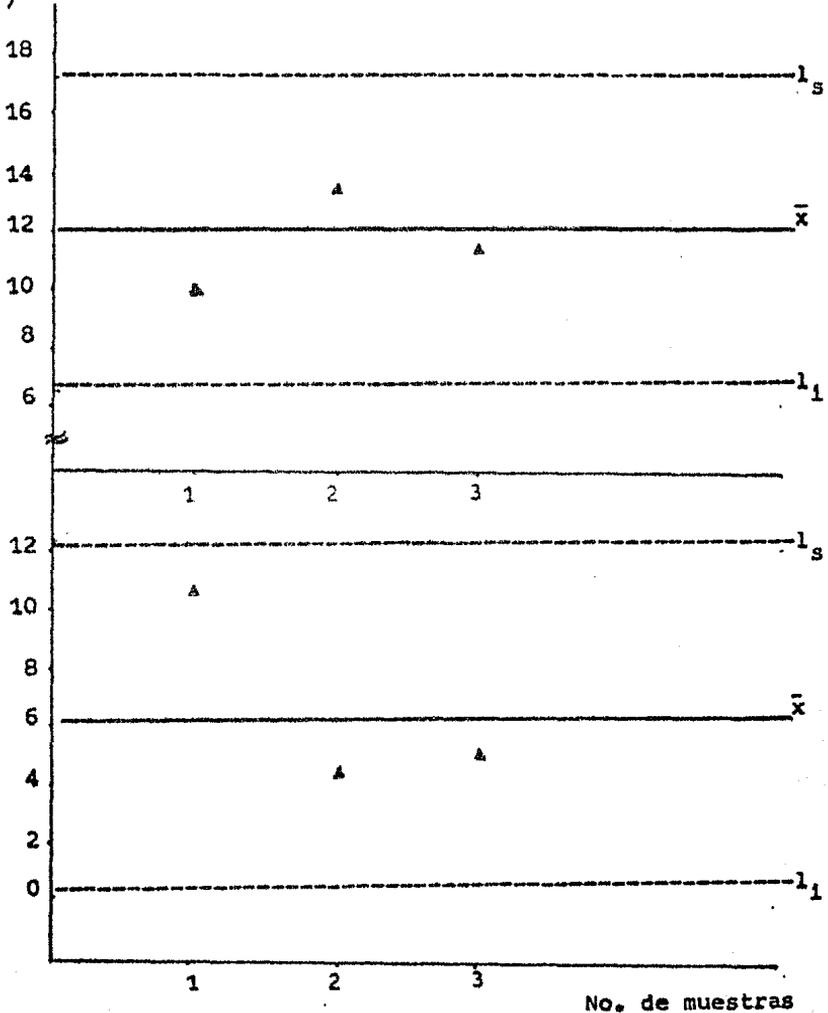
	5%	7%
( $l_s$ ) límite superior	1.48	1.54
promedio	1.44	1.51
( $l_i$ ) límite inferior	1.41	1.47



3.- CARTA DE CONTROL DE MOLDEABILIDAD

	5%	7%
$(l_s)$ límite superior	12.12	12.72
promedio	12.16	6.32
$(l_i)$ límite inferior	6.59	0.085

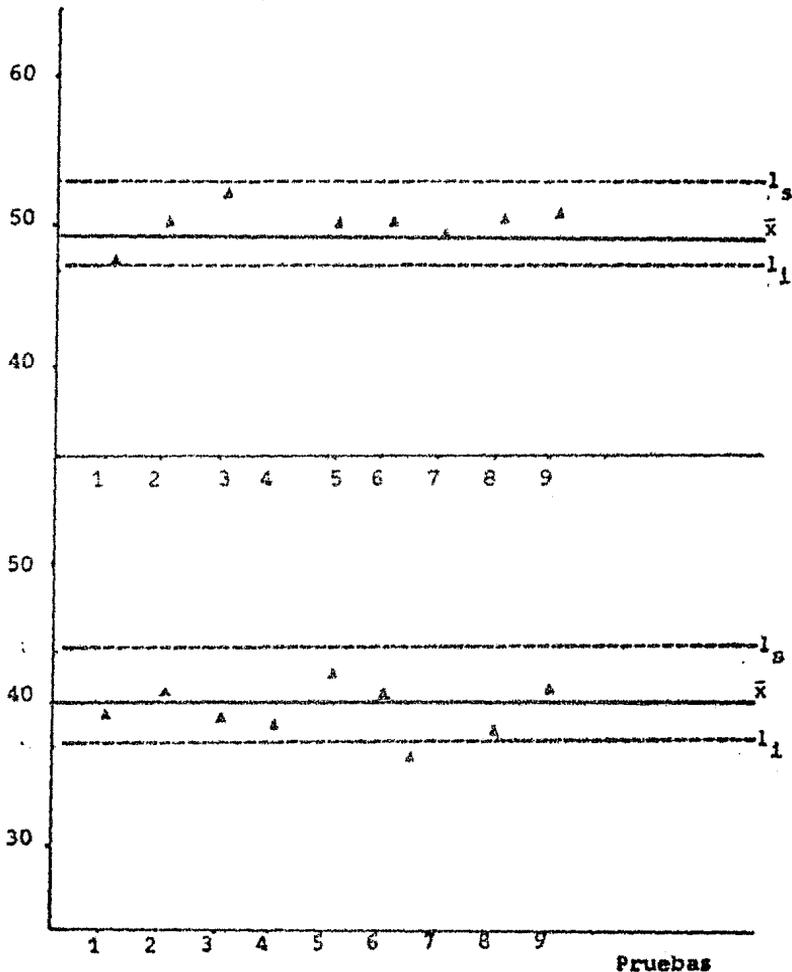
Moldeabilidad  
( % )



4.- CARTA DE CONTROL DE PERMEABILIDAD

$l_s$ límite superior	52.7	43.44
promedio	49.69	40.12
$l_i$ límite inferior	46.67	36.79

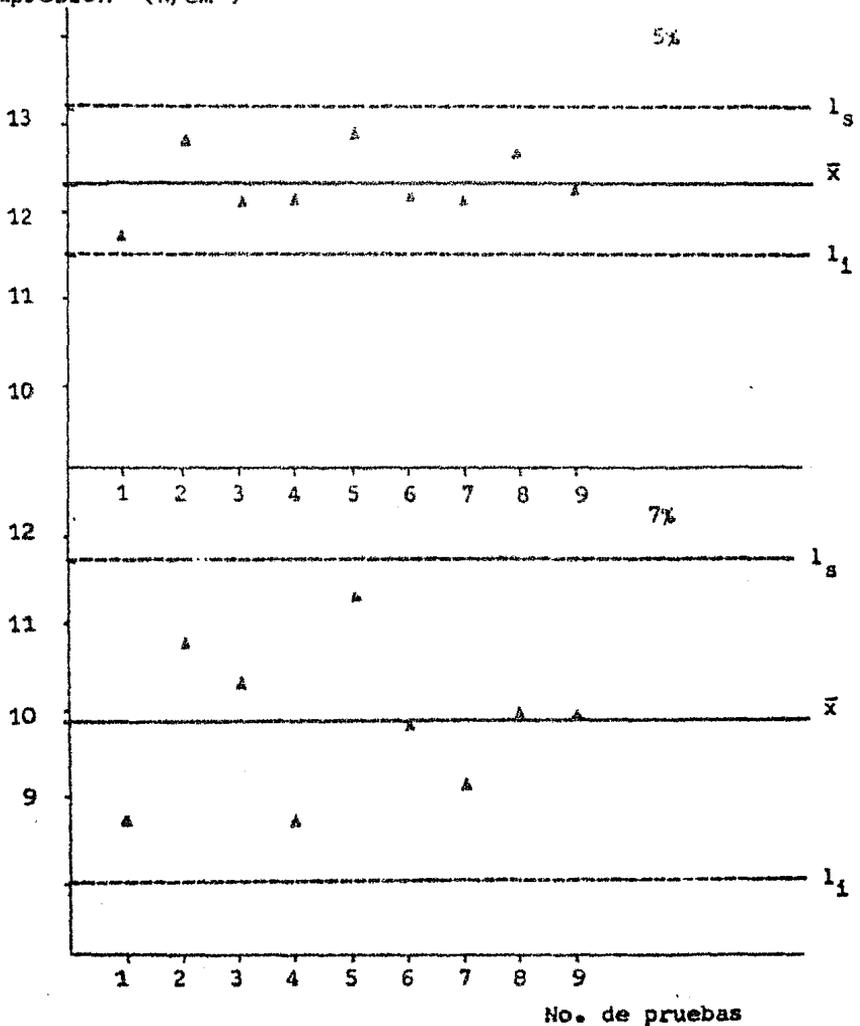
Permeabilidad (Dieter)



5.- CARTA DE CONTROL DE RESISTENCIA A LA COMPRESION

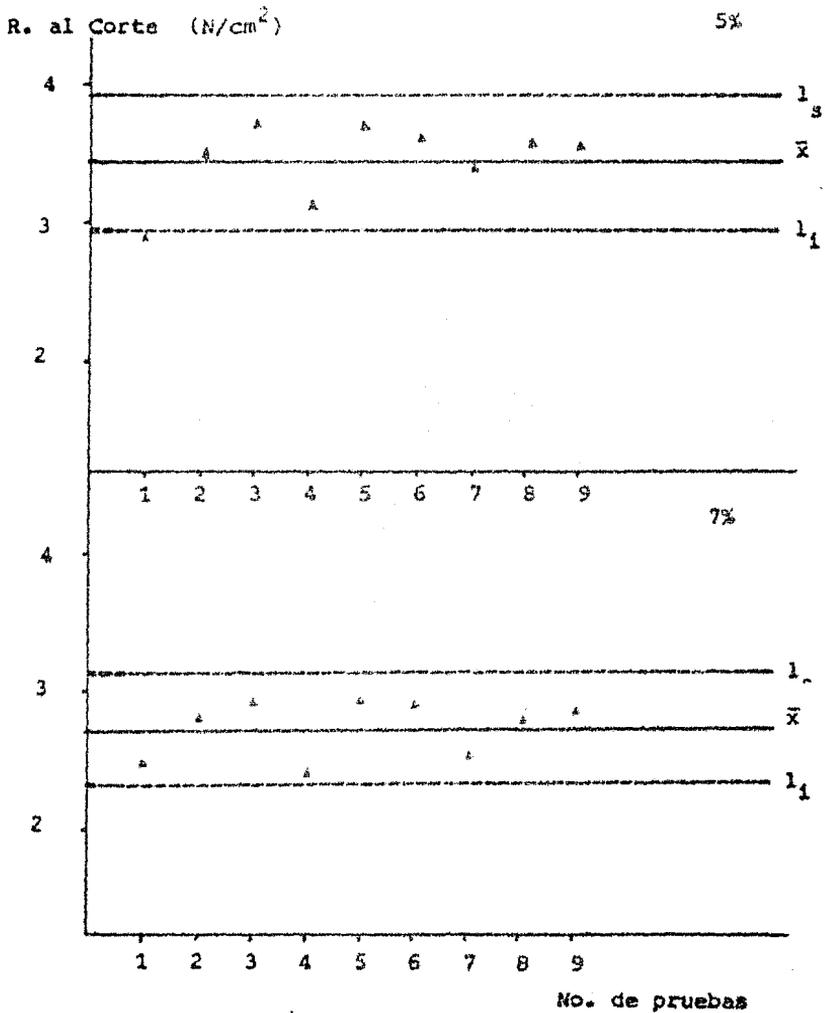
	5%	7%
( <sup>2</sup> s)límite superior	13.16	11.71
promedio	12.33	9.88
( <sup>1</sup> i)límite inferior	11.49	8.05

R. Compresión (N/cm<sup>2</sup>)



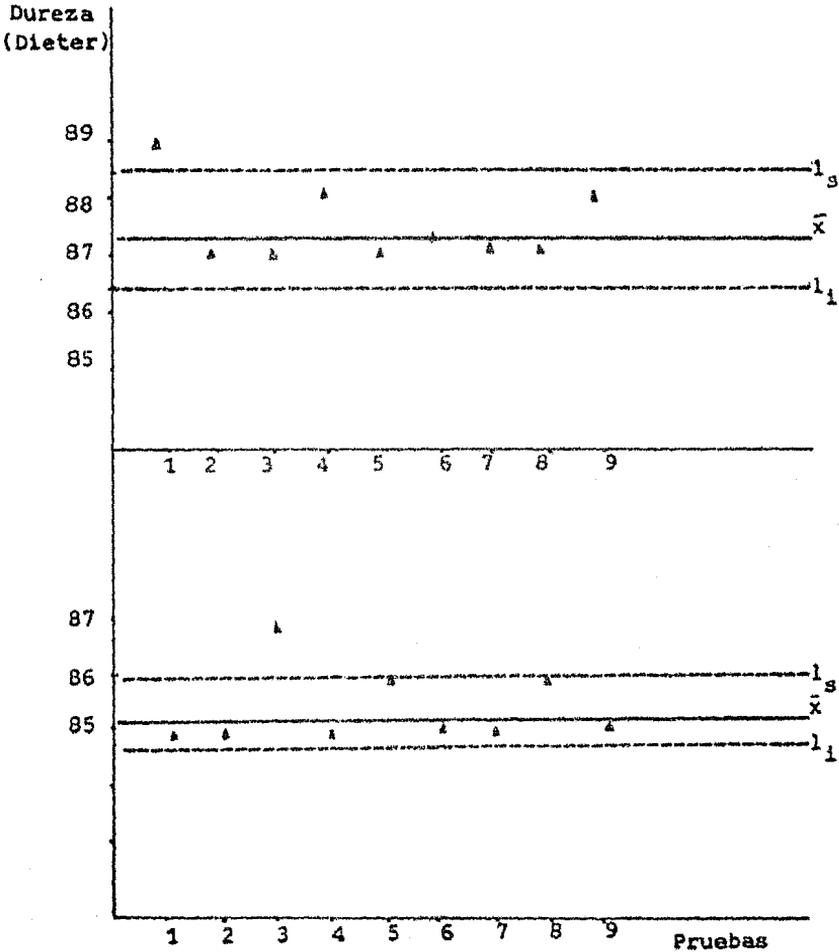
6.- CARTA DE CONTROL DE RESISTENCIA AL CORTE

	5%	7%
( $1_s$ ) límite superior	3.92	3.12
promedio	3.45	2.72
( $1_i$ ) límite inferior	2.97	2.31



7.- CARTA DE CONTROL DE DUREZA

	5 %	7 %
$(l_s)$ límite superior	88.55	86.07
promedio	87.5	85.44
$(l_i)$ límite inferior	86.45	84.81



### 3.3. TECNICA DE FUSION

#### 3.3A. PREPARACION DE LA ARENA DE CAREO.

Como ya se mencionó anteriormente, la arena que se utiliza fue de una fineza 80/90 AFS, de ésta se pesó 2400 grs y se agregó a un molino Simpson junto con 150 ml de agua para una humedad del 5% ó 2340 grs de arena y 210 ml de agua si el requerimiento fue del 7% de humedad, en cualquier caso se dejó mezclando 2 minutos, a cuyo término se paró el molino con el objeto de agregar 450 grs de Bentonita cálcica y continuar en seguida el mezclado durante otros 3 minutos, al finalizar éstos, se abrió la compuerta y se extrajo la arena con el molino en marcha, cribándola al tiempo que salía y recolectándola en cajas plásticas de cierre hermético con el fin de evitar cambios de humedad, esta operación se repitió para los modelos de 1 kg , 1.5 kg y 0.5 kg.

#### 3.3B. PREPARACION DE LA ARENA DE RELLENO

Dentro de otro molino Simpson de mayor capacidad, se agregaron aproximadamente 60 kg. de arena recirculada de anteriores moldeos y pruebas de laboratorio, cabe hacer notar que esta arena por su misma naturaleza contiene incluida cierta cantidad indeterminada de Bentonita y humedad, además de encontrarse relativamente limpia. (Si la arena presentaba grandes trozos compactados, se precedía a desmoronarlos mediante

una desterronadora antes de ser vertida al molino). En el molino se dejó mezclando 5 minutos y a su término se checó la humedad mediante un aparato llamado speedy y dependiendo de ésta se procedió a ajustarla al 5% o al 7% según la prueba, se le agregó el agua calculada y se puso a funcionar el molino durante otros 5 minutos, para posteriormente extraerla e iniciar el moldeo.

### 3.3C. MOLDEO DE LA PIEZA

El moldeo se realizó manualmente con la técnica normal, dentro de una caja de moldeo metálico a la cual se le introdujo el modelo de madera. Se tuvo cuidado en espolvorear talco en él, además de apisonar con precaución la arena de careo, a fin de que cubra totalmente la superficie del modelo y evitar cuarteaduras, para así obtener un mejor acabado.

### 3.3D. FUSION DEL METAL

Mientras se realizaban los preparativos descritos anteriormente, se dejó calentando el horno junto con el crisol hasta una temperatura de aproximadamente  $600^{\circ}$  C, para después introducir en él, el material de aluminio puro previamente cortado y calentado al colocarse el metal en las inmediaciones del horno, inmediatamente después, como escorificador y fundente se le agregó una mezcla de NaCl y KCl al 50%, se esperó a que fundiese el metal y partiendo de aquí se esperó

a que alcanzara una temperatura adecuada para su posterior \_  
desgasificación con desgaser 200 (pastillas de hexacloroeta -  
no), de tal modo que unos gramos de esta sustancia se envol -  
vieron en papel aluminio y se introdujeron hasta el fondo del  
metal líquido auxiliado con un dispositivo de acero al cual \_  
se le dio movimientos circulares hasta el cese del burbujeo, \_  
al término de esta operación se esperó 5 minutos y si la tem -  
peratura se encontraba más de  $20^{\circ}\text{C}$  arriba de la programada pa -  
ra colar, se extraía el crisol del horno previamente desconec -  
tado y se colocaba en una base en espera a obtener  $5^{\circ}\text{C}$  arriba  
de la temperatura de colada ( $690^{\circ}\text{C}$  ó  $750^{\circ}\text{C}$ ), para inmediata -  
mente después verter el aluminio dentro del molde a través de  
su copa de colada y en ese preciso instante tomar el tiempo \_  
mediante un cronómetro hasta la aparición del botón metálico \_  
en el canal indicador de llenado. Cabe hacer notar que es su -  
mamente importante y por lo tanto se tuvo tal precaución, el  
mantener el mismo nivel metálico en la copa de colada durante  
el tiempo que tardó el vaciado. Esta operación fue llevada a \_  
cabo con la ayuda de 4 hombres, dispuestos de la manera si -  
guiente, uno de ellos en el control de la temperatura, el o -  
tro en el control de tiempo y dos más en el control de vacia -  
do. Por último el material sobrante se vierte en unas lingote -  
ras pequeñas y se limpia el crisol para en seguido introducig  
lo nuevamente en el horno y esperar que se enfríe junto con \_  
él.

### 3.4. CALCULO TEORICO DEL FACTOR DE PERDIDA DE VELOCIDAD POR - FRICCION.

Tomando como referencia el fundamento teórico descrito anteriormente, el factor de pérdidas de velocidad por fricción total, podrá ser calculado teóricamente por medio de la ecuación de Bernoulli.

$$h_1 + v_1^2/2g + p_1/\rho + K_1 v_1^2/2g = h_2 + v_2^2/2g + p_2/2g + p_2/\rho + K_2 v_2^2/2g = \text{cte}$$

Esta expresión aplicada a un sistema de colada que consta de copa de colada, canal vertical, canal horizontal y una entrada, todo esto en función de un área mínima ( $a_3$ ), ubicada en la parte inferior del canal vertical cónico y con una velocidad de flujo  $v_3$ , adoptará la siguiente forma:

$$h_1 + 0 + p_a/\rho = 0 + v_3^2/2g + p_a/\rho + K_2 v_2^2/2g + K_3^2/2g l_3/D_3 + K_b_3 v_4^2/2g + K_f_4 v_4^2/2g l_r/D_r + K_b_4 v_5^2/2g + K_f_5 v_5^2/2g l_6/D_6 \quad \dots(19)$$

sustituyendo  $v_2$ ,  $v_4$  y  $v_5$  de  $a_2 v_2 = a_3 v_3 = a_4 v_4 = a_5 v_5$ , llegamos a :

$$h_1 = v_3^2/2g \left[ 1 + K_2 (a_3/a_2)^2 + K_f_3 (a_3/a_3)^2 l_3/D_3 + K_b_3 (a_3/a_4)^2 + K_f_4 (a_3/a_4)^2 l_r/D_r + K_b_4 (a_3/a_5)^2 + K_f_5 (a_3/a_5)^2 l_6/D_6 \right] \quad \dots(20)$$

Despejando  $v_3$  de la ecuación obtenemos:

$$v_3 = \xi \sqrt{2gh} \quad \dots(21)$$

siendo  $\xi$ , (factor de pérdida de velocidad por fricción) equivalente a:

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{\frac{1+K_2(a_3/a_2)^2+Kf_3(a_3/a_3)^2}{l_s/D_s+Kb_3(a_3/a_4)^2+Kf_4(a_3/a_4)^2} + \frac{l_r/D_r+Kb_4(a_3/a_5)^2+Kf_5(a_3/a_5)^2}{l_g/D_g}}}$$

Donde:

$a_2, a_3, a_4$  y  $a_5$  son las áreas del canal vertical cónico (superior), del canal vertical cónico (inferior), del canal horizontal y de la entrada respectivamente.

$Kf_3, Kf_4$  y  $Kf_5$  son los coeficientes de fricción del canal vertical, del canal horizontal y de las entradas.

$l_s, l_r, l_g$  son las longitudes del canal vertical, del canal horizontal y de las entradas.

$K_2, Kb_3$  y  $Kb_4$ , son los coeficientes de pérdidas debido al cambio de dirección del fluido dentro del sistema y están evaluados en la figura 5.9 de referencia 5, donde se da una ecuación semejante llamada relación de Mating.

Con la ecuación descrita se elaboró un programa para el computo del factor de pérdida de velocidad por fricción, introduciendo los datos disponibles. Los datos y resultados finalmente aparecen en la tabla 7.

Pieza	Peso Pza. (Kg)	$\xi$	t(seg)
1	0.5	0.26	1.9
2	1.0	0.26	3.4
3	1.5	0.26	5.3

Tabla 7

Nota: Como se observa en la ecuación  $\xi$  está en función de la geometría del sistema de colada y esta última no cambia siendo la misma para las tres piezas de pesos diferentes, esto implica que  $\xi$  permanezca constante.

### 3.5 CALCULO EXPERIMENTAL DEL FACTOR DE PERDIDAS DE VELOCIDAD POR FRICCIÓN.

El factor de pérdidas de velocidad por fricción real, se puede calcular confrontando la velocidad real ( $v_r$ ), con la velocidad ideal ( $v_i$ ), esta última no toma en cuenta las pérdidas de energía.

$$\xi = v_r / v_i \quad \dots(23)$$

Sustituyendo  $v_r$  y  $v_i$  de la ecuación con las expresiones siguientes.

$$v_i = \sqrt{2gh}$$

$$v_r = \frac{w}{\rho t A}$$

Se obtiene la ecuación siguiente:

$$\xi = \frac{w}{\rho t A \sqrt{2gh}} \quad \dots(24)$$

Donde:  $\rho$  = densidad del aluminio ( 2.7 grs/ cm<sup>3</sup> )

A = área mínima que corresponde a ( $a_3 = 2.13$  cm<sup>2</sup> )

g = 981 cm/ s<sup>2</sup>

h = altura de caída del metal ( 10 cm )

w = peso de la pieza colada (0.5 kg. 1.0 kg. 1.5 kg.)

t = tiempo de llenado tomado experimentalmente.

Con el fin de observar la influencia de la temperatura de colada y la humedad de la arena del molde en el factor

de pérdida de velocidad por fricción, se tomó el tiempo de llenado del molde experimentalmente con las combinaciones entre los tres diferentes pesos de pieza colada (0.5 kg, 1 kg, 1.5 kg), dos temperaturas de colada ( $690^{\circ}\text{C}$ ,  $750^{\circ}\text{C}$ ), y dos humedades de la arena del molde (5%, 7%). Estos resultados se presentan junto con los valores obtenidos de al resolver la ecuación anterior en la tabla 8.

Peso Pza (kg)	temp. $^{\circ}\text{C}$	Humedad 5%		Humedad 7%	
		tiempo de llenado (seg)	$\xi$	tiempo de llenado (seg)	$\xi$
0.5	$690^{\circ}$	3.1	0.2002	2.8	0.2217
	$750^{\circ}$	3	0.2069	3	0.2069
1.0	$690^{\circ}$	4.2	0.2456	4.1	0.3028
	$750^{\circ}$	4	0.3103	4.2	0.2956
1.5	$690^{\circ}$	5.4	0.3448	5.9	0.3156
	$750^{\circ}$	4.8	0.3879	5.3	0.3513

Tabla. 8

### 3.6. GRAFICAS

Para mayor claridad en la interpretación de los resultados obtenidos, es conveniente contar con la representación gráfica de ellos.

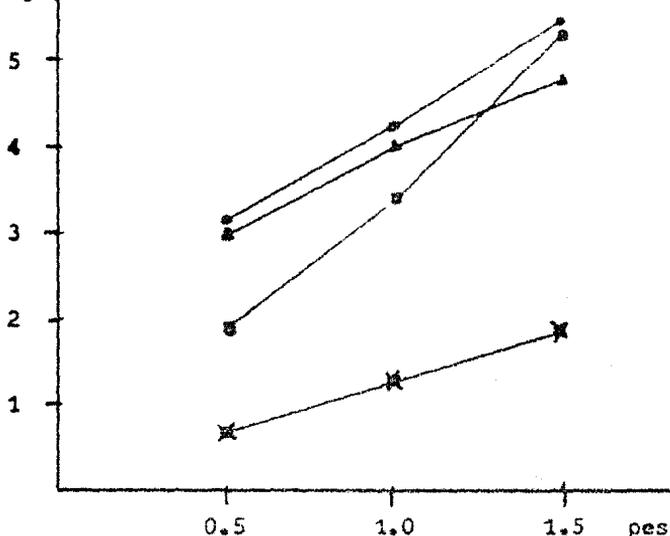
Resulta ilustrativo comparar graficamente el tiempo de llenado del modelo teórico con el experimental en sus respectivas humedades del molde de arena y sus temperaturas de cola da, así como también el tiempo de llenado ideal, ésto es, sin pérdidas de energía. Las gráficas 1 y 2 están dedicadas a dicho propósito.

Por otra parte, puede resultar interesante observar los resultados de  $\xi$  obtenidos en forma experimental y por medio de la expresión matemática teórica. Las gráficas 3 y 4 están destinadas a este fin.

Tiempo de llenado  
(seg)

- 53 -

Gráfica 1.

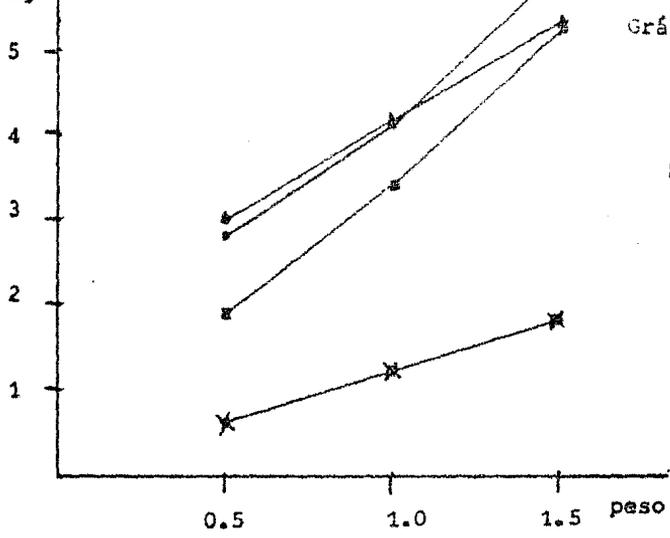


Humedad 5%

Tiempo de llenado  
(seg)

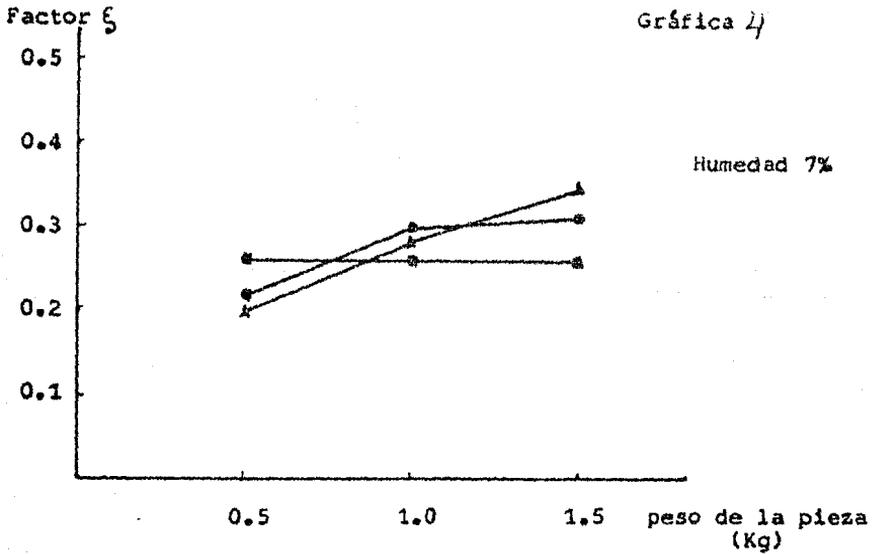
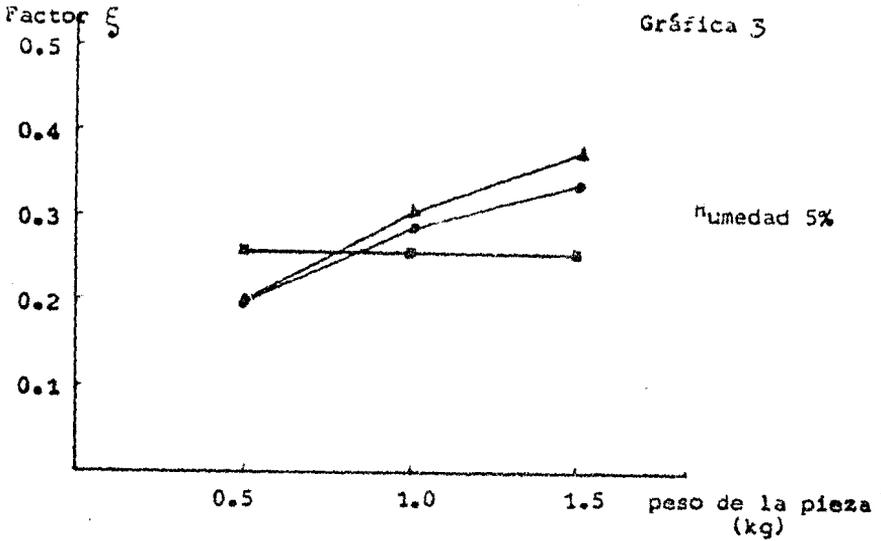
peso de la pieza  
(kg)

Gráfica 2



Humedad 7%

- Resultados experimentales con temperatura de colada de 690°C.
- ▲ Resultados experimentales con temp. de colada de 720°C
- Resultados teóricos determinados por la computadora
- ✕ Resultados del tiempo teórico ideal (sin pérdidas de energía).



- Resultados experimentales con temperatura de colada de 690°C
- ▲ Resultados experimentales con temperatura de colada de 720°C
- Resultados teóricos determinados por la computadora

## COMENTARIOS

El dar un fundamento teórico basado en una solución matemática completa en un problema de llenado no ha sido posible aún, debido a la falta de datos. Sin embargo en esta tesis se ha tratado de dar un parcial entendimiento mediante cálculos necesarios a través de la aplicación de varios principios de la hidráulica, de la metalurgia, del diseño de las piezas y el moldeo.

En la aplicación práctica de los estudios hidráulicos al sistema de llenado se toma en cuenta tres diferentes propósitos: Primero, se necesitó establecer las características de un flujo no ideal y los valores numéricos de los coeficientes requeridos para el cálculo del sistema de llenado. Segundo, estos datos que a menudo son obtenidos por el uso de modelos para agua, fue necesario volver a establecerlos si los resultados se aplicaron por el mismo camino al metal líquido, y finalmente, el significado metalúrgico del comportamiento hidráulico se examinó con respecto a la calidad del metal líquido y las consiguientes propiedades de las piezas coladas.

Las relaciones hidráulicas básicas, las cuales se aplican a un flujo continuo en un sistema de llenado sencillo como el que se ejemplifica en este trabajo, muestran que para la evaluación numérica de flujo, es necesario obtener el coeficiente de pérdida de velocidad por fricción  $\xi$ , y en seguida las otras cantidades hidráulicas ( $v$ ,  $p$ ,  $Q$ ) podrán calcular

se por las condiciones del flujo aplicando la ecuación de Bernoulli. Si se considera un flujo ideal supuesto para un coeficiente de pérdida de velocidad por fricción  $\xi = 1$  o sea, sin pérdida de energía, los resultados obtenidos resultarán completamente engañosos debido a que la energía perdida es apreciable, como puede observarse en la gráficas 1 y 2, en donde el tiempo ideal de llenado del molde es mucho menor que el experimental e inclusive el teórico.

Se observa que los valores obtenidos para el tiempo experimental, para las diferentes temperaturas de colada ensayadas, no tienen elevada diferencia entre sí, aún cuando existen discrepancias, éstas se pueden considerar despreciables. Es importante notar que dichas discrepancias aumentan al aumentar el peso de la pieza moldeada. De semejante manera las diferentes humedades de la arena en el molde, no producen una alteración apreciable y la mayor diferencia se presenta al igual que en las temperaturas de colada en el mayor peso de pieza experimentada.

La razón de las discrepancias mencionadas, probablemente consistan en el hecho de que a mayor cantidad de metal colado mayor tiempo de colada y por lo tanto mayor interacción del flujo metálico con la superficie del molde de arena, esto además relacionado con la pérdida de temperatura del metal líquido, que en última instancia podrían modificar el factor  $\xi$ .

Tan importante como lo anterior, son las discrepancias que se originan entre los resultados teóricos y experimenta -

les, como puede observarse en las gráficas 1 y 2. la diferencia mencionada entre los tiempos de llenado tienden a reducirse conforme aumenta el peso de la pieza colada.

Por otra parte el factor de pérdida de velocidad teórica  $\xi$  como se observa en las gráficas 2 y 3, es mayor al  $\xi$  experimental para el menor peso de pieza ensayada, lo que no ocurre para las piezas de mayor peso y en donde la diferencia se incrementa para la pieza de 1.5 Kg.

## CONCLUSIONES

Al analizar los resultados obtenidos y observados en las gráficas 1 y 2, en donde los tiempos de llenado de las piezas experimentadas son semejantes entre sí, se concluye que la posible influencia de humedad y temperatura ensayadas, en el factor de pérdida de velocidad por fricción ( $\xi$ ) es mínima y puede considerarse despreciable para pesos de moldes de aluminio hasta de 1.5 kg.

Por otra parte es importante mencionar que el valor teórico de  $\xi$  permanece constante debido a que la geometría del sistema de colada es la misma para las tres piezas de peso diferente, lo cual no ocurre para un  $\xi$  experimental, en donde se da un ligero incremento al aumentar el peso de la pieza. Estas variaciones hacen pensar en la existencia de algunas variables no tomadas en cuenta en la ecuación y que interfieren en el valor de  $\xi$ . Ahora bien, estos incrementos que se van dando entre los valores de  $\xi$  experimental al pasar de un peso a otro, sin importar las humedades y temperaturas respectivas disminuyen al aumentar el peso, como puede apreciarse en las gráficas 2 y 3.

Al igual que en los tiempos el factor  $\xi$  no presenta variaciones apreciables entre las diversas humedades y temperaturas ensayadas, por lo que se puede decir con mayor formalidad que la influencia que podría tener la humedad y la tempe-

ratura experimentada en el factor  $\xi$  resulta despreciable.

Respecto a la bondad de los resultados experimentales, -  
cabe mencionar que definitivamente es necesario obtener un nú  
mero considerablemente mayor de puntos experimentales, es de-  
cir, evaluar un número mayor de muestras de distintos pesos -  
con objeto de definir claramente la tendencia del patrón expe  
rimental de  $\xi$  y  $\sigma$ , y entonces sí poder corregir con mayor efi  
ciencia el cálculo de los componentes para un sistema de cola  
da.

Para terminar cabe mencionar que las consideraciones hi-  
dráulicas como las que se introdujeron en este texto, son de -  
considerable interés práctico, en donde los principios discu-  
tidos no sólo permiten un mejor entendimiento del desarrollo -  
de la práctica empírica, sino también hace posible el perfec-  
cionamiento de un gran número de diseños de elementos de lle-  
nado y la invención y aplicación de métodos de control de ca-  
lidad para la pieza colada.

B I B L I O G R A F I A .

- 1.- A.F.S. ; Recommended Practices for Sand Casting Aluminum and Magnesium Alloys. p.35. A.F.S. 1965.
- 2.- PIERRE BARRAN.; ROBERT GADEAU. Enciclopedia del Aluminio Vol. 4. U.R.M.O. Bilbao 1967. p.39,40.
- 3.- A.D. SARKAR, M. ENG., B. Sc. Mould and Core Material for the Steel Foundry. Pergamon Press. 1967.
- 4.- LATIMER AND READ. A Review of Theruning Gating and Feeding Aluminium. Sand Casting. British Foundry-man. 1976.
- 5.- A.F.S. ; Copper Base Alloys Foundry Practice. A.F.S. 1965.
- 6.- V. KONDIC. Metallurgical Principles of Founding. Edward Arnold Publishers. London 1968.
- 7.- G.H. GEIGER. ; D.R. POIRIER. Transport Phenomena in Metallurgy. Addison-wesley Publishing Company.
- 8.- JOSE ALEJANDRO GARCIA HINOJOSA.; ANDRES GUTIERRES BAENA. Calculo del Sistema de Colada y Alimentación en Piezas de Hierro Gris. Tesis 1982.
- 9.- A.S.M. Metals Handbook. Vol. 5. Forging and Casting p.35. 1970
- 10.- ROSENTHAL, LOPER, HEINE. Principles of Metal Casting p.275. A.F.S. 1967.