



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

19  
24

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
CAMPUS ARAGON.

DISEÑO DE UN SISTEMA DOSIFICADOR  
DECOLADA CONTINUA.

**T E S I S**

Que para obtener el Título de:

**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

P r e s e n t a:

**EDUARDO CASTILLO CADENAS**

Asesor: M. en C. Daniel Aldama Avalos



México D. F. 1997

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



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 esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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

## **AGRADECIMIENTOS**

### ***A mis padres Eduardo y Rosalia:***

Por su desmedido apoyo y su profundo amor hacia mí, rindo un homenaje a tan admirables personas que me inculcaron valores de honestidad, superación y sentido de responsabilidad, bases que hicieron de mí una persona de bien.

### ***A mis hermanos Martín, Claudia y Mildred:***

Por su comprensión y cariño. Que este logro sirva como una exhortación para que luchén siempre por defender sus ideales.

### ***A mis amigos y profesores:***

Por los buenos momentos en la Universidad.

## INTRODUCCION

*Hace no muchos años, el concepto "calidad" se reflejaba en la satisfacción de ciertos requerimientos específicos tales como resistencia, acabado, aspecto, etc. y entonces se decía: "Si mi producto se encuentra dentro del rango de defectos admisible tiene calidad", no obstante, todo ello se llevaba a cabo sin considerar el derroche de recursos y la mala aplicación de los procesos, tan era así que llegó a haber un tiempo en que las chimeneas eran sinónimo de progreso. Sin embargo, ante la creciente abertura de los mercados ha surgido una tremenda competencia a nivel local o internacional. Tal situación nos obliga utilizar menos recursos con más eficiencia lo cual redundará en la disminución de los costos y aumento de producción, así como mejoramiento de la calidad de los procesos y de los productos, y más aún la completa satisfacción del cliente. Esto da origen a dos circunstancias que dan cabida a la justificación del presente estudio: la tendencia a nivel mundial del empleo de materiales más livianos y con mayor resistencia así como la correcta utilización de tecnologías y recursos disponibles, ambos factores claves para que un país atrasado tecnológicamente como México emprenda la ruta hacia el desarrollo, lo cual desde luego se verá reflejado en el mejoramiento de la calidad de vida. Una de aquellas tecnologías es la Colada Continua la cual forma gran parte del proceso productivo de la fabricación de perfiles estructurales como: tubos, chapa, alambre, etc., productos que juegan crucial importancia en todas las ramas de la economía. Teniendo conocimiento de ello surgió la inquietud por parte de un grupo de alumnos de la "UNAM Campus Aragón dirigidos por el Ingeniero Daniel Aldama Avalos de desarrollar e investigar las características del proceso de Colada Continua así como hacer un modelo a pequeña escala de su comportamiento. El proyecto que actualmente está llevándose a cabo se dividió en varias secciones debido a su gran envergadura. Es así como una de las partes correspondió al diseño del sistema dosificador lo cual ocupa la atención de esta tesis. A fin de cumplir este cometido de la manera más sencilla y estructurada se usó una metodología llamada "Ciclo del diseño", y como consecuencia cada una de sus etapas constituye el ordenamiento del desarrollo el cual se ordeno en cinco apartados:*

**APARTADO PRIMERO:** "Surgimiento de la necesidad".- *Se da el valor de importancia, utilidad y trascendencia al desarrollo del proyecto así como sus necesidades globales, lo cual también se podría denominar como Presentación del proyecto.*

**APARTADO SEGUNDO:** "Análisis del problema".- *Se van definiendo gradualmente los objetivos yendo de lo general a lo particular hasta que ya se tengan los requerimientos finales bien detallados y que a su vez se deban satisfacer, de esta manera se divide la información como sigue; CAPITULO I. La colada continua de los metales no ferrosos, CAPITULO II. Funciones del sistema dosificador, CAPITULO III. Las aleaciones ligeras más usadas en México y CAPITULO IV. Los refractarios en el sistema dosificador.*

**APARTADO TERCERO:** "Generación de alternativas de solución".- *Una vez que se han planteado las necesidades reales del problema se proponen diversas soluciones tomando en consideración aquellos aspectos que influyen con mayor fuerza en el sistema acoplado gradualmente aquellas que tienen menor relevancia en el comportamiento y*

*que son más fáciles de atacar. De esta manera la obtención de las soluciones se lleva a cabo a través de los temas: CAPITULO V: Determinación de los recipientes, CAPITULO VI. Determinación del sistema de control de temperatura y CAPITULO VII. Determinación de refractarios.*

**APARTADO CUARTO "Evaluación y Decisión".-** *Una vez que se plantean varias alternativas es necesario probar y/o desarrollar criterios o elementos por medio de los cuales se muestre el comportamiento de las características mas importantes de aquellas soluciones que demuestran ser más funcionales, lo cual se desarrolla en el CAPITULO VIII. Evaluación de las soluciones.*

**APARTADO QUINTO "Especificación de la solución".-** *Se detalla la alternativa más efectiva con la finalidad de hacerla entendible para su fabricación, lo que se lleva a cabo en el CAPITULO IX. Especificación de la solución y por último CAPITULO X. Conclusiones y recomendaciones.*

# APARTADO PRIMERO

## PRESENTACION DEL PROBLEMA

*El proceso que nos ocupa en este documento tiene gran importancia como ya apuntábamos. No obstante surgió la necesidad de comprobar esto con la finalidad de evaluar la trascendencia y necesidad al respecto lo cual debe ser punto de partida antes de abordar cualquier proyecto, es por ello que como primera etapa se procedió a realizar ello a través de la siguiente información:*

### JUSTIFICACION DEL PROBLEMA

La investigación de la valoración de importancia de un proyecto es una tarea ardua y complicada y mientras más sean los recursos invertidos para satisfacerlo mayores deben ser los fundamentos para su aprobación y puesta en marcha. Por esta causa, se decidió llevar a cabo una pequeña investigación a fin de vislumbrar la situación del mercado Nacional de los productos no ferrosos. En otras palabras lo anterior se puede desglosar en los objetivos siguientes:

- Verificar que existe un mercado potencial insatisfecho y que es viable desde el punto de vista operativo, introducir en este mercado el producto objetivo de estudio.
- Demostrar que tecnológicamente es posible producirlo, una vez que se verificó que no existe impedimento alguno en el abasto de los insumos necesarios para su producción.
- Demostrar que es económicamente rentable llevar a cabo su realización.

La industria Nacional de los no ferrosos incluye entre las aleaciones más importantes las de bronce las cuales se utilizan en miembros que están sujetos a fricción, el Zamac con una participación importante en los productos inyectados, el Zinalco con aparición reciente en el mercado con importancia en los productos laminados, extruidos e inyectados, el latón y el cobre para galvanoplastia, y el aluminio el cual presenta particular importancia dada su mayor participación en el mercado, por tal motivo se decidió tomar este sector estudiando la situación Mundial y Nacional lo cual se trata a continuación.

### AMBITO MUNDIAL DE LA COLADA CONTINUA Y DE LOS PRODUCTOS DE ALUMINIO.

**Actualmente, la industria metalúrgica es un ramo muy importante así como un buen indicio de la economía de un país. Pero desgraciadamente se encuentra rezagada al ritmo de los avances de la modernización por lo cual ha experimentado una profunda reestructuración en los últimos quince años [1]. Aunado a ello, su capacidad no alcanza a**

cubrir la creciente demanda mundial de productos metálicos, por ejemplo, la situación del acero que se muestra en la Fig. 1 donde claramente se nota como la capacidad de producción ha sobrepasado con creces la capacidad de la infraestructura para conformarlo [21]. Tal situación se torna aun mas critica cuando la exigencias actuales son fabricar productos de mejor calidad y a menor costo. Como ejemplos muy tangibles de estos requerimientos son que el consumo mundial del acero es aún mayor que el de la madera y que las latas de aluminio para envases están compitiendo a la par con las botellas tradicionales de vidrio [2, 21]. Esta última situación se justifica cuando el material que le sigue en importancia al acero es sin duda el aluminio, cabe destacar el hecho de que en tan sólo cien años su demanda a aumentado en forma masiva, no obstante que en 1972 era considerado una asombrosa rareza en la que se producian en todo el mundo dos toneladas. Más aun, el aumento acelerado de su desarrollo, producción y consumo destaca considerablemente al compararlo con otros metales no féreos en el periodo de 1970 a 1980 como se observa en la Fig 2 [5], lo cual no hubiera sido posible sin la Colada Continua ya que para 1981 y veinte años atrás los productos semiterminados fueron en su mayoría conformados mediante esta técnica [9].

## MERCADO NACIONAL DE LOS PRODUCTOS DE ALUMINIO.

El análisis de la situación de la industria nacional se puede dividir en dos sectores, los cuales tratan de los recursos nacionales internos y externos respectivamente. Aunque los datos mostrados tienen por lo menos dos décadas de retraso nos dan una idea clara de la tendencia del mercado en los últimos años así como de sus prioridades más importantes.

### *PRODUCCIÓN NACIONAL E INFRAESTRUCTURA.*

En México, el aumento del consumo del aluminio se remonta a la década de los setentas cuando el incremento anual de la demanda fue 9%, superior a tres puntos porcentuales al crecimiento de la economía. Para 1981 tal crecimiento alcanzó su nivel más alto con cerca de 200 mil toneladas de las cuales cerca de 142 mil fueron productos terminados importados y el resto productos manufacturados a partir de alumina importada en plantas nacionales. El 60% de esta producción se destinaba a la industria de la construcción. Como se muestra en la gráfica de la Fig. 3 el consumo nacional aparente (demanda) es muy alta en relación a los insumos existentes en el país [2].

Otra de los principales activadores del consumo lo constituyó la Industria del envase, con la entrada al mercado de la tapa abre fácil, ya que sólo este producto llegó a significar en 1980 cerca del 10% del consumo total y debido a la integración de la lata en dos piezas de aluminio se estimaba que el crecimiento de este producto sería tan espectacular que llegaría a significar poco más de 25% del consumo Nacional de 1990.

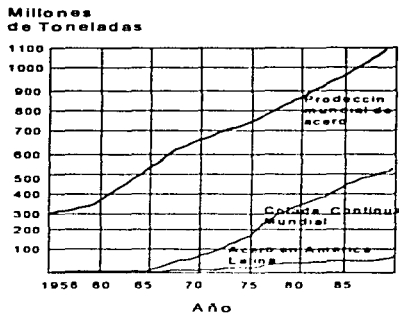


Fig. 1. Proyecciones de la producción de acero y del proceso de la Colada Continua de acero [16].

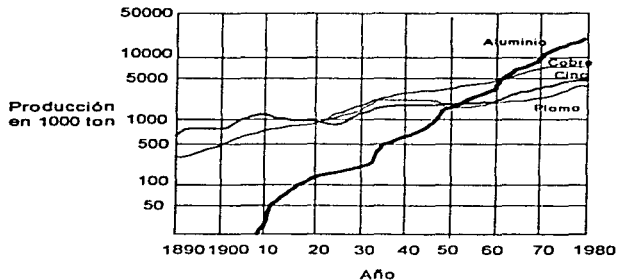


Fig. 2. Producción mundial de aluminio, cobre, cinc y plomo en 1000 toneladas e intervalos de 10 años (ordenadas, escala logarítmica) [5].



Para principios de la década de los Ochentas la Industria Nacional contaba con instalaciones fabriles capaces de manufacturar casi la totalidad de la gama de productos de aluminio. En esa época se tenían problemas estructurales que podían afectar su crecimiento tales como el incipiente abastecimiento de aluminio primario, un mercado de chatarra desordenado y subdesarrollado o inexistencia de equipos de laminación, obteniéndose en este campo productos competitivos en los mercados internacionales. Sin embargo, el único segmento más crítico era el aluminio primario ya que en este sector la demanda supero en tres veces a la capacidad de producción. En 1982, para los demás segmentos se estimaba que para 1985 se cubrirían totalmente estas necesidades [2].

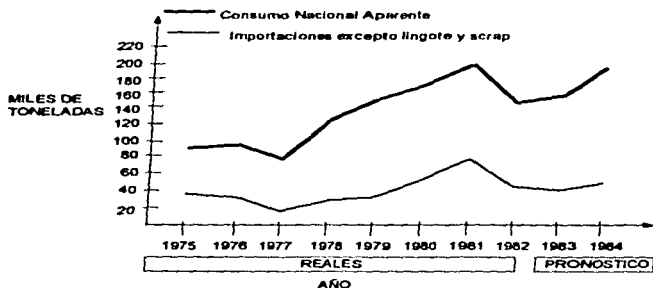


Fig. 3. Consumo Nacional aparente de aluminio y sus productos según Alcan Aluminio S.A. de C.V. [2].

Pese a todos estos aumentos espectaculares existen ciertos productos que han tenido una fuerte contracción debido al profundo detrimento del poder adquisitivo de los mexicanos en los últimos años. Por ejemplo, durante la década de los sesentas el crecimiento del consumo del papel, lámina y chapa fue en general de un 12% anual. Para la década de los ochentas se esperaba una contracción del 8 al 9% del papel debido a la crisis económica, lo cual también afectó a la chapa y lámina cuya demanda se contrajo, ya que en 1985 se estimaba sufriría un repunte de hasta 25 mil toneladas que se tenían en 1980 [2]. Otro ejemplo similar es el caso de los productos extruidos, ya que en la década de los ochentas se estimaba que las tasas de crecimiento se contrajeran a 3 y 4% anual, siendo que tenían una tasa de crecimiento del 12% en los sesentas [2].

## IMPORTACIONES

El sector de importaciones en productos semielaborados a crecido abundantemente , muestra de ello es que durante los sesentas se tenía un promedio de crecimiento de 4% anual, y en los ochentas llegó a cubrir el 37% sobre el consumo Nacional aparente a causa de la liberación de importaciones. En el mismo año se estimaba que durante la década de los ochentas el segmento de importaciones se verá deprimido por la carencia de divisas. En ese entonces los principales productos importados habían sido: barras de conductores eléctricos, lámina para tapa abre fácil y chatarra. En la Tabla I se muestra el consumo aparente de las tres últimas décadas y el promedio de crecimiento en el lapso transcurrido entre cada una de ellas

## FORMULACION DEL PROBLEMA

De lo anteriormente expuesto surgen las necesidades principales que se deben cubrir por medio de satisfactores, lo cual se expresa como sigue.

"La creciente demanda de los productos no ferrosos en México y el mundo, en particular el aluminio, a alentado su fabricación a gran escala [1] Al mismo tiempo, los requerimientos de calidad a nivel mundial se han incrementado en las últimas décadas lo cual permite reducir los costos de producción [2] En particular, en México se deben crear tecnologías con las que se puedan lograr las exigencias anteriores de tal manera que los productos con iguales o mejores propiedades que el aluminio puedan ser producidos cubriendo la demanda interna. Benéficamente, la reducción de los costos de producción hará más accesible los productos manufacturados, pese a la profunda crisis económica. Tales necesidades están ampliamente soportadas en la justificación del problema".

AÑO	1970		1980		1990
LAMINA	12.0	12%P.Y.	37.6	7%P.Y.	77
PAPEL	3.8	12%P.Y.	11.4	9%P.Y.	27
EXTRUSION	12.2	12%P.Y.	36.8	3%P.Y.	48
PASTA Y POLVO	0.2	22%P.Y.	1.5	7%P.Y.	3
FUNDICION	8.2	19%P.Y.	47.8	4%P.Y.	70
CABLE Y OTROS	25.9	3%P.Y.	33.7	5%P.Y.	54
PROMEDIO	62.1		168.8		279.9
PROMEDIO		11%P.Y.		5%P.Y.	

P.Y = Promedio de crecimiento en el lapso de cada década.

Tabla I. Consumo Nacional aparente por sector (miles de toneladas) según Alcan Aluminio S.A. de C.V. [2].

## APARTADO SEGUNDO

### MARCO TEORICO O ANALISIS PREVIO

*El problema que se presenta se ha formulado de manera general con la finalidad de limitar sus fronteras, pero aun así sigue siendo enorme. De tal manera que se requiere dar una completa definición del problema a través de la recopilación de información en el ámbito de estudio y así mismo, aquella información que sea inútil deberá rechazarse con lo que se evita hacer más complicado el problema. De todo ello surgen las dificultades reales a atacar.*

*Tal investigación se llevo a cabo a través de cuatro temas considerablemente extensos:*

**CAPITULO I.** La Colada Continua de los metales no ferrosos.

**CAPITULO II.** Funciones principales del sistema dosificador.

**CAPITULO III.** Las aleaciones ligeras más usadas en México.

**CAPITULO IV.** Los refractarios en el sistema dosificador.

# CAPITULO I

## LA COLADA CONTINUA DE LOS METALES NO FERROSOS

Al abordar el desarrollo del proyecto fue necesario tratar diversos temas clásicos en el ámbito de la Colada Continua dando un enfoque a los productos no ferrosos y su sistema dosificador con la finalidad de delimitar y adentrarnos en la materia. Los temas escogidos fueron los siguientes:

- A).- Historia de la colada continua.
- B).- Evolución de la colada continua.
- C).- Concepto principal de la colada continua.
- D).- Alcances y limitaciones de la colada continua.
- E).- Métodos y sistemas desarrollados de colada continua

### 1.1.- HISTORIA DE LA COLADA CONTINUA.

Quizá el primer método para manufacturar piezas coladas de metal fue sistema en molde permanente el cual presenta dificultades operativas y necesidad de mejoramiento de sus productos, situación que dio origen a la búsqueda de otras alternativas que superaran tales dificultades. No fue sino hasta 1850 cuando Henry Bessemer, que inventó la fabricación de acero en convertidor en los últimos meses de 1855 y los primeros de 1856 fue el primero que ideó y patentó la idea de la colada continua en la segunda mitad del Siglo XIX, en los años en que la fabricación de acero en convertidores Bessemer por soplado de aire se desarrollaba con gran éxito en todos los países industriales y aumentaba extraordinariamente la producción de acero en el mundo [4].

La idea proyectada por Bessemer que no se llegó a construir debía colar acero entre dos cilindros metálicos refrigerados interiormente por agua (Fig. 4). El empleo de la colada continua se abandonó por esta época debido a que no existían los adelantos tecnológicos propicios para su utilización al surgir muchos problemas para su operación. Aunque desde 1910 se retomó el concepto en los Estados Unidos, no fue sino hasta 1930 cuando se llevaron a cabo estudios semiindustriales serios en Alemania y los Estados Unidos los cuales condujeron en 1935 a las primeras realizaciones industriales que se usaron para la fabricación de secciones grandes de bronce [ 5].

En Francia, los primeros ensayos se efectuaron hacia 1937. La primera instalación de Colada Continua de aluminio funcionó en la fábrica Faremoutiers de la Cégédur (entonces Société du duraluminium)

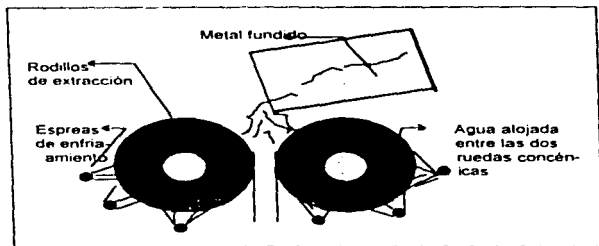


Fig. 4. Esquema de la máquina de colada continua proyectada por Bessemer.

## 1.2.- EVOLUCIÓN DE LA COLADA CONTINUA.

La evolución de la colada continua comienza en el año de 1918 cuando el alemán G. Coats desarrolla un sistema de control automático para alimentar el molde dependiendo del nivel del metal, con ello se resolvió uno de los principales problemas que impidieron el desarrollo de la colada Continua en los tiempos del Bessemer [6]

Para 1933, la primera planta industrial de bronce desarrolla el concepto del molde oscilante, inventado por el alemán S. Jungmans con la finalidad de evitar la adherencia del metal fundido en las paredes del molde [6] Poco después en los Estados Unidos se implementa la alternativa de lubricar las paredes del molde [7]

Durante la década de los cincuentas se desarrollan varios tipos de sistemas de colada continua para aluminio mediante los cuales se consigue ampliar la diversidad de productos de aluminio y sus aleaciones con mayores velocidades de producción que para las secciones transversales grandes [5]

En 1956, una Compañía Suiza patenta la producción de billet de acero en máquina y en Alemania se introduce el sistema de colada continua curva con lo que se evitan gran cantidad de problemas que se presentan mediante el sistema de colada continua

vertical, lo que condujo a la implementación de un molde curvo para 1961 en Gran Bretaña [7]

Un avance que marcó aún más la ventaja de la producción en colada continua sobre el sistema de molde permanente respecto a la producción, fue la colocación de varias boquillas en la unidad de alimentación, lo cual hizo aumentar dramáticamente la producción en Gran Bretaña para 1964 [7]. Esta situación y otras mejoras hacen que en los años sesentas los fabricantes de acero y aluminio sustituyan el de molde permanente por el método continuo [8]. A partir de 1970 hasta hoy en día, se marcó la pauta para el perfeccionamiento de muchas características de operación y el mejoramiento de los productos obtenidos por las siguientes razones:

- A) - Mejoramiento constante de la calidad
- B) - Aumentar la versatilidad de la colada continua

### ***1.2.1.- MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD.***

Los requerimientos de calidad han aumentado paralelamente al desarrollo de la colada continua y en ese ámbito se incluyen los importantes aspectos del mejoramiento de la microestructura y la reducción del espesor de cáscara defectuosa donde se aloja la mayoría de la escoria en los productos solidificados. La capa superficial de escoria en los productos terminados es indeseable cuando se les da un proceso posterior tal como el galvanizado [5]. Los aspectos más significativos tendientes a mejorar esto se mencionan en la Fig. 5.

### ***1.2.2.- AUMENTAR LA VERSATILIDAD DE LA COLADA CONTINUA.***

La necesidad en este campo ha sido ampliar la gama de aleaciones y medidas que es posible obtener por medio de la colada continua, como por ejemplo el zinalco por colada semicontinua y algunos aceros inoxidables en máquinas de colada continua de molde móvil. Por tal motivo se han llevado a cabo bastantes pruebas a fin de evaluar el comportamiento y características de multitud de materiales y variantes. Ambos aspectos se verán más adelante.

### **1.3.- LIMITACIONES Y VENTAJAS DE LA COLADA CONTINUA.**

Los dos métodos de colada en molde por gravedad más conocidos y usados hoy en día son: la colada en molde permanente y la colada continua. Ambos se adaptan para producir productos de perfil constante. Los puntos de vista que marcan la diferencia entre uno y otro se refieren a:

A).- El punto de vista operacional y,

B).- El punto de vista metalúrgico

A) Para el acero y el aluminio.	<ol style="list-style-type: none"><li>1 - Mejoramiento de las prácticas de desgasificación en la unidad recibidora así como el uso de diferentes fundentes [7 ]</li><li>2 - Fabricación y pruebas de comportamiento de diferentes materiales refractarios para accesorios y recipientes de colada continua [54 ]</li><li>3 - Diseño de diferentes tipos de enfriamiento y moldes que mejoran la microestructura del metal colado [8]</li><li>4 - Implementación de diversos métodos de control automático, automatización y semiautomatización [11]</li><li>5 - Analizar el comportamiento del espacio de aire al afectar las características de enfriamiento en el molde [2]</li><li>6 - Analizar el enlace de la colada continua en conjunto con el tratamiento térmico y la laminación</li></ol>
B) Para el acero.	<ol style="list-style-type: none"><li>1 - Uso de modelos hidrodinámicos para analizar la separación de escorias así como la estratificación de la temperatura en los recipientes para analizar las pérdidas de calor y temperatura de drenado [12 ]</li></ol> <p>También se han implementado varios métodos para favorecer la separación de la escoria así como para reducir las pérdidas de calor [10]</p> <ol style="list-style-type: none"><li>2 - Se están investigando las causas del taponamiento de las boquillas e implementación de diversos métodos para evitar esto [12]</li><li>3 - Analizar como afecta la oscilación en el molde y la velocidad de extracción a la microestructura del colado continuo e implementación de diversos métodos para mantener el nivel estable así como el rozamiento en el molde [13,14]</li></ol>

Fig. 5 Avances que han impulsado el desarrollo de la colada continua

### 1.3.1.- PUNTO DE VISTA OPERACIONAL.

En general, se puede decir que la colada continua tiene indiscutibles ventajas con respecto a el colado en molde permanente en la calidad de los productos obtenidos y en el ahorro de costos de producción pero tiene la limitante de que es más rentable utilizarla para alta producción. A continuación se muestran ambos aspectos comparando los dos métodos anteriormente mencionados

### *1.3.1.1.- Método de colada en molde permanente.*

La colada en molde por gravedad es la técnica de verter un metal líquido en un molde enfriado. Posteriormente el metal vaciado se enfría solidificándose dentro del molde y así se obtiene el producto deseado [15]. Este procedimiento presenta grandes inconvenientes de orden técnico y económico

- Puesta a punto de un material complicado y costoso, en general poco manejable y embarazoso [5]
- Pequeña producción unitaria como consecuencia de la existencia de tiempos muertos resultantes en particular del exceso de tiempo necesario para el desmoldeo y la alimentación.
- La velocidad de enfriamiento del metal está limitada por la capa de aire, mal conductor del calor, que se forma al principio de la contracción del metal y que lo aísla de las paredes del molde

Tales inconvenientes van aumentando evidentemente cuando la aleación tiene un intervalo de solidificación más amplio y cuando la sección del producto que se solidifica es mayor [5]

### *1.3.1.2.- Método de colada continua.*

La colada continua tiene indiscutibles ventajas

- Aumenta enormemente la velocidad de producción
- Brinda la posibilidad de enlazar varios procesos en línea y con ausencia de tiempos muertos, tales procesos son

1 -Fundición

2 - Colado

3 -Tratamiento térmico

4 - Laminación

- Disminución de operaciones del proceso. Para demostrarlo, solo bastará decir que existe una reducción de siete pasos al hacer la comparación de la colada por moldeo con la colada continua

Pero las ventajas anteriores engendran en su seno una gran complejidad en el diseño y mantenimiento puesto que a medida que se requieren productos de mayor calidad los métodos y controles de operación son más sofisticados y aun cuando la operación tiene un principio muy sencillo, cualquier error o variación el proceso repercute enormemente en las características del producto y reduce su producción



- Brinda la posibilidad de colar una gran cantidad de productos, tales como billet, tocho, palanquilla, placa, lámina, alambre, formas especiales, ect Para ello existen sistemas de colada continua de varios tipos especialmente diseñados para cada producto, esta versatilidad se amplía con la colocación en línea de varios procesos

### **1.3.2.- PUNTO DE VISTA METALÚRGICO.**

En la Tabla II se puede visualizar prácticamente las diferencias entre el colado por moldeo y la colada continua. A continuación se dan más detalles al respecto para ambos

#### **1.3.2.1.- Método de colada por moldeo.**

Este método tiene como limitación las regulares velocidades de enfriamiento que son posibles de alcanzar, lo cual da origen a los siguientes inconvenientes

- Aumentan las segregaciones principales y la obtención de estructuras micrográficas más o menos groseras o heterogéneas
- El método de disipación de calor por las paredes del molde favorece la formación de una zona más o menos porosa en la región central de la pieza. Esta zona se solidifica en último lugar a una velocidad muy pequeña, lo que da lugar a concentración de gases disueltos. Tal efecto aumenta proporcionalmente a la cantidad de componentes secundarios que tiene la aleación (añadidos casi siempre como endurecedores) y da origen al desarrollo de constituyentes intermetálicos groseros. Ambos fenómenos contribuyen a aumentar la fragilidad durante las transformaciones en caliente y favorecen la formación de sopladuras en el metal laminado y recocido

Reiterando lo visto en el subcapítulo 1.1 las bajas velocidades de enfriamiento así como los problemas operacionales mencionados alentaron a los fabricantes a investigar un nuevo método lo que dio origen a la colada continua [5]

#### **1.3.2.2.-Método de colada continua**

Existen dos aspectos inherentes al proceso de la colada continua que limitan los alcances del producto obtenido en cuanto a su microestructura, composición de la aleación así como la velocidad de producción, tales aspectos son

##### **1.3.2.2.1 - Velocidad de enfriamiento.**

Invariablemente, la velocidad de enfriamiento es más alta que mediante el método de colada por moldeo, no obstante a este conveniente, los fabricantes han tenido la necesidad de aumentar aún más la velocidad de la colada para aumentar la producción, pero entre mayor es la velocidad se incrementan los siguientes aspectos

- La velocidad de solidificación muy rápida da lugar a que exista muy poca oportunidad para la difusión entre los componentes de la aleación, lo cual se llama segregación. Tal defecto puede ser atenuado posteriormente mediante un tratamiento de homogeneización
- Al aumentar la formación de cristalizaciones orientadas (maclas), sobre todo si se forman cerca de la superficie puede tener influencia desfavorable sobre la laminación posterior [5]

#### 1.3.2.2.- Composición de la aleación

Los componentes de la aleación influyen decisivamente en la facilidad del colado en dos aspectos

- Aquellos componentes que endurecen y generan óxidos o escoria deberán existir en proporciones limitadas y variarán según el tipo de máquina de colada continua, como se puede observar en la Tabla IV en la columna del contenido permitido de magnesio [6]. La tendencia a la rotura del perfil colado constante aumenta con la cantidad de aleantes secundarios y sucede preferentemente cuando se agregan elementos endurecedores, susceptibles de ponerse en solución sólida y de precipitarse por efecto del fuerte enfriamiento en el molde [5]
- El aumento de la proporción de eutécticos tiene como efecto la reducción de las grietas y mejora la colabilidad [5]

### 1.4.- CONCEPTO PRINCIPAL DE LA COLADA CONTINUA

Existen diversos métodos al respecto, pero el sistema que muestra en esencia las características del proceso es la máquina de colada continua vertical para acero y para su funcionamiento se explica a través de la Fig 7. En la cual se muestra cada una de las etapas que presenta el recorrido que tiene la materia prima. La primera de ellas es la recepción del metal líquido el cual previamente ha sido fundido en un horno y acto seguido se vacía en la Cuchara para posteriormente transvasarse a el tundish. Ambos recipientes constituyen el sistema dosificador el cual tiene especial importancia en la preparación del metal líquido que ha de drenarse nuevamente hacia el molde de enfriamiento (El cual puede decirse que es un intercambiador de calor ya que es enfriado por el exterior con agua) adonde se solidifica. Posteriormente, el producto se extrae mediante un tren de rodillos de tal manera que se obtenga una sección continua sólida que después es cortada en pedazos por medio de una sierra o soldadura de gas. Reiterando, el proceso se resume en el cuadro sinóptico de la Fig 6.

### COLADA POR MOLDEO

- Cilindricidad dudosa
- Concentricidad imperfecta
- Superficies interna y externa muy rugosas
- Numerosos defectos de fundición (porosidad, microporosidad, soplado, ect)
- Barras de pequeña longitud que ocasionan desperdicios
- Características no uniformes
- Mala repartición de los constituyentes de la aleación
- Todos estos inconvenientes originan a su vez otros
- Precisión dudosa del modelo de arena
- Mayor o menor habilidad del obrero moldeador

Caida del metal del cazo en el molde, que se traduce por turbulencia y gotas frias

- Contacto del metal fundido con la humedad y el gas que contiene la arena
- Enfriamiento muy largo, debido a la mala conductividad de la arena

### COLADA CONTINUA

- El paso del estado liquido al sólido del metal se efectua totalmente al abrigo de agentes atmosféricos, por lo que en esa parte del proceso no hay ninguna oxidación del metal
- No hay caída del metal, es decir, turbulencias ni gotas frias
- La hileria o dado mecanizada con precisión ofrece una pared muy lisa
- El enfriamiento se hace regularmente y es uniforme en todos los puntos de la barra
- El enfriamiento se hace regularmente y es uniforme en todos los puntos de la barra
- Se ejerce sin cesar una presión sobre el punto de transformación del estado liquido al sólido, lo que dara una estructura excepcional (más compacta) del metal
- Finalmente, en la solidificación continua vertical, tiene origen un ligero fenómeno de remolino lo que da más oportunidad a que los componentes de la aleación se difundan consiguiéndose una repartición perfecta de los elementos constituyentes
- Se obtiene una cascara solidificada mas limpia y lisa en lugar de una corteza rugosa e interna, lo que permite reducir los sobreesesores de mecanizado a 1/16 pulgada o 1.5 milímetros

Tabla II. Ventajas y desventajas del método de colado por moldeo y el método de colado continuo para piezas de bronce sólidas y huecas [15]

## **1.5.- METODOS DE COLADA CONTINUA PARA METALES NO FERROSOS DE BAJO PUNTO DE FUSION.**

La necesidad de obtener diversos productos por medio de la colada continua impulso el desarrollo de varios tipos de máquinas especialmente adaptadas por sí solas a un tipo de producto en particular las cuales se clasifican comúnmente como se muestra en la Fig. 8

Dicha clasificación se puede dividir en dos métodos. El colado continuo directo y en molde con desplazamiento o móvil. La diferencia entre ambos es que el primero se adapta para secciones transversales grandes y el segundo a secciones transversales delgadas. Las secciones medianas se pueden imputar a cualquiera. Las únicas excepciones a estas aseveraciones es que en el volumen 15 de Metals Handbook se reporta que mediante la máquina tipo Properzi se han logrado colar productos de sección transversal grande (650 milímetros) la cual no corresponde al desarrollo de esta tesis [7].

Otra diferencia importante es que los métodos adaptados para secciones transversales pequeñas tienen velocidades más altas de producción que el método directo, lo cual se comprueba comparando las velocidades de enfriamiento entre ambos en las Tablas III y IV. Una excepción es la moderna puesta en marcha de un tipo de colada horizontal que usa un molde con desplazamiento, lo cual significa un avance enorme en la colada continua ya que permite la obtención de secciones transversales grandes con altas velocidades de producción relativas [17]. Retomando el cuadro sinóptico de la Fig. 8 se observa que en cada método hay varios tipos de máquinas cuyas características principales se ven a continuación.

### **1.5.1.- TIPOS DE MÁQUINAS DE COLADA CONTINUA DIRECTA.**

El método de colada continua directa es apto para procesar secciones transversales grandes dado que requiere una altura metalostática (energía potencial) considerable para que en el momento del drenado, el flujo adquiera energía cinética de tal magnitud que sea mayor que la fuerza de fricción en el molde con la finalidad de que el flujo pueda abandonar el molde continuando su movimiento descendente [17]. Las características principales de las máquinas de esta familia y su clasificación se puede dividir en dos métodos. El colado continuo directo y en molde con desplazamiento o móvil. La diferencia entre ambos es que el primero se adapta para secciones transversales grandes y el segundo a secciones transversales delgadas. Las secciones medianas se pueden imputar a cualquiera. Las únicas excepciones a estas aseveraciones es que en el volumen 15 de Metals Handbook se reporta que mediante la máquina tipo Properzi se han logrado colar productos de sección transversal grande (650 milímetros) la cual no corresponde al desarrollo de esta tesis [7]. Otra diferencia importante es que los métodos adaptados para secciones transversales pequeñas tienen velocidades más altas de producción que el método directo, lo cual se comprueba comparando las velocidades de enfriamiento entre ambos en las Tablas III y IV. Una excepción es la moderna puesta en marcha de un tipo de colada horizontal que usa un molde con desplazamiento, lo cual

significa un avance enorme en la colada continua ya que permite la obtención de secciones transversales grandes con altas velocidades de producción relativas [17]. Retomando el cuadro sinóptico de la Fig. 8. se observa que en cada método hay varios tipos de máquinas cuyas características principales se ven a continuación, sin embargo, será conveniente revisar nuevamente la Tabla III.

ZONA	FUNCIONES PRINCIPALES	ELEMENTOS
I. Zona de fusión.	Recibe el mineral en bruto y lo funde.	A) Homo de fusión.
II Zona de dosificación.	Mantiene en buenas condiciones al metal fundido y favorece que al ser alimentado en el molde se encuentre en condiciones óptimas para ser enfriado durante el tiempo en que se efectúa la operación de la colada.	B) Cuchara (Unidad recibidora) C) Tundish (Unidad de alimentación)
III. Zona de enfriamiento.	Asegura una correcta solidificación del molde evitando el rompimiento del flujo continuo en la microestructura del producto terminado.	D) Molde enfriador. E) Enfriamiento mediante agua espreada.
IV. Zona de arrastre.	Ejerce una fuerza de arrastre del flujo continuo para contrarrestar la fuerza de fricción en el molde o aumentar la velocidad de colado.	F) Rodillos de arrastre.
V. Zona de corte.	V. Zona de corte. - Divide al flujo continuo en segmentos iguales a la longitud deseada.	G) Cortadora de oxiacétileno.
VI) Zona de recepción.	Atrapa los segmentos cortados y los voltea para colocarlos en los rodillos de arrastre para el siguiente procedimiento.	H) Volteador y rodillos de transporte.

Fig. 6. Partes y funciones de un sistema colada continua de acero.

#### 1.5.1.1.- Colada continua vertical.

Las partes de este tipo de colada continua y sus funciones principales ya han sido descritas anteriormente (Fig. 7). Es el primer sistema que se utilizó y tiene la ventaja de que su instalación es la más económica y sencilla. No obstante, tiene la desventaja de que exige naves de gran altura, que es un inconveniente grave (30 metros para planquillas de acero) lo cual se justificará en el artículo 1.5.1.3.

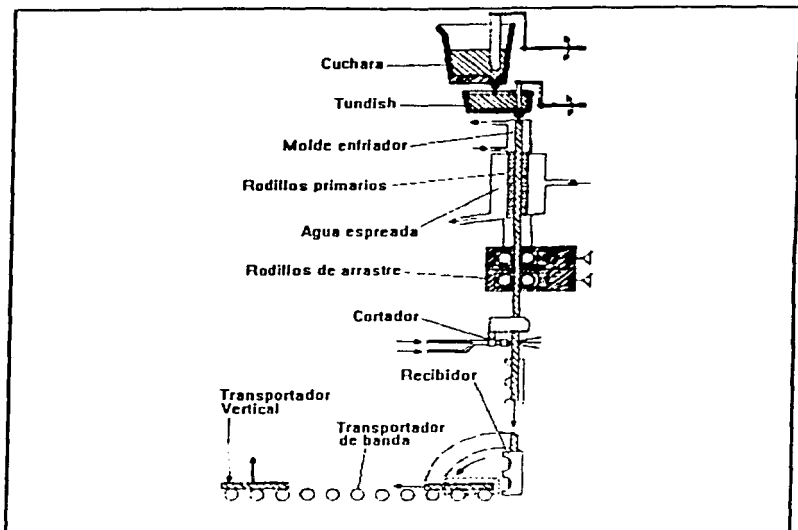


Fig 7. Partes y funciones principales de una máquina de colada continua vertical.

### 1.5.1.2.- Colada semicontinua.

Este método es casi igual al anterior. La diferencia entre ambos consiste en que en la colada semicontinua la extracción no se efectúa con un tren de rodillos, sino por medio de un falso fondo en el molde. El procedimiento se lleva a cabo como sigue. La Fig. 9a ilustra la operación. El metal líquido se vierte en un molde, que es una virola corta, de chapa delgada refrigerada por agua, cerrada en su parte inferior al comienzo de la colada por medio de un falso fondo ajustado capaz de desplazarse en sentido vertical. El agua

de refrigeración exterior del molde extrae el calor del metal líquido que se encuentra en el recinto del molde. Una vez que la sección transversal se ha solidificado suficientemente la barra falsa es extraída en un movimiento descendente y al mismo tiempo arrastra al perfil sólido con lo cual se inicia el colado continuo [5].

Tanto en la colada continua vertical como en la semicontinua se pueden usar dos tipos de moldes, el más usado se conoce como "convencional" (Fig. 9a [izquierda]) ya que parece ser que es el que más se usa en la actualidad debido a que brinda una estructura dendrítica más fina y el llamado "isométrico" (Figura 9a [derecha]) [19].

A) Método de colada continua directa (molde fijo u oscilatorio)	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 - Máquina de colada vertical</li> <li>2 - Máquina de colada semicontinua</li> <li>3 - Máquina de colada continua curva</li> <li>4 - Máquina de colada continua horizontal.</li> </ul>
B) Métodos de Colada Continua para secciones transversales delgadas (molde móvil).	<ul style="list-style-type: none"> <li>1.- Máquinas de colar con ruedas y banda flexible sin fin</li> <li>2 - Máquinas de bandas articuladas y de cintas lisas sin fin</li> <li>3 - Máquinas de colada continua entre dos rodillos</li> </ul>

Fig. 8. Cuadro Sinóptico de los métodos de Colada Continua para aleaciones no ferrosas

### 1.5.1.3. Colada continua curva.

Un avance en el desarrollo de la colada continua vertical lo constituye la instalación de la colada de doblado y enderezado. En este tipo de construcción la barra vertical (fondo falso) es desviada por debajo de los rodillos extractores al plano mediante rodillos dobladores. Con ello se suprime la limitación de la longitud de las barras cortadas; sin embargo, es necesario un mecanismo enderezador para alinear nuevamente la barra después de la desviación. Otra ventaja muy importante es que el producto se obtiene en forma horizontal [16].

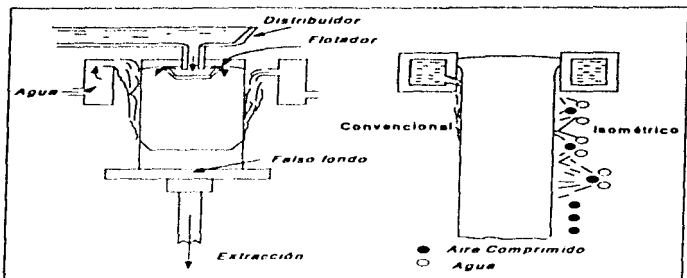
Tipo	Sección transversal [mm]	Velocidad de extracción [°C/s]	Medida de dendrita celular [µm]
Molde isométrico	560-670	0.1	200
Colada semicontinua	80-100	1	100-120
Colada continua vertical	76-850	1-5	20-70
Colada continua horizontal	50-650	1-10	15-30

Tabla III. Métodos de colada continua de aluminio en molde fijo [6]

#### 1.5.1.4.- Colada continua horizontal.

A finales de la década de los sesentas se demostró que este método aventaja a los métodos de molde fijo (colado continuo directo) en cuanto a su simplicidad, flexibilidad y rentabilidad, sin embargo, presenta críticas dificultades en la oscilación, lubricación y enfriamiento del molde [7,17,18]. Más aún, la experiencia en el manejo de la colada continua ha demostrado que entre mayor es la altura de la máquina (altura metalostática) aumentan en forma proporcional sus problemas de mantenimiento y costo. Estas desventajas se compensan en parte con el aumento de producción, pero de ninguna manera es recomendable su uso. Es así como los fabricantes, ante tales circunstancias implementaron el sistema de flujo continuo curvo con lo que se reduce sensiblemente la altura de la máquina (Fig. 10a-d). Esto trajo como consecuencia la disminución de la altura de dicha curva hasta que se llega a un punto en que la máquina es totalmente horizontal. Mediante este procedimiento se pueden colar secciones transversales de zinc, aluminio, cobre, plomo y diferentes tipos de acero [7]. Existen varias versiones de esta máquina, una de ellas se llama Eginé Venthon en la cual el metal estancado en el dispositivo alimentador se drena por el orificio del fondo y fluye desde la pared refractaria y es recibido en el recinto de un molde enfriado por agua (de grafito o de aluminio) en el que se forma una capa solidificada para continuar a través de una zona de enfriamiento mediante agua espumada en la que se solidifica completamente. El flujo horizontal es arrastrado y sostenido por unos rodillos y se puede cortar mediante una sierra mecánica oscilante [8, 17]. Se reportan otros tipos de máquinas, la primera es llamada Reynolds la cual utiliza una boquilla de separación en el tundish y el molde enfriador [7] y la segunda utiliza el concepto de molde móvil que arrastra al flujo continuo en forma semejante a la colada semicontinua, con ello se evitan las dificultades de la vibración y lubricación del molde [17] lo cual ya se había mencionado en el subcapítulo 2.5 (Fig. 11).





(a) Detalle del funcionamiento de una máquina de colada semicontinua así como la colocación de flotador [5]

(b) Comparación del molde isométrico y convencional, así como su diferente tipo de solidificación [6].

Fig 9. Esquema del procedimiento de la colada semicontinua y modos de enfriamiento [16, 6]

### 1.5.2.- MÉTODOS DE COLADO CONTINUO EN MOLDE MÓVIL.

La colada continua de desbastes de pequeño espesor, cuya laminación se efectúa directamente a continuación, presenta un interés industrial considerable. Con esta técnica, que es más económica, se evitan determinadas operaciones intermedias clásicas de secciones de espesores grandes tales como el descortezado y recalentamiento. Contrariamente, cabe señalar que estos procedimientos son aplicables sólo a aleaciones poco aleadas [5].

En la Tabla IV se dan algunas características claves de diseño así como la medida de dendrita que se puede obtener para secciones delgadas y medianas. A continuación se muestran las máquinas más conocidas retomando el cuadro sinóptico de la Fig. 8.

#### 1.5.2.1.- Máquinas de colar con ruedas en banda flexible sinfin.

Las máquinas de este tipo arrastran y solidifican al flujo continuo en el espacio entre dos o más poleas.

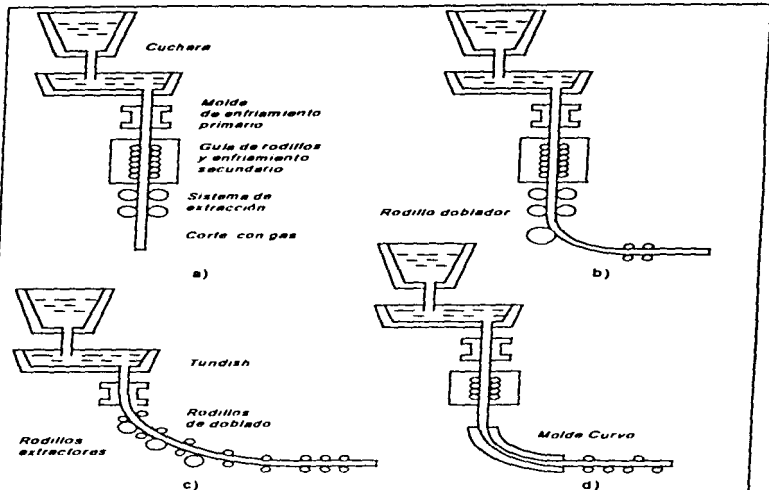


Fig. 10. Tipos de colada continua por el método directo (a) Vertical, (b) Vertical con doblado y enderezado, (c) Vertical con molde doblado curvado, (d) Arco ovalado con molde transversal [16].

#### 1.5.2.1.1.- Máquina de Properzi.

La máquina más conocida de este tipo de rueda y banda es el sistema de colada llamado Properzi el que se ha adaptado para producir cable, especialmente para uso eléctrico (Fig. 12a.). Consta de dos ruedas que en su periferia tienen una banda de acero tensada mediante un mecanismo de tornillo, la cual se enfria continuamente a través del contacto con agua estancada en un recipiente y la aspersión de agua. A su vez, la rueda se enfria simultáneamente obteniéndose una refrigeración uniforme. El flujo se alimenta mediante un conducto largo que se abastece de un recipiente superior (tundish). El producto

obtenido se puede extruir o laminar en caliente. El rango de aleaciones que pueden ser coladas y rodadas incluye 6061, 4043, 4047, 2117 y hasta aleaciones 2024 y 5056 (Normas SAE) [19]

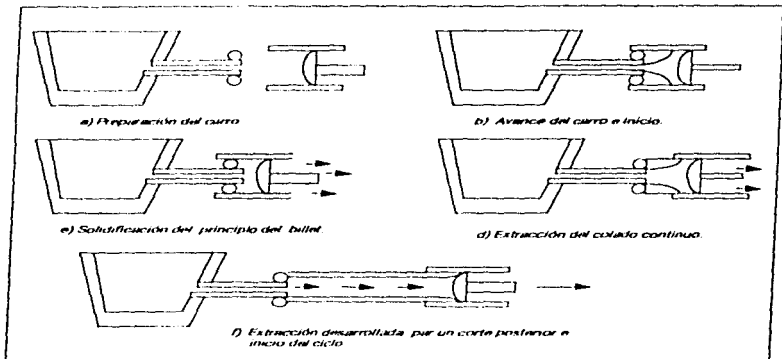


Fig. 11. Máquina de colada continua horizontal [5]

#### 1.5.2.1.2- Máquina de Rigamonti

Esta máquina, como las siguientes son una aplicación de la anterior (Fig. 12b) y se usa para la colada de desbastes de secciones transversales rectangulares. Tiene un dispositivo particular de la rueda tensora, con una ligera torsión del desbaste. Dicha torsión contribuye a la limitación de sus posibilidades, ya que para anchuras de más de 160 a 180 milímetros y espesores superiores de 25 a 30 milímetros el esfuerzo provocado llega a ser importante que el desbaste no puede ser separado fácilmente. Debido a las dificultades de alimentación, no se pueden colar espesores inferiores a 15 milímetros. Existen varios tipos las cuales se destinan especialmente para la fabricación de pastillas para extrusión por impacto con aleaciones poco cargadas (A-M1, G06 [Normas Europeas UNE]) [5]

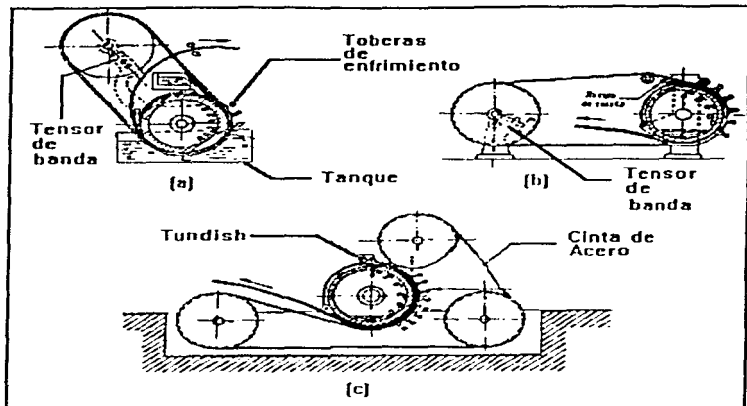


Fig 12. Esquemas de varios tipos de máquinas de colar con ruedas y bandas sinfín. (a) Máquina Properzi, (b) Máquina de Rigamonti y (c) Máquina 4R o de cuatro ruedas [5]

#### 1.5.2.1.3.- Máquinas 4R o RSC

Las máquinas llamadas 4R o RSC (Pechinery-Lobeck o Alcan-Mann) fueron diseñadas para eludir la necesidad de retorcer el producto obtenido mediante un arreglo de cuatro poleas y existen varias versiones. Cualquiera de los diseños consta típicamente de una polea acanalada, refrigerada con agua. En la periferia de las ruedas se encuentra una banda de acero dulce y en el espacio que se forma entra la banda y una de las poleas se da lugar a la solidificación de un flujo continuo alimentado por un recipiente superior a través de una boquilla larga (Fig. 12c). La mayor parte de ellas, están concebidas para colar desbastes de 15 a 30 milímetros de espesor y de 300 milímetros de ancho como máximo. Parece difícil sobrepasar la anchura de 300 milímetros a causa de la deformación de la cinta que tiende a envolverse en el canal [5]. Se emplean para productos diversos, pero la principal aplicación es la fabricación de bandas y pastillas de

extrusión por impacto Las aleaciones procesadas incluyen grados de composición común y la 5052 [6, 19]

#### 1.5.2.2. - Máquinas de bandas articuladas y de cintas lisas sinfin.

Las máquinas de este tipo cuean desbastes de secciones rectangulares, en posición sensiblemente horizontal, los cuales se cortan a medida y se pueden pasar a procesos posteriores de tratamiento térmico (homogeneización o templado) o laminación en caliente según el tipo de aleación de que se trate, con la finalidad de corregir sus defectos microestructurales inherentes de la solidificación rápida, como se vio en la sección 2 3 2 2 [3]. A continuación se muestran los principales tipos

##### *1.5.2.2.1. - Máquina Hunter Douglas.*

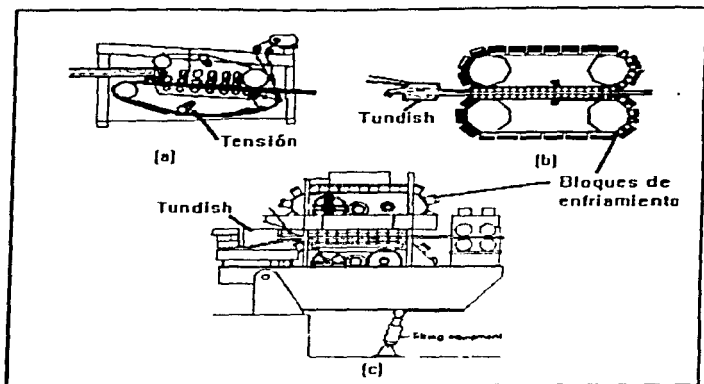
La máquina esta constituida por dos cadenas sinfin de eslabones de fundición articulados, refrigerados mediante agua y que se mueven horizontalmente La alimentación del metal se efectúa por una de las extremidades de la boquilla ajustada a presión constante por medio de un rebosadero (Fig 13a) La banda solidificada sale sin deformación por el extremo a una temperatura de 450 a 500 °C La longitud de la cavidad del molde es comúnmente de 700 a 800 milímetros aproximadamente para un total de 26 bloques Se consigue hacer persianas con aleaciones de Al-Mg-Si [19]

##### *1.5.2.2.2. - Máquina Hazlett.*

Esta máquina se asemeja a la anterior La diferencia reside en el hecho de que las dos cadenas se sustituyen por dos cintas sinfin de acero dulce tensadas por rodillos (poleas) y refrigeradas mediante agua La estaqueidad de los costados esta asegurada por dos montajes de bloques de aluminio que se deslizan sobre un fleje de acero Ambos se mantienen a distancia por medio de guías regulables Tal disposición permite variar fácilmente la anchura y espesor del desbaste (Fig 13b) Las máquinas de este tipo se usan industrialmente para la fabricación de barras de aluminio empleadas como conductores eléctricos y bandas de las que se cortan pastillas para la extrusión por impacto [5] Además, se ha usado para colar aluminio, zinc, plomo, cobre y acero [18]

##### *1.5.2.2.3. - Máquina Alusuisse Caster II.*

Esta máquina se ha desarrollado con mayores ventajas que la anterior, en particular la mayor parte de las aleaciones pueden usarse Los bloques articulados se aíslan térmicamente evitando las pérdidas de calor por conducción de la catarina y las partes estructurales de la máquina, son portátiles, pueden ser maquinados repetidamente y cuentan con un montaje que les permite expandirse térmicamente La longitud de la cavidad de colado varia según las características de velocidad de colada y composición de la aleación (Fig. 13c ) [17]



**Fig. 13.** Esquemas de los tipos de máquinas de bandas articuladas y de cintas lisas sinfin. (A) Máquina Hunter Douglas, (b) Máquina Hazofflet y (c) Máquina Alusuisse Caster II.

### 1.5.2.3.- Máquinas de colada continua entre rodillos

Las máquinas por este método se basan en la idea original de Bessemer (Fig. 4). A finales en la década de los ochentas el interés por este método a tomado más fuerza debido a que aventaja a los métodos de bandas articuladas en la mejora de los defectos inherentes a las velocidades altas de extracción de calor [20]. Existen varios tipos pero las más conocidas son las que se tratan a continuación

#### 1.5.2.3.1.- Máquina Hunter Engineering.

Constituye una modificación de la máquina Hazofflet. El resultado fue una máquina con los ejes de los cilindros situados en un mismo plano horizontal. El principio de esta manera es muy sencillo, ambos cilindros reciben al flujo continuo en el espacio de separación (Fig. 14a) alimentados mediante una boquilla larga ajustada que se abastece directamente de un horno. Los rodillos son fuertemente enfriados mediante refrigeración

de agua en su parte contral. A diferencia de la máquina de Bessemer, la alimentación del metal se efectúa de abajo hacia arriba. A medida que se lleva a cabo la operación el desbaste solidificado se acomoda para enrollarse en una bobina de grandes dimensiones al mismo tiempo que se cizalla cada uno de los lados unos ocho o diez milímetros para eliminar las grietas de los costados. Por último, el desbaste saliente se cizalla cuando el embobinado alcanza su espesor adecuado. La puesta a punto de estas máquinas es bastante compleja.

Es necesario, en particular que el dispositivo de alimentación éste bien caliente para evitar el desgaste del metal al principio de la colada. Los desbastes se emplean en general para la fabricación de productos que no llevan especificaciones severas, como chapas onduladas, elementos de cubiertas conformadas, bandas para cercas de jardín o papel de aluminio [5].

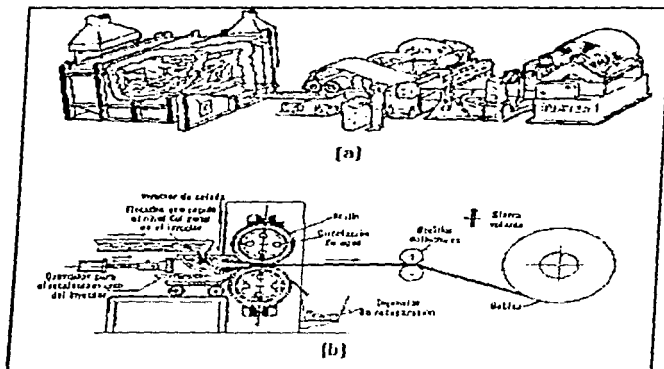


Fig. 14 Esquema de los tipos de máquinas de colada continua entre rodillos. (a) Hunter Engineering y su principio de funcionamiento y (b) Esquema de la máquina Pechinoy-Coquillar de colada entre dos cilindros [5]

### **1.5.2.3.2.- Máquina 3C o Pochinoy-Coquillard.**

La máquina es parecida a la de Hunter Engineering, pero presenta en relación con ésta, simplificaciones y notables mejoras (Fig. 14b) [5]

- Los ejes de los cilindros están dispuestos paralelamente en un plano vertical como un laminador clásico y la alimentación del metal se lleva a cabo por una boquilla colocada horizontalmente, lo que facilita considerablemente las observaciones, las maniobras de enganche y desenganche así como el comienzo de la colada
- Un dispositivo de regulación de nivel del metal en la boquilla de tipo flotador permite regular muy sencillamente la presión hidrostática a un pequeño valor, de modo que se reduzcan los riesgos de la perforación .
- Los cilindros se mecanizan con una acanaladura que da el espesor del desbaste. Esta técnica a permitido obtener aristas de desbastes más limpias que con el método anterior.



TIPO	CLASE	MATERIALES PODABLES	PRODUCTOS	ANCHO (mm)	ESPESOR (mm)	TEMPERATURA EMERGENTE (°C)	VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO (°C/s)	MEDIDA DE DENDRITA (μm)	MAXIMO CONTENIDO DE Mg	VELOCIDAD DE COLADO (mm/min)
Rueda y colado en banda de metal	Properly	Al, Zn, Pb, Cu	Discos y conductores cables pesados bricks	-----	135x135 190 450x450	400 ----- -----	10	30 a 50	-----	3 a 6
	Rigamont	Al	Flejes	250	18 a 20	400	10	30 a 50	2	4 a 7
	Fechney Loebck	Al	-----	305	18 a 20	415	10	30 a 50	-----	-----
	Albert Mann	Al	Flejes o flejes	100 a 400	12 a 30	510	10	30 a 50	2	-----
Dos bandas	Hazlett	Al, Zn, Pb, Cu	Tras anchas y puntas	1300	15 a 40	415	5 a 7	40 a 50	2	5 a 9
	Huster- Douglas	Al	Tras de mediano espesor	900	8	540	5 a 7	40 a 50	4	5 a 9
	Alkousse Caster II	Al	Tras anchas y puntas	1700	15 a 40	-----	5	40 a 70	5	2 a 5
Dos rodillos	Humer Engineering	Al	Tras anchas y puntas	2000	7	400 a 450	100 a 1000	5 a 10	2	0.6 a 1.1
	Fechney- Cogular	Al	Tras anchas y puntas	1500	7 a 12	-----	100 a 1000	2 a 7	3	0.6 a 1.0
	Alkousse Caster I	Al	Tras anchas y puntas	1700	5 a 12	-----	100 a 1000	2 a 7	-----	0.6 a 1.2
	Martin Havry	Al	Tras anchas y puntas	1500	7	-----	100 a 1000	5 a 10	2	0.5 a 1.5
	URRS	-----	Tras anchas	1500	6 a 8	-----	-----	-----	-----	-----

Tabla IV. Datos de Colada Continua en molde móvil para aleaciones no ferrosas [19].

## CAPITULO II

### FUNCIONES PRINCIPALES DEL SISTEMA DOSIFICADOR

Una vez que el metal se ha fundido es recibido en la cuchara es necesario que permanezca cierto tiempo en el cual se le da un tratamiento antes de verse al molde, esta etapa es de crucial importancia en la calidad del producto obtenido. Así mismo, esta constituye la parte medular del análisis del problema. Otra función "no menos importante" es evitar cualquier contratempo o paro de la dosificación, sólo que no se mencionó para evitar desviar la atención en el capítulo anterior. En general, las tareas que debe desempeñar el sistema se pueden dividir en las siguientes:

- A).- Promover la limpieza y/o la separación de las inclusiones no metálicas (materias extrañas) del metal fundido así como evitar su formación
- B).- Adición de componentes aleantes
- C).- Controlar la temperatura del metal dosificado
- D).- Evitar la obstrucción o de la boquilla de drenado
- E).- Mantener un nivel y velocidad de alimentación aceptable
- F).- Promover la correcta solidificación en el molde
- G).- Recibir la carga de metal fundido y garantizar su seguridad en caso de fallas eventuales

A continuación se menciona todos los elementos que afectan a estas tareas, tanto para el acero como para el aluminio

#### ***2. 1.- LIMPIEZA Y SEPARACIÓN DE INCLUSIONES NO METÁLICAS.***

La presencia de cualquier tipo de suciedad o materia extraña en el metal fundido es causa directa de contratiempos en la operación de la colada o de disminución de la calidad de la microestructura del producto obtenido, por ejemplo, la formación de porosidad o disminución de la resistencia mecánica del producto solidificado así como el rompimiento del flujo continuo

Debido a estas circunstancias los fabricantes han promovido el desarrollo de métodos de limpieza o separación de inclusiones no metálicas (materias extrañas) que se pueden

generar antes y durante la operación de la colada. Las posibles causas para la generación estas sustancias dañinas se resumen en el cuadro sinóptico de la Fig. 15. Dos son los procedimientos llevados a cabo por los fabricantes de acero y aluminio para efectuar dichas operaciones: desgasificación y separación de inclusiones durante toda la operación de la colada.

### ***2.1.1.- DESGASIFICACIÓN***

En la colada continua del acero, la operación se efectúa de dos maneras: la primera de ellas se lleva a cabo mediante una lanza cuya función es burbujear un gas en el interior de un metal fundido con la finalidad de que al ascender remueva o arrastre al gas indeseable que se encuentra atrapado en el líquido y la segunda forma es agregar pequeñas cantidades de aluminio que a las altas temperaturas de operación tienen un poder muy alto de absorción de oxígeno (Fig. 23) e hidrógeno, de tal manera que la escoria que se forma como producto de esta reacción flota eliminando la acción desfavorable de estas sustancias indeseables. A esta última operación también se le llama desoxidación [ 4,16 ] y para el caso de el aluminio se lleva a cabo de la misma forma que el primer método mencionado, es decir, en la cuchara de colada, o bien dentro del horno [5]. Esto da indicios de que el tratamiento del metal se puede llevar a cabo tanto en el recipiente del horno de fusión como en la cuchara.

#### ***2.1.1.2.- SEPARACIÓN DE MATERIAS EXTRAÑAS.***

A altas temperaturas el metal fundido es más soluble con el hidrógeno y el oxígeno (Fig. 17), o bien la presencia de contaminantes exteriores son la causa de aportación de inclusiones las cuales reducen la resistencia del producto obtenido, por ello es que los fabricantes han desarrollado varios métodos para separar o evitar tales sustancias indeseables. Esta operación se lleva a cabo mediante dispositivos colocados desde el diseño, por lo que se realiza por sí sola de manera continua, o bien mediante adición de sustancias. Tales circunstancias dan indicios de que la operación del tratamiento del metal y la adición de los componentes de la aleación se pueden llevar a cabo ya sea en la cuchara o en el recipiente del horno. Seguido se tratan los factores a considerar en dicha operación.

##### ***2.1.1.2.1.- Fuentes de humedad.***

Cuando el vapor de agua de la atmósfera tiene contacto con el metal fundido las moléculas de agua se descomponen provocando la generación de gases que son absorbidos ávidamente por el metal fundido. Otra fuente de humedad la constituyen la absorción de agua del material refractario o la aportación de la materia prima [5].

##### ***2.1.1.2.2.- Origen de la materia prima.***

En este caso la generación de inclusiones no metálicas tiene su origen desde la obtención del metal a fundir. Los componentes de la aleación tienen diferentes cantidades de impurezas (óxido, inclusiones, etc.) dependiendo de su procedencia o

clase, lo cual se especifica claramente por el mercado. Comúnmente, cuando dichos materiales son de refusión contienen arena, productos de oxidación u otras sustancias dañinas que contaminan al producto final. De estos contaminantes, algunos son fuentes potenciales de generación o abastecimiento de hidrógeno, por ejemplo, la descomposición de grasas da lugar a vapor de agua que ocasiona la absorción de hidrógeno y oxígeno [5].

### 2.1.1.2.3.- Ataque del metal fundido a los materiales en contacto durante la operación.

Otro agente de generación de materias extrañas (inclusiones no metálicas) se debe al ataque químico o deterioro del metal fundido a los materiales que se encuentran en contacto con él. Tal es el caso del desgaste por abrasión de los refractarios o ataque químico del metal fundido a los recipientes de metal.

El ataque químico del metal fundido del recipiente al metal hace patente la necesidad de recubrirlo con un material que lo proteja. Los fabricantes y fundidores recomiendan diversos tipos de refractarios y pinturas como recubrimiento, o bien el recipiente puede ser monolítico (de una sola pieza), tal como un crisol.

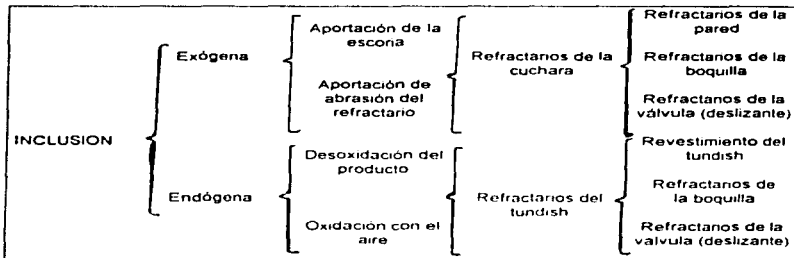


Fig. 15. Causas de generación de inclusiones no metálicas [10]

### 2.1.1.2.4.- Suciedad de los recipientes

Con relación al artículo anterior casi todos los materiales sean de recubrimiento o no, sufren la adherencia del metal fundido "que no escurre" y que posteriormente se solidifica

en forma de costras, las cuales deben eliminarse antes y después de efectuar una nueva colada para evitar la contaminación del metal. En la Fig. 16, se muestra el deterioro del revestimiento del tundish en una colada continua de acero [17].



Fig. 16. Deterioro del revestimiento del tundish de colada continua de acero [17].

#### **2.1.1.2.5- Filtrado y adición de fundentes.**

La filtración se usa comúnmente para separar las materias de tamaños relativamente grandes que se encuentran en el metal después de ser fundido y se lleva a cabo al verter el metal fundido en otro recipiente cualquiera interponiendo el tamiz del filtro que atrapa dichas materias indeseables. Se pueden usar una o varias mallas eliminando las materias extrañas por pasos, para ello existen diferentes tamaños de reticulado ya estandarizado [21].

Los fundentes se usan para remover los gases y materias extrañas así como para mejorar la microestructura de aleaciones que han de tener bajas velocidades de extracción de calor [36]. Son sustancias usualmente inorgánicas a base de sales que tienen las presentaciones comerciales de polvo o tabletas sólidas. Otra función

importante que desempeñan es proteger a la superficie del metal fundido contra el ataque de la atmósfera y disminuir las pérdidas de calor en la superficie [5]

## **2.2.- ADICIÓN DE COMPONENTES ALEANTES.**

No existe una táctica establecida que gobierne la secuencia para hacer la adición de componentes aleantes, pero el procedimiento está gobernado por el punto de fusión, reactividad, volatilidad y cantidad de componentes aleantes. Al respecto A. U. Seybolt [22] recomienda "Cuando se añade hierro al cobre el calentamiento de éste sobre el punto de fusión de aquél no es aconsejable, ya que al sobrecalentar el cobre a temperaturas tan elevadas aumentaría grandemente su volatilización, oxidación y cantidad de solución de hidrógeno. Se puede escoger alguna temperatura intermedia, alrededor de los 1200 °C lo suficientemente alta para asegurar una solución razonablemente rápida del hierro, pero no tan alta para afectar seriamente al cobre. Naturalmente, cuanto más finamente dividido este el hierro, es mayor la velocidad de disolución, ya que la velocidad es una función del área de la superficie de hierro. Sin embargo, no se concluye de esto que el hierro en polvo es la mejor forma de adición pues existe demasiada tendencia a que se oxide a menos que se tuviera una atmósfera controlada. El uso de un fundente sobre el cobre tendería a reducir la oxidación, tanto del cobre como del hierro. Si se usa el polvo, debido a que se pueda disponer de él más fácilmente por su pureza, se puede compactar antes de añadirlo a la aleación [22]"

"Si el metal aleante tiene un punto de fusión bajo comparado con el cobre, tal como el estaño, el cobre debería calentarse justamente encima del punto de fusión, o el estaño debe añadirse antes de que el cobre se haya fundido completamente, ya que, a medida que se disuelve el estaño baja el punto de fusión de la aleación y la temperatura puede ser mantenida baja para prevenir una oxidación excesiva o pérdida de constituyentes aleantes. La aleación a una temperatura tan baja como es posible es particularmente importante cuando la adición es un material volátil como el zinc. En general, la temperatura debería mantenerse tan baja como es posible para evitar la reacción con la atmósfera, pérdida de constituyentes volátiles, y la posible reacción con el crisol."

"Si se va hacer una aleación que contiene aproximadamente partes iguales de los metales usualmente sería mejor si se fundiera primero el metal de punto de fusión más bajo a fin de evitar el sobrecalentamiento. Aunque la adición del segundo metal puede aumentar el punto de fusión, tal como cuando se añade níquel al cobre para hacer una aleación no es nunca considerablemente más baja que la temperatura necesaria en un procedimiento inverso. Una excepción a esta regla se presentaría si el metal de punto de fusión bajo fuera más bien reactivo o corrosivo con el crisol, luego el esquema mejor sería probablemente fundir primeramente el metal menos reactivo pero de un mayor punto de fusión."

"Al hacer varias aleaciones se aplicarian las consideraciones anteriores. El metal menos reactivo se añadiría al último, de forma que se tuviera oportunidad de combinarse con el oxígeno disuelto y reaccionar con otros componentes del medio ambiente [22]"

### **2.3.- CONTROL DE TEMPERATURA DEL FLUJO CONTINUO**

El control de temperatura del sistema dosificador es muy importante ya que repercute ampliamente en la calidad de los productos finales y la operación de la colada continua. A continuación, se mencionará cada uno de estos aspectos

#### **2.3.1.- CONTROL DE CALIDAD DEL PRODUCTO OBTENIDO.**

Con la variación de temperatura del flujo continuo en el molde varían a su vez características tales como la porosidad, el comportamiento esfuerzo-deformación así como el refinamiento de grano de los productos obtenidos [23, 24, 25]. Tal situación se muestra en la gráfica de la Fig. 17.

#### **2.3.2.- OPERACIÓN DE LA COLADA CONTINUA**

Se ha mencionado en el subcapítulo 2.1.1 que en tanto más grande sea la temperatura del metal fundido mayor es su tendencia a oxidarse o absorber hidrógeno. Tal situación también afecta al funcionamiento del molde cuando el flujo continuo descendente abandona las paredes del molde el espesor de la cáscara solidificada debe ser de tal grosor que no se rompa en el momento que debe soportar por sí sola la presión interior que ejerce el metal que aún se encuentra en estado líquido incluyendo el esfuerzo de tensión que ejercen los rodillos de tracción y el rozamiento del molde. Cabe destacar que esta es la función principal del molde, en cuyo caso si la temperatura del metal es alta el espesor de la cáscara solidificada será insuficiente y por consiguiente es incapaz de resistir el esfuerzo total a que esta sometido y se deforma plásticamente originándose ondulaciones superficiales (Fig. 18e). Si la temperatura es aún mayor llega a un momento crítico en que el flujo continuo se rompe o fractura peligrando los operadores (Fig. 18 c y d) y deteniendo la operación. Aunado a ello, pueden aparecer otro tipo de defectos. Entre ellos se puede observar líneas de fricción y pequeños desgarres de la superficie (Fig. 18f) [2].

#### **2.4.- TAPONAMIENTO U OBSTRUCCIÓN O DE LA BOQUILLA DE DRENADO.**

En la operación de la colada continua principalmente de aceros desoxidados con aluminio existen ocasiones en las que se tapa u obstruye parcialmente la boquilla de drenado directo hacia el molde y en el último de los casos su total taponamiento impidiendo completamente la operación de la colada. El fenómeno indeseable se presenta como la adherencia de varias inclusiones sólidas [comúnmente la alúmina (óxido de aluminio) pero también  $TiO_2$ ,  $SiO_2$ ,  $ZrO_2$  y ciertos sulfuros] en un principio en la parte más estrecha del orificio de la boquilla las cuales se van aglomerando

gradualmente hacia el centro del orificio hasta que por fin llegan a tapar totalmente el orificio de la boquilla [12].

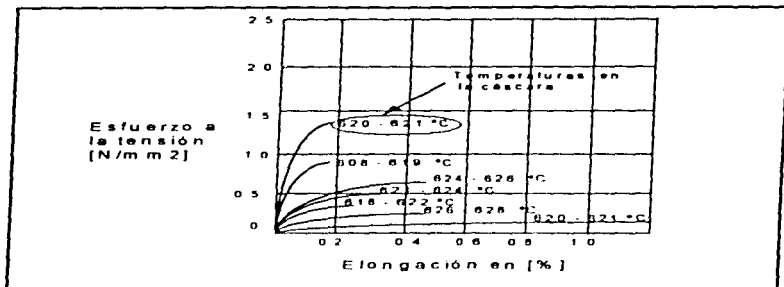


Fig. 17. Curvas esfuerzo deformación de tochos de 250 mm de aluminio obtenidos mediante colada continua. Las temperaturas mostradas se refieren a la temperatura de la cáscara solidificada en el molde. La velocidad de colado fue de 5 milímetros por minuto [24].

La temperatura de operación de la colada continua de los aceros desoxidados con aluminio es aproximadamente 1600 °C. En semejantes condiciones el poder de solubilidad del aluminio con el oxígeno es muy alto, lo cual da lugar a la generación de altas cantidades de alúmina (óxido de aluminio), razón por la cual la operación es propensa a que suceda la obstrucción o taponamiento del orificio de la boquilla.

La causa por mucho tiempo se ha atribuido a que las inclusiones sólidas se adhieren a las paredes del orificio de la boquilla en un principio por la pérdida de energía calorífica debido a el enfriamiento del metal fundido y boquilla al ceder mutuamente su calor acumulado ya sea porque alguno de ellos se encuentra frío desde el inicio de la colada o bien se vayan enfriando gradualmente en el transcurso de la misma. Una vez que las partículas de alúmina forman una base en la pared de la boquilla aumenta la obstrucción que va creciendo como un puente solidificado (Fig. 19) [12].

Los fabricantes han desarrollado varias técnicas para evitar o minimizar el fenómeno, tales como elaboración de nuevos tipos de boquillas [27], colocación de una lanza que



destapa el orificio de la boquilla mediante la inyección de oxígeno (Fig. 23.) y que igualmente sirve de válvula, adición de sustancias que reducen la tendencia, etc.

En los últimos años se ha tratado de dilucidar cuales son los factores que contribuyen a que el fenómeno ocurra y aquellos que participan al respecto pueden tratarse en tres aspectos

- A).- El tamaño de las partículas de alúmina
- B) - La formación de vórtices
- C) - El flujo turbulento

A continuación se ven todos los puntos enfocándolos a la alúmina por ser la más estudiada

#### ***2.4.1.- TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS DE ALÚMINA.***

Según F. G. Wilson, M. J. Heeson [12] y colaboradores, el comienzo del puente solidificado se origina predominantemente cuando las partículas de alúmina de 1 a 10  $\mu\text{m}$  de diámetro se encuentran cerca de las paredes de la boquilla, se adhieren a las paredes del orificio, lo que constituye la base para el crecimiento de la obstrucción, ya que a partir de ese momento las partículas se empiezan a unir unas con otras (sufren coalescencia), y al mismo tiempo se van sintetizando gradualmente, tapando en unos cuantos minutos el orificio de la boquilla. De esto concluyeron que si no se forman partículas de semejante tamaño no se originará el taponamiento

#### ***2.4.2.- FORMACIÓN DE VÓRTICES.***

El vórtice es un fenómeno de dinámica de los fluidos. En el drenado de los líquidos se presenta como un flujo circular descendente que incrementa la velocidad radial dramáticamente a medida que se aleja del centro del conducto por efecto de la aceleración de Coriolis [28]. Se presenta cuando el nivel de contenido del recipiente que se está drenando es bajo y su tiempo de permanencia depende de las características de la válvula (Fig. 20) [28,29]. Así cuando sucede tal fenómeno el efecto que causa sobre las partículas es que las centrifuga, expulsando las partículas más pesadas hacia el exterior y las más ligeras hacia el centro y por consiguiente las distribuye ordenadamente en función de su densidad en forma semejante al proceso de centrifugación [12]. En la colada de acero, la densidad de este material ( $7000 \text{ kg/m}^3$ ), es mayor que la de la alúmina ( $3500 \text{ kg/m}^3$ ). Entonces, en el caso de que eventualmente se tuviera un vórtice las partículas de acero tienden a situarse en los lugares adyacentes a las paredes de la boquilla junto con partículas grandes de alúmina (mayores de  $36 \mu\text{m}$ ), este tamaño de alúmina es muy grande para que se origine la adherencia a la pared del orificio, como ya se apuntaba en el subcapítulo 2.4.1, por lo tanto, en tales circunstancias no sucedería el taponamiento [12].



(a) Barra rota a causa de una velocidad de colada baja  $V_c = 13$  cm/min y  $T_c = 720^\circ\text{C}$ .



(b) Rotura de la barra y derrame de metal provocado por velocidad de colada alta  $V_c = 27$  cm/min y  $T_c = 705^\circ\text{C}$ .



(c) Barra rota a causa de una elevada temperatura de colada,  $T_c = 720^\circ\text{C}$  y  $V_c = 22$  cm/min.



(d) Rotura en estado pastoso, presencia de pileta líquida debido a un enfriamiento deficiente  $V_c = 720^\circ\text{C}$ .



(E) Presencia de ondulaciones superficiales con  $T_c = 700^\circ\text{C}$  y  $V_c = 0.236$  cm/seg.



(F) Presencia de líneas fricción y desgarres a causa de una temperatura de colada alta  $T_c = 715^\circ\text{C}$   $V_c = 0.274$  cm/min.

Fig. 18 Defectos del colado continuo de sección pequeña de aluminio debido a las malas condiciones de operación (3 centímetros) [2,25] (Dibujo esquemático).

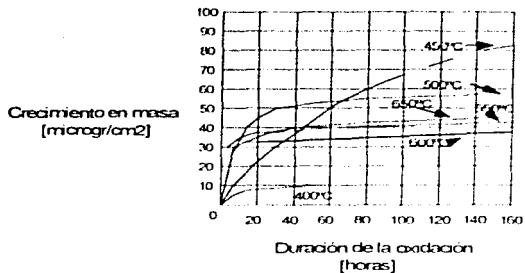


Fig. 19. Solubilidad del oxígeno con el aluminio en función de la temperatura [5].

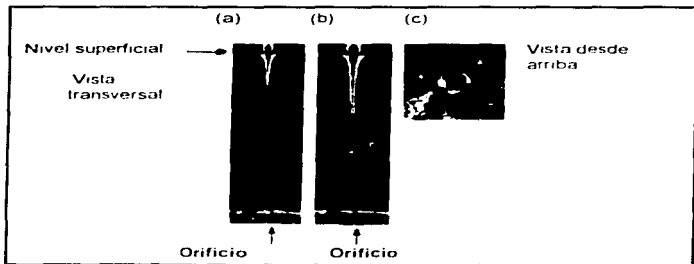


Fig. 20. Formación de un vórtice (a) origen, (b) vórtice completamente desarrollado y © Vista desde arriba [28].

### **2.4.3.- FLUJO TURBULENTO A TRAVÉS DE LA BOQUILLA.**

En la Fig. 21, se observa el comportamiento del flujo turbulento en el orificio de la boquilla, las líneas de flujo indican que el límite de la concavidad y el conducto recto es la zona de mayor turbulencia y se va atenuando a medida que desciende del conducto recto [12]

Los modelos experimentales reportados demuestran que la turbulencia tiene efecto contrario al vórtice expulsa las partículas más ligeras hacia el exterior lo cual es perjudicial pues aquellas de menor tamaño son obligadas a migrar cerca de las paredes de la boquilla aumentando la tendencia al taponamiento u obstrucción de la misma y al mismo tiempo favorece ampliamente la coalescencia de las partículas. Tales suposiciones se han comprobado al observar que el taponamiento de la boquilla se produce en el límite del conducto recto y la concavidad donde se acumula la mayor cantidad de partículas pequeñas las que van reduciéndose hacia abajo del conducto [12] (Fig. 22)

### **2.5.- MANTENER EL NIVEL Y VELOCIDAD CONSTANTES EN LA ALIMENTACION DEL MOLDE.**

Las variaciones de velocidad de alimentación se notan claramente como la fluctuación del nivel del metal en la fase líquida confinado en el molde. El control de la altura metalostática es importante para reducir la cantidad de porosidad superficial (por lo que se requiere escalar un espesor menor del exterior del perfil sólido), mejora las propiedades del producto obtenido, evita la posibilidad del derramamiento de metal en fase líquida y favorece a mantener una velocidad de alimentación más constante. Además las fluctuaciones aumentan la tendencia a los rompimientos. Por ejemplo, si el nivel es alto habrá más metal líquido en el molde y la capacidad de extracción de calor será insuficiente, por consiguiente el espesor de la cascara solidificada también lo que se traduce en un eventual rompimiento del flujo continuo. En caso contrario, cuando el nivel es bajo la capacidad de enfriamiento es mayor dando consecuencia a un mayor resquebrajamiento en las paredes del molde lo que a la larga puede dar lugar a rompimientos (Fig. 18 a y b)

La porosidad surge a causa de una insuficiente alimentación de líquido para compensar la contracción debida a la solidificación. En tales circunstancias si la superficie no se encuentra completamente solidificada o bien si la succión excede las fuerzas capilares del líquido residual en la superficie, dicho líquido es succionado produciéndose un poro. Este defecto aparece en la colada continua de aleaciones que requieren un amplio rango de solidificación, pues ellas solidifican con una estructura granular más gruesa que el aluminio menos aleado en iguales condiciones de solidificación y las fuerzas capilares son más bajas en subestructuras gruesas [2]

La altura del nivel de metal fundido en el recipiente de alimentación rige los valores mínimo y máximo de la velocidad de alimentación lo cual se explica según la ley de

Toricelli "el cuadrado de la velocidad de flujo de un líquido que se drena en el orificio del fondo del recipiente es directamente proporcional a la altura del recipiente", o sea

$$V^2 = \rho Hg \quad (1)$$

donde

$\rho$  = densidad del metal fundido [kg/cm<sup>3</sup>]      H = altura metalostática del metal fundido [m]

g = aceleración de la gravedad [m/s<sup>2</sup>]      V = Velocidad de alimentación [m/s]

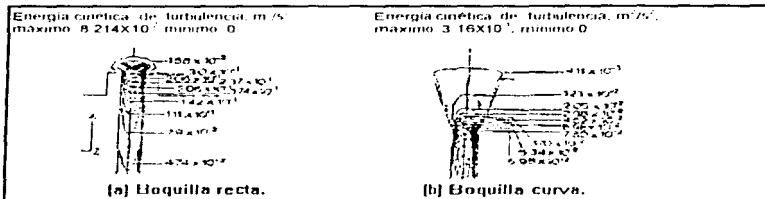


Fig. 21. Líneas de flujo que representan los contornos de energía cinética turbulenta (m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>) [12].

La representación gráfica de la ecuación se presenta en la Fig. 40. En ella se muestra que a medida que disminuye la altura metalostática también lo hace la velocidad de alimentación y por consiguiente siempre es variable inevitablemente. Sin embargo, es crucial que esta se mantenga constante como ya se mencionó anteriormente. Por ello es que el dispositivo alimentador tiene pequeña profundidad con la finalidad de evitar fluctuaciones grandes en tan importante característica. Así mismo, los fabricantes han ideado diversos métodos para controlarla lo cual se puede conseguir ya sea mediante un operador que modifique el nivel del molde visualmente manipulando un mecanismo corrector, o bien la operación puede llevarse a cabo automáticamente mediante diversos métodos los cuales se pueden conjuntar para conseguir una automatización total, siendo los más representativos tres de ellos:

- A) - Restringir el paso de flujo mediante válvulas
- B) - Variar la velocidad de extracción de los rodillos
- C) - Variar la secuencia de oscilación del molde

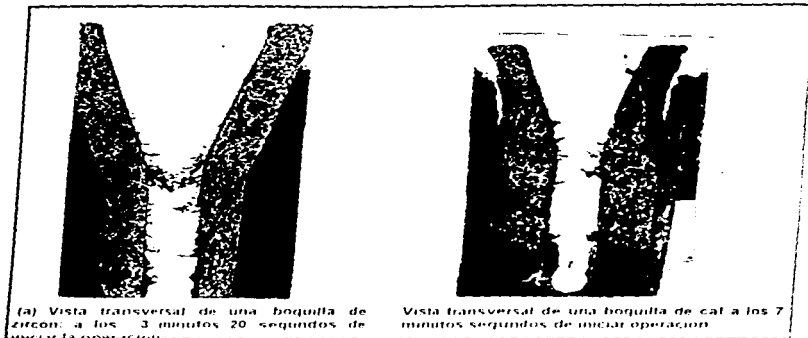


Fig. 22. Ilustración de una boquilla de zircon parcialmente obstruida después de 3 minutos 20 segundos de operación. La boquilla de la derecha se desgasta a medida de que pasa el fluido, puesto la cal reacciona con el óxido de aluminio formando un compuesto de bajo punto de fusión con lo que se evita la solidificación de la alumina y por consiguiente que la obstrucción ocurra. Esta práctica se lleva a cabo industrialmente colocando un inserto de cal en la pared interior de la boquilla [12, 27].

### 2.5.1.- RESTRICCIÓN DEL PASO MEDIANTE VALVULAS.

Un ejemplo de la automatización del control de nivel se encuentra en la Fig. 23, y se usa para el colado de billets pequeños. Dicho control respone que el fundido cuente con una válvula de lanza. En el sistema se emboban dos termopilas en el nivel alto y bajo de metal. La señal del transductor se mide y compara mediante un sistema controlador el cual activa una válvula de tres vías/dos posiciones que alimenta a un pistón neumático el cual transmite el movimiento mediante el mecanismo que asciende o baja la palanca según sea el nivel alto o bajo semejante al sistema anterior [11].

#### 2.5.1.1- Válvula de lanza.

La válvula se puede visualizar en la Fig. 24, la cual consta básicamente de una forma monolítica de material refractario que se encuentra enlazada al estabón del mecanismo

que la sube y la baja, la punta del asiento de la lanza debe sellar perfectamente la entrada de la boquilla mientras se llenan los recipientes [16]

### 2.5.1.2.- Válvula deslizando de dos posiciones.

En la Fig. 25, se presenta una válvula deslizando, preferentemente usada en el drenado de la cuchara. El cierre corredizo trabaja según el principio de deslizamiento paralelo de dos placas de material refractario agujeradas. Los métodos de control de nivel son casi idénticos al anterior [6]. Actualmente su utilización tiene grandes ventajas sobre las válvulas de lanza porque [54]

- Admite precalentamiento a mayor temperatura lo que le permite guardar más el calor y puede ser precalentada más fácilmente
- Permiten un menor espesor de revestimiento en los recipientes
- Los costos de operación disminuyen y su operación se simplifica
- Se tienen menores pérdidas de calor
- El flujo de la cuchara es más compacto y controlable y además aumenta su capacidad y el tiempo de drenado permitido
- Se eliminan las fallas de las válvulas de rodillo y las condiciones de operación son menos honorosas

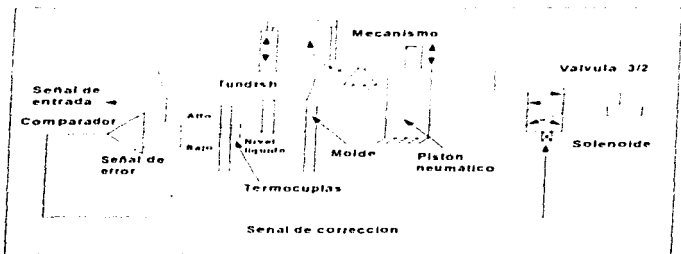


Fig. 23. Control automático de nivel mediante posicionamiento de la lanza [11].

### 2.5.1.3.- Válvula de giro.

La válvula es una conjugación de las dos anteriores y es un avance tecnológico reciente reportado en 1987. El accesorio, en cuestión (Fig. 26) es un rodillo de refractario que tiene un orificio, que abre y cierra el paso de metal líquido al girarse por medio de un mecanismo. La operación de este tipo de válvula a demostrado que brinda las ventajas de las dos anteriores, con ello se consigue la mayor economía de la lanza unido a las ventajas de una válvula deslizante [31].

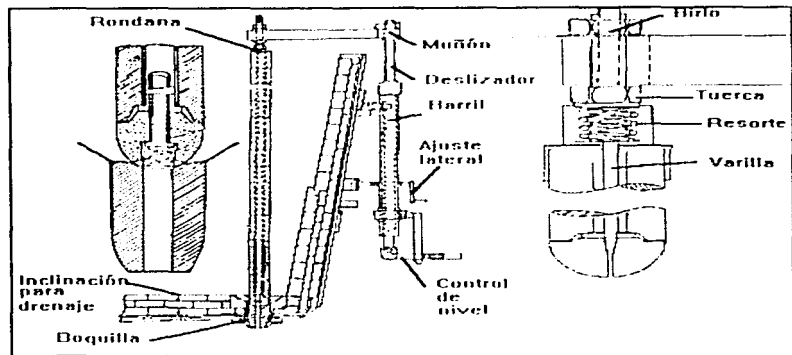


Fig. 24. Esquema de una válvula de lanza para una cuchara de colada continua de acero y uno de sus mecanismos [16, 7].

### 2.5.2.- VARIACIÓN DE EXTRACCIÓN DE LOS RODILLOS.

La regulación del nivel de metal líquido se puede conseguir variando la velocidad de extracción de los rodillos. Este método se ha usado en colada continua de acero para secciones transversales grandes [16]. En este caso un sistema de control detecta y evalúa las variaciones de nivel en el molde y transmite una orden a un servomotor para variar el número de revoluciones de los rodillos de extracción, en otras palabras, si el nivel es bajo disminuyen las revoluciones y en caso contrario aumentan. Para ambos casos se busca que el sistema se estabilice. En la colada semicontinua también se



pueden evaluar las características del flujo continuo mediante el pesaje automático de la pieza solidificada [24]

### 2.5.3.- VARIACION DE LAS CONDICIONES DE OSCILACION EN EL MOLDE.

Otro método usado en la colada continua de secciones grandes de acero [4] y de cobre [5] es la variación de las condiciones de oscilación en el molde, en particular la amplitud de oscilación y la frecuencia [4]. Las sacudidas tienen el efecto de que ayudan a contrarrestar y/o disminuyen la fuerza de fricción en las paredes del molde en contacto con la cascara solidificada. Además, con ello se consiguen mayores velocidades de colada [7].

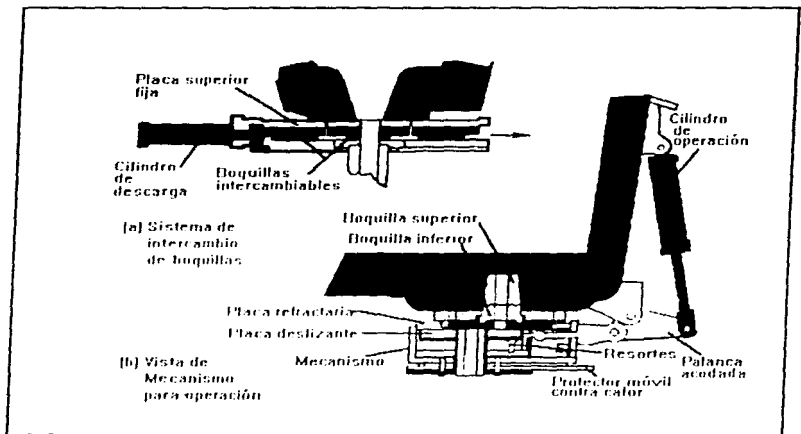


Fig. 25. Representación esquemática para el montaje y el modo de operar un cierre de cucharas [16].

## 2.6.- CHORRO DE ALIMENTACIÓN EN EL MOLDE.

Como se ha mencionado en el subcapítulo 1.1 cuando se cuelean secciones transversales grandes es común utilizar varios conductos de alimentación en el dispositivo dosificador, de tal manera que la repartición de metal fundido sea más uniforme en el molde, esta práctica común trae por consecuencia el aumento del ritmo de producción e incluso se puede alimentar a varios moldes a la vez, tal como se ve en la Fig. 39. Por este motivo es que se le conoce al tundish también como distribuidor. Generalmente, los fabricantes de acero también usan boquillas de alimentación alargadas (Fig.7a.) las cuales tienen las siguientes finalidades:

### 2.6.1.- EVITAR LA REOXIDACIÓN DEL CHORRO DE METAL DESCENDENTE.

Los conductos largos que se encuentran debajo de la boquilla sirven para evitar el contacto del metal líquido con la atmósfera y pueden estar tanto en el sistema alimentador como en el distribuidor.

### 2.6.2.- EVITAR QUE EL CHORRO DE METAL TENGA CONTACTO CON LA ESCORIA.

Así se puede observar en todos los casos en que se tiene un conducto largo sumergido en el metal líquido.

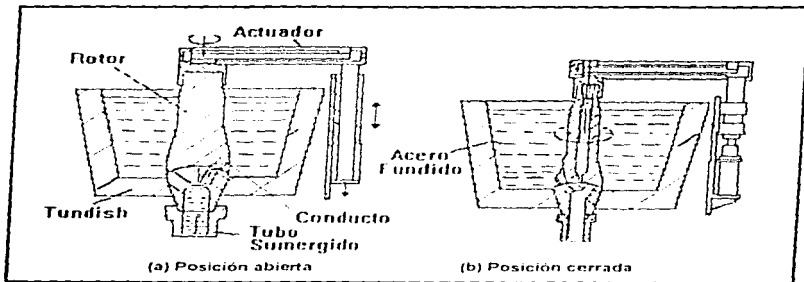


Fig. 26. Representación esquemática de una válvula innovadora para acero [31].

### 2.6.3.- FAVORECER LA TURBULENCIA EN EL MOLDE.

Esto permite una mayor transferencia de calor con ello se logra un enfriamiento más rápido y uniforme que mejora la microestructura del producto obtenido. La turbulencia dentro del molde se consigue mediante el arremolinamiento provocado por un flujo radial debido a la posición horizontal o inclinada del orificio de salida de los conductos largos. El uso de boquillas bifurcadas se aplica en la colada de secciones transversales grandes porque en estas piezas existe mayor tendencia a que la microestructura del metal solidificado no sea uniforme, ya que la parte exterior se enfría más rápidamente que la interior [17].

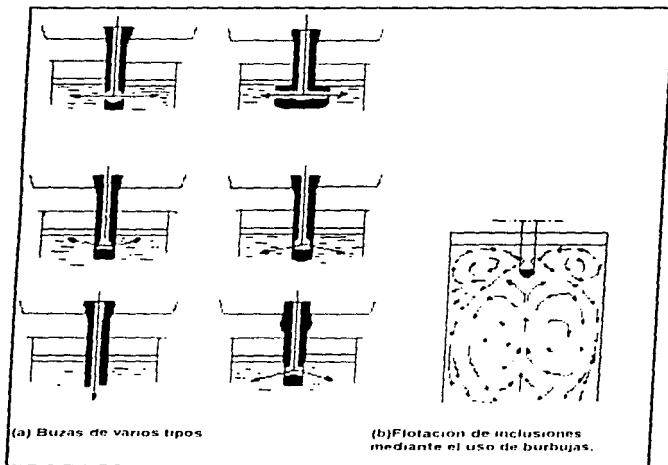


Fig. 27. (a) Buzas de diferentes tipos, así como (b) Favorecimiento a la flotación de inclusiones [16].

#### 2.6.4.- FAVORECER LA DIFUSIVIDAD ENTRE COMPONENTES ASI COMO HOMOGENEIZAR LA TEMPERATURA DEL LIQUIDO CONTENIDO.

Se ha dicho que un defecto muy importante en los productos colados es la falta de difusividad entre sus componentes, lo cual se refleja directamente en la estractificación de temperatura del liquido alojado en los recipientes, en otras palabras a mayor homogeneidad de temperatura y distribución de las corrientes el producto estará en mejores condiciones para solidificarse en el molde lo cual se refleja directamente en la calidad del mismo

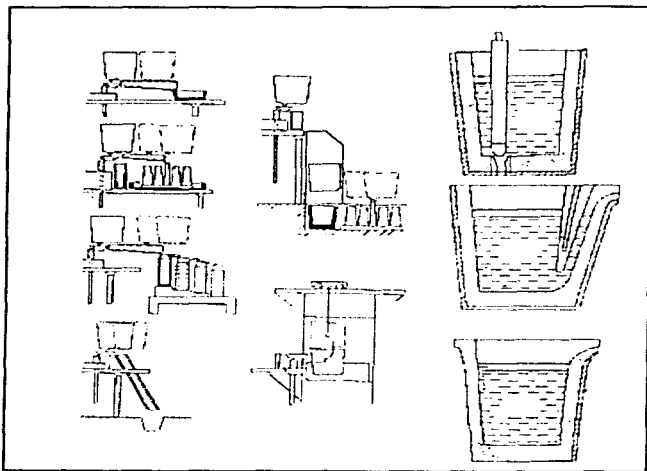


Fig. 28. Diferentes disposiciones de canales de rebalse para la desviación del acero cuando hay contratiempos en la colada y recipientes más comunes [16].

## **2.6.5.- FAVORECER LA FLOTACIÓN DE ESCORIAS.**

Las buzas bifurcadas (conductos largos sumergidos) como se dijo en el artículo anterior se aplican a secciones grandes como tochos y planchones. La salida radial o inclinada también favorece a la flotación de escorias al imprimirla un flujo ascendente al chorro de salida de tal manera que arrastre hacia arriba las inclusiones no metálicas que se alojan dentro de el colado continuo [17] (Fig.7b) Cabe señalar que cuando la boquilla de drenado en el molde y el conducto largo son de una sola pieza al conjunto se llama buza [16]

## **2.7.- DOSIFICACION Y SEGURIDAD.**

La dosificación se refiere a que la alimentación de toda la carga en el molde de enfriamiento y su capacidad en volumen esta determinada por el volumen del recipiente receptor (cuchara para la colada continua de acero). En todos los casos, este dispositivo contiene toda la carga de metal fundido que recibe del horno, así mismo, su volumen es de mayor capacidad con el fin de evitar un rebase o derramamiento peligroso del liquido contenido. En algunos casos este elemento tiene un mecanismo que le permite inclinarse [7]. Por si fuera poco tambien tiene un sistema de emergencia o canal de reembalse que sirven como seguridad en caso de rebase de la capacidad en el tundish (Fig.28). Esto tambien es útil cuando se llega a tapar la boquilla de alimentación. Generalmente en las instalaciones de colada continua es necesario que se cuente con un recipiente extra de igual capacidad que la cuchara por cualquier falla inesperada de la operación o de los materiales de los recipientes [16].

# CAPITULO III

## LAS ALEACIONES NO FERROSAS MAS USADAS EN MEXICO

Las gran preferencia del consumo de las aleaciones de aluminio gracias a sus propiedades de ligereza, abundancia, e inoxidabilidad las hace materiales de suma importancia en la actualidad, sin embargo su utilización en México se ve cuestionada por una aleación nueva llamada Zinalco mediante la cual ha surgido recientemente como una alternativa viable para sustituir a la anterior. Ante tal situación se han llevado a cabo varias pruebas experimentales a fin de evaluar el comportamiento de cada uno de los materiales presentados

### *3.1.- EL COMPORTAMIENTO DEL ALUMINIO EN LA COLADA CONTINUA.*

La Tabla V provee un cuadro sinóptico de las principales aleaciones de aluminio usadas en la colada continua a nivel mundial. Se verá que se han clasificado en dos clases según el tratamiento térmico necesario después de la colada continua: a) En frío y b) En caliente [19].

Industrialmente, las secciones delgadas (cuadradas o circulares) se obtienen mediante el método directo desde secciones transversales típicas de 100 a 200 milímetros que posteriormente se extruyen para reducirles su sección transversal. Aquellas que ha sido posible obtener directamente son las más fuertemente aleadas, tal como la composición 5056A (Al-5Mg-Mn) las cuales requieren ser escalpeadas cuando el espesor es grande (cerca de 200 milímetros). En el caso de secciones menores a 100 milímetros es necesario reducir la fricción en el molde haciéndolo oscilatorio, lo cual permite menor cantidad de pasos en el rolado [19].

El análisis del comportamiento de las aleaciones de aluminio en la colada continua se puede dividir en dos partes:

- A).- Comportamiento en el sistema dosificador
- B).- Comportamiento en pruebas experimentales

### **3.1.1- COMPORTAMIENTO EN EL SISTEMA DOSIFICADOR.**

Las condiciones operacionales en el sistema dosificador influyen de manera notable en las características y la operación de los productos obtenidos. Los aspectos son los siguientes:

- A) - Tendencia a la formación de inclusiones
- B) - Temperatura de colada
- C) - Velocidad de colada

#### **3.1.1.1- Tendencia a la formación de inclusiones no metálicas.**

Como se vio anteriormente esto es perjudicial en varios sentidos: reduce la calidad de los productos, aumenta la tendencia a la rotura, (puesto que las partículas entrampadas en la superficie disminuyen la transferencia de calor), y por último la oxidación del aluminio puede dar lugar a la obstrucción o taponamiento de la boquilla. Debido a ello es que se hará un análisis más exhaustivo de las causas que las originan.

- La tendencia a formar escorias de óxidos crece con la proporción de metales más oxidables que el aluminio tales como el magnesio, sodio, o calcio las cuales se generan con una relación de volumen inferior a uno [5]
- Deterioro del revestimiento de los recipientes, ya que si no es eficientemente resistente se deteriora, que se manifiesta cuando se hace polvo el cual es arrastrado por el líquido circulante contaminando el flujo continuo solidificado finalmente [6]. La causa principal de esto es el ataque químico.

#### **3.1.1.2.- Control de temperatura del metal líquido.**

En general, mientras más altas sean las temperaturas de colada mayor será la tendencia a la oxidación como se vio anteriormente, siendo por ello recomendable evitar todo sobrecalentamiento. Este aspecto resulta particularmente importante en el caso de aleaciones sensibles a la oxidación y a las roturas del flujo continuo. Y en particular tiene importancia para evitar el deterioro del revestimiento de protección.

#### **3.1.1.3.- Control del nivel y velocidad de alimentación.**

La relación de alimentación en el molde debe ser acorde con la cantidad de refrigerante en el mismo, lo que mejora la homogeneidad y calidad de la microestructura, reduce la tendencia a las roturas, se reduce la temperatura de fusión en el horno y se evitan los

saltos y turbulencias durante la alimentación del molde, evitando la oxidación y favoreciendo la flotación de escorias [5]

Clase de aleación y tipo	Designación internacional de la aleación	Composición aproximada (excluyendo impurezas) de los elementos aleantes, Peso -%					
		Cu	Mg	Si	Mn	Zinc	Otros
<b>A) Sin tratamiento térmico</b>							
Aluminio sin al	1080	99 80% min Al					
	1050	99 50% min Al					
	1200	99 00% min Al					
Al-Mn(-Mg)	3030 (3103) 3004		1 0				
Al-Mg(-Mn)	5005		0 8				
	505'		1 4				
	5052 (5252)		2 5				0 25 Cr
	5454		2 7		0 8		0 12 Cr
	5086		4 0		0 45		0 15 Cr
	5083		4 45		0 7		
Al-Si	5182		4 5		0 35		0 12 Cr
	5056		5 1		0 12		
	4043			5 2			
	4047			12 0			
<b>B) Con tratamiento térmico</b>							
Al-Mg-Si	6063		0 7	0 4			
	6061	0 27	1 0	0 6			0 2 Cr
	6082		0 7	1 0	0 5		
	6067	1 5	1 1	1 4	0 8		
Al-Cu(-Mg-Mg)	2014	4 4		0 8	0 8		
	2024	4 4			0 6		
	2219	6 3			0 3		0 1 V, 0 18 Zr
	2117	2 6					
Al-Zn-Mg(-Cu)	7005		1 4		0 4	4 5	0 15 Zr, 0 13 Cr
	7020		1 2			4 3	0 2 Zr
	7039	0 25	2 8		0 2	4 0	0 2 Cr
	7079	0 6	3 3			4 3	0 2 Cr
	7075	1 6	2 5			5 6	0 3 Cr
	7178	2 0	2 75			6 8	0 3 Cr

Tabla V. Aleaciones típicas y composiciones de cada una de ellas [19].



Con respecto a la velocidad de alimentación, para el caso del aluminio puro, los límites pueden ser bastante amplios sin originar repercusiones importantes sobre la calidad del colado continuo, bajo la condición de que la relación hierro silicio no sea superior a dos. Las aleaciones con límites estrechos (sobre todo aquellas con un gran intervalo de solidificación) presentan tendencia a la formación de grietas y roturas internas y para aquellas que exigen una cantidad abundante de refrigeración se requiere actuar sobre otros parámetros tales como, reducción de la zona de refrigeración, aumento de la altura del molde, etcétera. En la Fig. 29 se muestra la velocidad de extracción en función del diámetro [5]

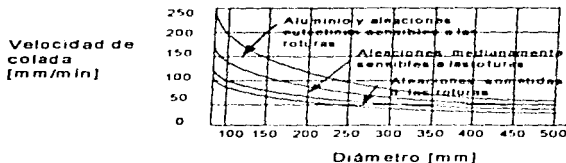


Fig. 29. Velocidad de colada en función del diámetro del lingote y del tipo de aleación [25]

### 3.1.2.- COMPORTAMIENTO EN PRUEBAS EXPERIMENTALES.

En México se han desarrollado varias pruebas para evaluar el comportamiento de la colada continua de barras de pequeño diámetro. Una de ellas se llevo a cabo según los datos que se muestran en la Tabla VI y en la Fig. 30 se da un esquema del equipo usado [25]. Del que es importante destacar que se uso un molde de cabeza caliente el cual mejora notablemente la microestructura del flujo continuo y permite mayores variaciones de la velocidad de alimentación, sin embargo, presenta algunos inconvenientes tales como la solidificación inherentemente discontinua de la cascara, lo cual puede propiciar la aparición de una zona segregada bajo la superficie [2].

La gráfica de la Fig. 31 presenta las relaciones que deben de prevalecer entre la velocidad de colada y la temperatura en las que se puede obtener un flujo continuo según resultados obtenidos de dicha prueba

Características del molde	Velocidad de colada	Temperatura
Diámetro..... 30 mm	Desde ..... 20 cm/min Hasta ..... 28 cm/min	Desde ..... 685 °C Hasta ..... 722 °C

Tabla. VI. Datos de una prueba para obtener secciones transversales pequeñas de aluminio (30 milímetros) cuya composición es: Al=96 4%, Fe=1 34%, Ni=0.38%, Cu=1 24% y Mn=0 53% [25]

### 3.2.- EL COMPORTAMIENTO DEL ZINALCO EN LA COLADA CONTINUA

El crítico encarecimiento de los productos de aluminio en México motivo al desarrollo de una serie de investigaciones tendientes a sustituir este metal tan valioso en la actualidad [2]. Debido a ello se iniciaron investigaciones con la intención de encontrar una aleación que pudiera sustituir al aluminio, bajo la condición de que tuviera como componentes principales el zinc o el cobre, debido a que México es uno de los principales productores a nivel mundial de estos minerales [2]. Tal situación no se debe exactamente a que exista escasez mundial de aluminio, puesto que es uno de los materiales más abundantes en la corteza terrestre, sino que el crecimiento de la demanda Nacional ha sido tan enorme que en 1980 llegó casi a triplicar la producción, razón por la cual se ha tenido que recurrir a la importación de productos terminados que se deben pagar en dólares encareciendo el producto, igualmente se ha recurrido a la importación de materia bruta, pero su transformación requiere de grandes cantidades de electricidad que también lo encarecen. Este climax tan desfavorable se debe principalmente a que México no cuenta con yacimientos de bauxita, mineral que se transforma para obtener el aluminio. No fue sino hasta 1984 cuando el Doctor Gabriel Torres Villaseñor, miembro del Instituto de Investigación de Materiales de la UNAM dio a conocer una aleación que supera las restricciones anteriores. La aleación se llama zinalco. A partir de ese momento se llevaron a cabo varias pruebas experimentales con dicho material en el campo del colado en dado, anodización, etcétera, no sin incluir la colada continua la que ocupa interés en esta tesis [2].

A grandes rasgos, el zinalco es básicamente un eutécticoide (aquella composición que pasa directamente de sólido a líquido durante la fusión, o bien que pasa directamente de líquido a sólido durante la solidificación) compuesto de zinc en un 80%, aluminio en un 20% y modificado con 2 a 5% de cobre aunque las composiciones pueden variar de acuerdo a ciertas características [23], así el análisis del comportamiento del zinalco se puede dividir en dos partes

- A) - Comportamiento en el sistema dosificador
- B) - Comportamiento en pruebas experimentales

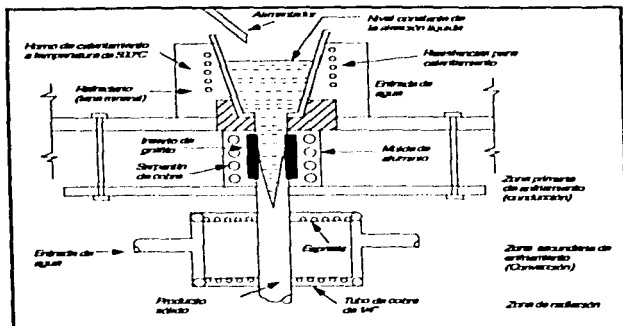


Fig. 29. Esquema de una máquina de colada continua para secciones de aluminio (3 cm) [25].

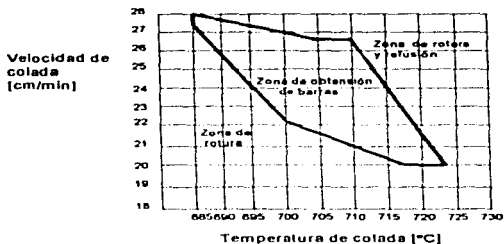


Fig. 31. Condiciones de operación en las cuales es posible obtener flujo continuo en una prueba experimental de colada semicontinua de aluminio de sección delgada (3 cm) [25].

### ***3.2.1.- COMPORTAMIENTO EN EL SISTEMA DOSIFICADOR.***

El zinalco por ser una aleación relativamente nueva ha recibido amplia difusión e impulso en el campo de la colada continua. Los aspectos más relevantes que se reportan al respecto enfocándolos al sistema dosificador son

A) - Tendencia y medidas para evitar la formación de inclusiones no metálicas

B) - Preparación de la aleación

Tales aspectos tienen relevancia en la limpieza y fusión de la aleación

#### ***3.2.1.1.- Tendencia a la formación de inclusiones.***

Debido a que las aleaciones son heterogéneas en su composición, es necesario buscar la reactividad de los materiales refractarios, con el metal  $\pm$  fundido en su conjunto, por ello es que se deben implementar los mejores métodos de fusión y adición de componentes acordes a dicho comportamiento con la finalidad obtener mejor desempeño al respecto, para lo que se analiza cada componente del zinalco que como se recordara son, el zinc, aluminio y cobre

##### ***3.2.1.1.1.- Zinc***

Cuando se requiere resistencia a la abrasión, baja porosidad, resistencia las escorias ferrominosas y al resquebrajamiento se han usado refractarios de alta alúmina, carburo de silicio y magnesita satisfactoriamente, pero el mejor servicio se ha obtenido con arcilla refractaria de baja porosidad También se reporta que se han utilizado el circón, la silice y el olivino como materiales más comunes [46]

##### ***3.2.1.1.2.- Aluminio***

Se reporta que se ha hecho un examen de laboratorio para evaluar el comportamiento de distintos materiales refractarios en presencia de aluminio fundido silice, arcilla refractaria aluminosa, cromita, carburo de silicio y magnesita, presentando también una correlación entre la penetración y la textura del ladrillo La mínima reacción tomo lugar con los siguientes refractarios cromo, magnesita o carburo de silicio y el ataque más severo se presentó en los refractarios de silice También se han desarrollado pruebas para evaluar el uso del circón en este campo, en las que se encontró que la tendencia del aluminio fundido a reaccionar con el circón es ligera pero lo suficiente para satisfacer las exigencias de los hogares de los hornos, tales como limpieza del metal y larga vida. Los refractarios de circón podrán hacerse de alta pureza y es muy recomendable que contengan pocas cantidades de otras componentes, tal como la cerámica, las cuales reducen su propiedad de no mojarse con la escoria del metal [45]

### ***3.2.1.1.3.- Cobre.***

Los refractarios de cromita y magnesita son los únicos materiales que soportan la escoria de cobre satisfactoriamente según operaciones llevadas a cabo y también se ha usado la arcilla refractaria para hornos de rebervedero en los que se separa la escoria del material útil [45].

### ***3.2.1.1.4.- Zinalco.***

Para la fusión del zinalco son adecuados los crisoles de grafito recubiertos con una capa de alúmina u óxido de circonio. Los crisoles de hierro no son recomendables ya que hay una gran avidez del zinalco por el hierro, sin embargo, un crisol de acero inoxidable como aquellos usados en la fusión del aluminio puede servir [44]

### ***3.2.1.2.- Manera de llevar a cabo la fusión.***

Se ha mencionado que la manera de llevar a cabo una aleación depende de los siguientes factores reactividad de los materiales refractarios y el aire ambiente y volatilización. Espinoza Melendrez reporta un método que concilia dichos aspectos el cual ha sido usado exitosamente en varias pruebas (todas ellas citadas en el artículo siguiente), la cual trata de la manera de efectuar la fusión y adición de aleantes.

"La preparación de las cargas de zinalco puede ser mediante lingotes de aleación madre mezclados con zinc de alto grado, no es necesario el uso de fundentes, puesto que la pequeña cantidad de escoria formada se puede separar fácilmente momento antes de la colada. además, la utilización de chatarra no implica problemas "

"La aleación se prepara a partir de zinc alto grado, chatarra de aluminio y alambre de cobre para tener aproximadamente la siguiente composición química zinc 77%, Aluminio 21% y cobre 2% "

"La fusión de la aleación se realiza en un crisol de arcilla por medio de un horno de atmósfera libre a 700 °C, y los pasos para llevarla a cabo son los siguientes de acuerdo a la técnica de J. Negrete [44]

1.- Primero se funde la chatarra de aluminio siendo ésta de perfiles estructurales (punto de fusión aproximado 659 °C)

2.- Cuando ya esta fundida la carga de aluminio, se añade rápidamente el cobre para evitar su oxidación y la pobre difusión del mismo en la aleación líquida (punto de fusión aproximado 1083 °C

3.- Por último, se agrega el zinc (punto de fusión aproximado 420 °C) conservando la temperatura del horno a 700 °C. Lo cual tiene la finalidad de evitar la evaporación de este material por ser tan volátil.

Una vez que la carga esta totalmente fundida, se agita con una varilla de grafito (o un pedazo de madera con la finalidad de homogeneizar y desoxidar la aleación) de lo cual se procede a vaciarla en una lingotera cilindrica de 15 centímetros de diámetro. Ya que la aleación ha solidificado y se han practicado los análisis químicos necesarios (para asegurar que esta dentro de la composición química deseada) el material es cortado en pequeños trozos para su fusión posterior y realización de ensayos. La aleación sólida es introducida en un crisol de una capacidad aproximada de 2 Kilogramos pudiendo ser éste de carbón grafito o arcilla, aunque se recomiendan los primeros por ser de mayor resistencia a la temperatura, ya que en los de arcilla, no obstante que es necesaria esa propiedad, sufren agrietamientos, inclusive cuando son dejados enfriar en el horno, cosa que no sucede con los de grafito.

"El crisol lleno con el material de estudio es introducido en un horno (tipo mufla con un intervalo de 0 a 1000°C ) y se la va aumentando la temperatura paulatinamente con la finalidad de evitar posibles choques térmicos que perjudican al crisol, pudiendo producirse un agrietamiento total. Cuando la aleación a alcanzado el estado líquido, se le van agregando trozos de metal sólido hasta que la capacidad del crisol lo permita; y cuando esto sucede se procede a homogeneizar y desoxidar nuevamente hasta que la reacción que se verifica pase de violenta a calmada y al terminar la operación se procede al desescoriado".

Por último, es importante hacer notar que el bajo punto de fusión del zinc lo hace muy volátil a bajas temperaturas relativas y no deberá de ser más alto de 600°C puesto que comienza a evaporarse, lo cual es dañino para la salud [49].

### ***3.2.2.- COMPORTAMIENTO EN PRUEBAS EXPERIMENTALES.***

En este campo se han hecho varias pruebas para evaluar las características de operación y de los productos obtenidos. Los rasgos esenciales de dichas pruebas llevadas a cabo en el Instituto de Investigación de Materiales de la UNAM se muestran en la Fig. 31, las pruebas 1 y 2 se usaron para analizar la temperatura y velocidad de la colada y las propiedades mecánicas de los productos obtenidos, en cambio, las pruebas 3 y 4 se hicieron para analizar el comportamiento de la microestructura del producto obtenido. A continuación se muestran los sistemas de colada continua y/o los resultados obtenidos en cada prueba. El método de colada utilizado en todos los casos fue semicontinuo.

#### ***3.2.2.1.- Prueba uno.***

Se obtuvieron productos aceptables en cuanto a calidad, puesto que de ellos se ha logrado fabricar láminas y tornillos. Las velocidades de extracción oscilaron de 1 a 4 [mm/s]. El equipo utilizado fue un horno de fusión hasta 700°C para evitar la solidificación del zinalco, el calentamiento se efectuó mediante resistencias eléctricas de Kantal y el control de temperatura posterior mediante un termopar de cromo-aumel [47].

Nº de prueba / Referencia	Sección transversal X largo [mm]	Temperatura de colada [°C]	Velocidad de colada [mm/s]	Medida de dendrita [ $\mu\text{m}$ ]
1 / [47]	-----	515 a 540	1.69 a 5.86*	-----
2 / [23]	30X2000	500	1.0 a 3.0	-----
3 / [48]	30X1500	500 a 550	0.3 y 2.3	165 Centro 90 Exterior 30 Centro 11-75 Exterior
4 / [49]	37X2000	600	-----	58 a 71**

\*La velocidad de extracción aumentaba gradualmente hasta el valor mayor

\*\*La microestructura se mantuvo casi constante en la sección transversal así como a todo lo largo del producto solidificado

Fig. 32. Pruebas de aleaciones de zinalco efectuadas en el laboratorio de Investigación de Materiales.

### 3.2.2.2.- Prueba dos.

El equipo utilizado fue el mismo que en la prueba anterior. Los resultados del experimento se pueden considerar haciendo una evaluación de las variables usadas en cuanto a los siguientes puntos [23]

#### 3.2.2.2.1. Propiedades mecánicas y operación.

En la Fig. 33 se muestran los importantes resultados correlacionados con la operación de la colada continua y su influencia en las propiedades mecánicas de diez muestras obtenidas. El promedio de valores de todas aquellas fue:

$$\sigma_{\text{ced}} = 26.65 \text{ [Kg/mm}^2\text{]} (261.17 \text{ [Mpa]})$$

$$\sigma_{\text{máx}} = 32.02 \text{ [Kg/mm}^2\text{]} (313.80 \text{ [Mpa]})$$

$$\text{Elongación} = 3.67\%$$

$$\text{Reducción de área} = 9.35\%$$

$$\text{Dureza} = 71.3 \text{ R}_b$$

Respecto a la velocidad de extracción del colado se usó un rango de 1.69 a 3.81 [mm/s] puesto que no se presentaron problemas de solidificación en el horno de colada.

### 3.2.2.2.- Análisis químico.

En esta prueba existe una desviación en los porcentajes de aluminio y cobre de 2.47 y 15% respectivamente. En el caso del aluminio esta desviación no se considera tan drástica; no así para el cobre, lo que debe haber influido significativamente en las propiedades mecánicas resultantes [23].

### 3.2.2.3.- Microestructura.

Las microestructuras obtenidas están constituidas de dendritas formadas básicamente por colonias de perlita fina, perlita gruesa en menor proporción y en el líquido interdendritico un porcentaje mínimo de perlita no desarrollada [23].

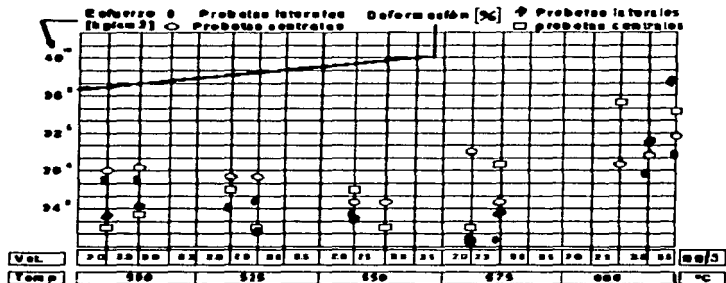


Fig. 33. Gráfico llevado a cabo en base a los resultados de esfuerzo-deformación de diversas pruebas en el experimento de la Referencia 48 en los que influye la velocidad de extracción del colado y la temperatura (Los eventos que no aparecen fueron descartados por no ser confiables).

### 4.2.3.- Prueba tres.

Se hicieron experimentos caracterizando dos grupos, según las condiciones de colado. El primero fue a alta velocidad y el segundo a baja velocidad. Microscópicamente, la superficie de cada barra mostró pequeñas protuberancias anulares separadas



periódicamente como las presentadas para el aluminio en la Fig.18a-d, tales protuberancias tienen su origen en la refusión de la primera capa sólida formada entre el líquido y el molde [48]

Los ensayos de tensión se llevaron a cabo con muestras de ambos grupos de barras, encontrándose valores de límite elástico convencional a 0.2% ( $\sigma_{0.2}$ ), módulo elástico (E), resistencia máxima a la tensión ( $\sigma_m$ ) y deformación a la ruptura ( $\epsilon_r$ ) (según normas ASTM) lo cual se muestra en la Fig.34. En esta misma tabla aparecen los valores correspondientes para los casos de zinalco obtenido por colada en molde permanente, una aleación peritética de zinc-aluminio y dos aceros

#### 3.2.2.4.- Prueba cuatro.

En esta prueba se obtuvieron barras de zinalco con estructura dendrítica fina laminar. El equipo usado consta de un horno directamente acoplado, una cuchara y el tundish semejantes a una máquina de colada continua típica para el acero (Fig 35). Ambos recipientes tienen calefacción propia y el control de temperatura fue de  $600 \pm 5$  °C. Se escogió esta temperatura porque arriba de esta se comienza a evaporar el zinc [48]

Aleación	Dureza [Rb]	Densidad	$\sigma_2$ [Mpa]	E [GPa]	m	r
zinalco s.c.s*	713	5.41	365	197.5	497	20-28
zinalco s.c.s*	6310	4.04	333	166.5	429	410
zinalco c.m.p	532	5.4	280-300	280-300	300	10-12
ZA-27 mp			365	365	420	13
ANSI-1117 lam			305	305	486	33

c.s.c. colada semicontinua

c.m.p Colada en molde permanente

\* Velocidad de extracción  $2.3 \times 10^{-3}$  [m/s], temperatura de colada 540 °C

\*\* Velocidad de extracción  $3 \times 10^{-4}$  [m/s], temperatura de colada 515 °C

Fig. 34. Valores encontrados en la colada semicontinua de zinalco y en molde permanente así como una aleación de zinc aluminio y de algunos aceros [48].

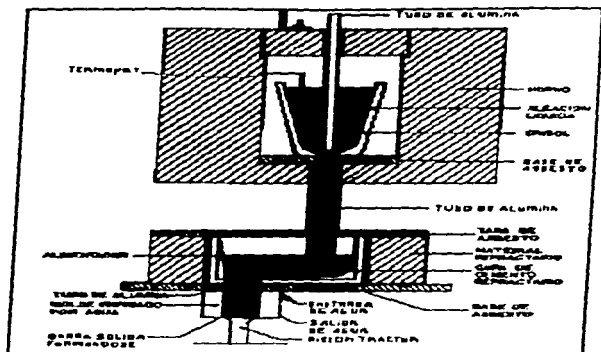


Fig. 35. Equipo usado en colada continua de zinc, observe la implementación de tundish para separación de escorias [49].

## CAPITULO IV

### LOS REFRACTARIOS EN EL SISTEMA DOSIFICADOR

Los refractarios son materiales cuyas características son idóneas para estar en contacto con el metal fundido, tal y como lo señala Kirk [32] "los refractarios son materiales que resisten los agentes químicos y físicos especialmente a temperaturas elevadas", de estas características se puede destacar que

- Tienen poca actividad química con los metales fundidos así como con sus escorias
- Son resistentes a los agentes físicos por su bajo coeficiente de expansión, lo cual hace mínimo el esfuerzo que debe soportar la estructura cuando es sometida a fluctuaciones bruscas de temperatura
- Son moldeables y bastante fuertes, como para resistir el desgaste
- Tienen un alto punto de fusión sin sufrir deformación al respecto

Tales materiales tienen crucial importancia en el desempeño del sistema dosificador y en los resultados de los productos obtenidos, por tal motivo es muy importante conocer los aspectos esenciales que atañen al respecto. El plan necesario para llevar a cabo esto es primero conocer las variedades comerciales que existen, posteriormente con el objeto de entender algunos términos que los fabricantes de materia prima manejan tales como porosidad, densidad, etc. será necesario y suficiente con dar una introducción al proceso para fabricar la materia prima y por último estimar la problemática al tratar de aplicarlos al caso específico del sistema dosificador. Esto se puede resumir en los puntos

- A) - Refractarios para no ferrosos
- B) - Proceso general de fabricación de una pieza refractaria
- C) - Comportamiento en el sistema dosificador

#### 4.1. REFRACTARIOS PARA NO FERROSOS.

Existen muchos tipos de materiales con cualidades refractarias. A fin de conocer los criterios al hacer la mejor selección entre uno y otro para cada aplicación, es necesario conocer las características y propiedades que se ofrecen en el mercado. Tales aspectos se pueden englobar en dos partes

- A).- Clasificación de los refractarios

B) - Características de los refractarios para metales no ferrosos

#### **4.1.1.- CLASIFICACION.**

Los materiales refractarios se pueden clasificar en primera instancia por la función que realizan como aislantes térmicos o conductores del calor. Comercialmente también se encuentran dos características sumamente importantes en su aplicación

A) - Comportamiento químico

B) - Presentación física

##### **4.1.1.1.- Comportamiento químico.**

Desde el punto de vista químico los refractarios se clasifican según su grado de acidez (Ph)

A) Ácidos Silice, arcilla refractaria, circon y la zircona

B) Básicos magnesita, dolomita (variedad de la magnesita) y cal

C) Neutros Productos ricos en alúmina, cromo carbono y carburo de silicio

En teoría, los refractarios ácidos no deben estar en contacto con las escorias básicas; así mismo, los refractarios básicos no deben estar en contacto con escorias ácidas. Los refractarios neutros tienen la facultad de estar en contacto con escorias básicas o ácidas por su nulo índice de acidez [33]

##### **4.1.1.2.- Presentación física.**

Los refractarios se encuentran en el comercio en diversas formas físicas ladrillos, materiales de cementación finamente molidos, plásticos variables y granulares sueltos [32]

###### **4.1.1.2.1- Ladrillo.**

El principal producto refractario es el ladrillo y formas similares. Comúnmente se usan en forma de mortero unido mediante materiales para cementación. Aparte de los ladrillos se fabrican diversas formas estandarizadas en varios tamaños los cuales se pueden acoplar en la construcción de diversas estructuras, tales como techos, paredes, soportes o piso de todos los tipos de hornos metalúrgicos. Igualmente se encuentran disponibles otro tipo de formas especiales como toberas, formas diversas, boquillas y para aplicaciones especiales de diferentes tipos de hornos [32]

#### **4.1.1.2.2.- Materiales para cementación.**

Se utilizan para recubrir, colocar o parchar obra de albañilería. Tienen que absorber las irregularidades que pueden existir en las superficies que van a unir e impedir por completo el paso del gas a través de las juntas, todo ello con un espesor total mínimo. El tamaño de grano no puede, por lo tanto exceder a un milímetro. La proporción de aglutinante a material no plástico debe ser tal que pueda obtenerse por amasado con agua un material moldeable plástico que sea fácil de aplicar con una paleta, que no se agriete en el secado y que en la cuchara no se funda ni escurra. En general la calidad, composición y refractariedad del mortero deberán asemejarse a los ladrillos que han de unir y sus propiedades de expansión deben ser también comparables [33]

#### **4.1.1.2.3.- Plásticos**

Los refractarios plásticos, formados a base de casi todos los materiales refractarios comunes son esencialmente mezclas sin moldear, húmedas y suministradas para obtener formas especiales y secciones continuas en hornos monolíticos [34] (sin juntas) en el lugar de la instalación para reparar daños de cualquier forma o tamaño sin tener que desmontar todos los ladrillos dañados [33]. Se apisonan en el piso a presión relativamente baja y se calientan por el calor del horno en el que se instalan y su empleo no requiere mano de obra especializada. Puede conferírseles una aglutinación inicial adicional por incorporación de aglutinantes orgánicos y siliconas. Para lograr la máxima refractariedad deberá emplearse el mínimo de arcilla aglutinante y deberán excluirse rigurosamente los fundentes, pese a que muchos de ellos podrían contribuir a la aglutinación [33].

#### **4.1.1.2.4.- Vaciablos.**

Son hormigones refractarios y los agregados abarcan casi todos los refractarios comunes y son porosos. Se les puede usar como aislantes térmicos y se suministran en forma adecuada para verterlos o colocarlos en moldes o bien para ser aplicados con agua y presión mediante pistola de disparo (llamados gunnín mixes) [35] o bien, mediante brocha [33]. Son aplicables las consideraciones generales dadas de los morteros y puede ser necesario emplear un mejor tamaño de grano para la aplicación a pistola y una menor cantidad de arcilla aglutinante a fin de evitar la contracción. Con objeto de conseguir una adhesión inmediata en las aplicaciones a pistola sobre las superficies calientes puede incluirse una pequeña cantidad de material fusible [33].

#### **4.1.1.2.5.- Refractarios secos.**

Estos materiales no contienen agua o líquido. Al momento de su instalación toman su forma física y no requieren humedad ni aglomerante hidráulico para la fusión inicial. Durante la sinterización se acelera la reacción del aglutinante químico especial que produce endurecimiento a baja temperatura. Según sea la aplicación, puede diseñarse para endurecer durante su exposición a temperaturas tan bajas como 200 °C hasta

temperaturas tan altas como 1100 °C La sinterización inicial del refractario depende del tipo y la cantidad de aglutinante agregado la cual debe ser siempre precisa y exacta También sirven como protección contra fallas mecánicas y térmicas así como también es una zona de refractario que se usa para disipar las penetraciones del metal [35].

#### **4.1.2.- CARACTERISTICAS DE LOS REFRACTARIOS PARA NO FERROSOS.**

Según el apartado anterior, los materiales refractarios usados en la industria metalúrgica no ferrosa son: sílice-alúmina (sílice para el zinc y alúmina para aluminio), arcilla, circón, cromo, magnesita, carburo de silicio y grafito para el aluminio y el zinc y finalmente el olivino únicamente para el zinc. En la Tabla VII se muestran las características físicas de los principales materiales refractarios, los cuales se tratan a continuación, para ello es conveniente dividirlos en familias:

- A).- Familia de la sílice.
- B).- Familia de la arcilla.
- C).- Familia de la alta alúmina.
- C).- Familia de la magnesita.
- D).- Familia del cromo.
- E).- Familia de la zircona.
- F).- Familia del carbono.

A continuación se muestra de manera general las características de los refractarios a los que pertenecen dichas familias. Frecuentemente se mencionara el refractario en forma de ladrillo por ser la más comercial.

##### **4.1.2.1.- Familia de la sílice.**

La sílice se usa en estado puro con pequeñas cantidades de cal o con 20% de alúmina en su composición. Existen dos variedades, la sílice pura y la semisílice.

##### **4.1.2.1.1- Sílice casi pura.**

Es el refractario más ácido que se conoce. Por ello es que se usa ampliamente en los hornos siderúrgicos de acero por medio del método ácido. El ladrillo esta constituido de dos óxidos importantes: la sílice y la cal. A causa del gran predominio de primer ingrediente como fase individual, su comportamiento térmico esta influenciado en su

temperaturas tan altas como 1100 °C. La sinterización inicial del refractario depende del tipo y la cantidad de aglutinante agregado la cual debe ser siempre precisa y exacta. También sirven como protección contra fallas mecánicas y térmicas así como también es una zona de refractario que se usa para disipar las penetraciones del metal [35].

#### **4.1.2.- CARACTERISTICAS DE LOS REFRACTARIOS PARA NO FERROSOS.**

Según el apartado anterior, los materiales refractarios usados en la Industria metalúrgica no ferrosa son: sílice-alúmina (sílice para el zinc y alúmina para aluminio), arcilla, circón, cromo, magnesita, carburo de silicio y grafito para el aluminio y el zinc y finalmente el olivino únicamente para el zinc. En la Tabla VII se muestran las características físicas de los principales materiales refractarios, los cuales se tratan a continuación, para ello es conveniente dividirlos en familias:

- A).- Familia de la sílice.
- B).- Familia de la arcilla
- C).- Familia de la alta alúmina.
- C).- Familia de la magnesita.
- D).- Familia del cromo.
- E).- Familia de la circonita.
- F).- Familia del carbono.

A continuación se muestra de manera general las características de los refractarios a los que pertenecen dichas familias. Frecuentemente se mencionara el refractario en forma de ladrillo por ser la más comercial.

##### **4.1.2.1.- Familia de la sílice.**

La sílice se usa en estado puro con pequeñas cantidades de cal o con 20% de alúmina en su composición. Existen dos variedades, la sílice pura y la semisílice.

##### **4.1.2.1.1.- Sílice casi pura.**

Es el refractario más ácido que se conoce. Por ello es que se usa ampliamente en los hornos siderúrgicos de acero por medio del método ácido. El ladrillo está constituido de dos óxidos importantes: la sílice y la cal. A causa del gran predominio de primer ingrediente como fase individual, su comportamiento térmico está influenciado en su

mayor parte por la acción de las varias formas cristalinas poliformas de diferente estabilidad térmica. Tal inestabilidad, se verifica como las bruscas contracciones o expansiones de cada cambio de fase que pueden ser causa del resquebrajamiento del ladrillo. Por ello es que el calentamiento o enfriamiento de los refractarios de sílice deberá efectuarse lentamente en los intervalos de temperatura de cambios de fase [32]. Además de emplearse la cal como componente adicional, se añade con frecuencia el caolín o arcilla refractaria cuando se pretende que tenga una resistencia al choque térmico mayor aún, en detrimento de su punto de ablandamiento [34].

Las fases que se presentan en el calentamiento de la sílice son la cristobalita y la tridimita con predominio de la primera. Aproximadamente 2% de cal se agrega a las mezclas de ladrillo de sílice como "mineralizador" para acelerar la formación de cristobalita y tridimita a partir del cuarzo y para formar una ligazón durante la coadura [34,38].

#### *4.1.2.1.2- Semisílice.*

Aquellos ladrillos que tienen como base la sílice pero en cantidades moderadas de este son llamados de esa manera. Están constituidos aproximadamente ya sea de un 88% (sílice natural), o bien mezclada con cuarcitas y cerca de 15% de arcillas y caolines refractarios [34] los cuales tienen un punto de ablandamiento más bajo que los primeros y su utilización es adecuada en donde la temperatura no es muy alta, incluyendo una mayor regularidad de expansión térmica [34].

#### *4.1.2.2.- Familia de la arcilla.*

Este grupo está constituido esencialmente por alúmina ( $Al_2O_3$ ) y sílice ( $SiO_2$ ). Las dos variedades se conocen comúnmente como arcilla y el caolín. La primera de ellas contiene alrededor de 30% de alúmina (como ejemplos están vasijas o recipientes) y la segunda alrededor de 45% de alúmina (como ejemplo la porcelana típica) [32].

La cerámica, con menores cantidades de alúmina que la arcilla refractaria (20% aproximadamente) se puede usar como refractario. Las arcillas y la cerámica tienen diversas impurezas que disminuyen su refractariedad por lo cual deben estar en pequeñas cantidades, las cuales se encuentran en cantidades de 5% a 10% generalmente, en el ladrillo superductil la cantidad de álcalis es alrededor de 1% y el total de impurezas aproximadamente de 4 a 5% [35].

Comúnmente se utilizan en los casos en los cuales no se ha determinado con certeza la aplicación más adecuada, cuando no se tienen temperaturas excesivamente altas como para causar reacciones o condiciones especiales, o bien si el deterioro por ataque químico se compensa por su utilidad [34].



Material	Densidad [Kg/m <sup>3</sup> ] [32]	Punto de fusión [°C] [32]	Calor específico [Kcal/Kg°K] [32]	Conductivida d térmica [Kcal/Kgmhr] [32]	Módulo elástico [41]	Módulo de Poisson [41]	Resistenc ia última a la tensión [MPa] [41]	Módulo elástico [Mpa] [41]	Coefficiente de expansión lineal [°C/m/m]X 10 <sup>6</sup> [41]
Grafito	2.25	2800	0.22	86.81	—	—	12	—	1
Alumina	4.0	2015	0.270	2.72	380	—	350	380	8.3
Mullita	3.16	1830	0.238	2.05	145	0.26	100	145	4.5
Circón	4.7	2500	0.132	2.46	100	—	—	100	3.7
Carburo de silicio	3.17 3.6	2199 2500	0.19 0.257	5.64 3.42	460 207	0.14 0.36	400 200	460 207	5.2 14.3
Magnesita	2.6	1890	0.229	0.12	—	—	—	—	5.1
Arcilla	5.5	2700	0.168	0.62	—	—	—	—	11.9

Tabla. VII. Características más trascendentes de los refractarios usados en la industria no ferrosos (debajo de cada variable aparece la referencia).

#### 4.1.2.3.- Familia de la alta alúmina.

Los refractarios ricos en alúmina (mayor de 50%) son en su mayor parte cristalinos a las temperaturas del horno y por ello actúan como superrefractarios (soportan en gran forma el choque térmico, por ello es que no requieren precalentamiento) Cuando están bien cocidos, los ladrillos contienen una mayor cantidad de mullita y menor fase vítrea, que la que esta presente en los ladrillos de arcilla refractaria. También hay coridón en muchos de ellos. Se utilizan generalmente para condiciones poco severas de temperatura y carga, además tienen buena resistencia a las escorias básicas y excelente a las escorias ácidas. Se obtienen a partir del grupo de minerales conocidos como silimitas (andalusita, cianita y silimita, los cuales contienen aproximadamente 65 % de alúmina), la mullita (80% de alúmina ) y de la bauxita que es casi alúmina pura [32].

#### 4.1.2.4.- Familia de la magnesita.

La familia se divide en tres grupos, la magnesita con alta pureza, el olivino y por último los refractarios de magnesita-cromo.

##### 4.1.2.4.1.- Magnesita con alta pureza.

Este refractario suele estar mezclado con impurezas de óxido de calcio (que no deben exceder en 4% de la composición) y óxido de hierro (que reduce considerablemente la refractariedad pero puede tolerarse hasta un 20% en la composición) La alúmina en proporciones bajas hasta el 2, 3 o 4% no disminuye, sino al contrario, aumenta la resistencia al choque térmico pero en cantidades tan elevadas puede ser perjudicial [34]. También es preferible que el refractario tenga algún porcentaje de óxido de hierro, con lo que se consigue que su cocimiento sea a temperatura menor [37]. Tiene elevada resistencia a la corrosión y frecuentemente de estructura muy densa, así como refractariedad extremadamente alta y conductividad térmica elevada [38].

##### 4.1.2.4.2.- Olivino.

El olivino es un ortosilicato de magnesio compuesto de fosferita ( $Mg_2SiO_4$ ) y la fayalita ( $Fe_2SiO_4$ ). La temperatura de fusión del material depende de la composición de los constituyentes. La composición común consta de 7% de fayalita con un punto de fusión de 1830 °C. No se encuentran dificultades en el uso de los no ferrosos. Tiene un coeficiente de expansión térmica constante hasta 1100 °C, es buen conductor térmico y tiene alta densidad [43].

##### 4.1.2.4.3.- Magnesita-cromo.

Tienen robustez mecánica, estabilidad de volumen y resistencia a la abrasión y a la erosión a temperaturas altas excelentes así como al resquebrajamiento muy satisfactoria así como elevada resistencia a la corrosión y las escorias ácidas [33].

#### **4.1.2.5.- Familia del cromo.**

De las variedades del cromo se distinguen tres composiciones comerciales, los refractarios de alta contenido de cromita y los refractarios de cromo-magnesita

##### ***4.1.2.5.1- Cromita.***

La cromita se puede usar como material en crudo en cantidades que varían de 30 a 45% del total de la mezcla junto con la alúmina (de 24 a 35%), el óxido de hierro (de 10 a 16%) y la magnesita (de 10 a 20%) [38]. El refractario tiene dos fases de interés: una combinación de espinelas altamente refractaria, que comprenden del 74 al 95% de la masa y una matriz menos refractaria, compuesta en gran parte de silicatos de magnesita hidratados de los cuales son ejemplos la serpentina y el talco[32]

Las espinelas de la cromita no son más que el conjunto de todos los compuestos que forma la cromita con los demás componentes de la mezcla. Tal combinación se distingue por su alta estabilidad térmica y no es polimórfica como la sílice [38]

Los refractarios de altas cantidades de cromita tienen elevada resistencia a la corrosión por escorias y fundentes básicos y moderadamente ácidos. En general, las escorias básicas no se adhieren al ladrillo de cromita. En ciertas condiciones poco frecuentes, el óxido de hierro es absorbido y da lugar a una expansión perjudicial. Tiene conductividad térmica inferior a la magnesita, pero mayor que la arcilla refractaria, así como refractariedad bajo carga y resistencia al choque térmico relativamente bajos [38]

##### ***4.1.2.5.2.- Cromo-magnesita***

Una gran parte de los refractarios fabricados en la actualidad consisten de mezclas de magnesita y cromo crudo (de mena). Tienen como ventaja sobre la magnesita que resisten bien las variaciones térmicas (resistencia al choque térmico) y los inconvenientes que el punto de ablandamiento de estos ladrillos es relativamente bajo y cuando son sometidos bajo carga tienen elasticidad, es decir, que la deformación permanente empieza a temperaturas relativamente bajas, hasta el punto en que ha sido necesario crear otro ensayo para materiales a base de cromo o cromo magnesita que consiste en un ensayo de torsión [34]. Las propiedades particulares de este ladrillo son su robustez mecánica y estabilidad a temperaturas altas, una resistencia al resquebrajamiento entre buena y excelente así como a la corrosión y a las escorias ácidas y por último acusa cierta tendencia al hinchamiento en contacto con el óxido de hierro [38]

##### ***4.1.2.6.- Familia del circonio***

Esta familia esta constituida por el circonio y la zircona los cuales son unos de los compuestos más importantes usados en refractarios comerciales, especialmente en la colada continua de acero.

#### **4.1.2.6.1.- Circón.**

Este refractario se obtiene directamente del mineral crudo que lleva su nombre. Encuentra aplicación en la industria del aluminio, ya que resiste ampliamente su escoria la que no lo moja, formándose solo una pequeña cantidad de alúmina que no es muy adherente. También es ampliamente usado en la colada continua. Tiene resistencia satisfactoria al choque térmico y carece de inversiones cristalinas con una curva de expansión térmica uniforme [38]

#### **4.1.2.6.2.- Circonia.**

En su forma pura la circonia es monocíclica. Cuando se calienta sufre una transformación a estructura tetragonal a una temperatura de 1000°C o un poco más arriba. Lo que causa un cambio de volumen de alrededor de 9% (contracción durante el calentamiento y expansión durante el enfriamiento), lo cual genera esfuerzos tan altos que evita su uso como refractario [36]. Por ello es que se estabiliza con la adición de otros refractarios tales como la cal (de 5 hasta 15%), magnesita (de 8 hasta 15%) o óxido de yodo ( $I_2O_3$ , de 11.5 hasta 15%). Las mezclas se calientan en un rango de temperatura de 1500 a 1700°C. El resultado es que el material se mantiene en estructura cúbica, la cual tiene expansión térmica alta y uniforme desde la temperatura ambiente hasta altas temperaturas además de que es extremadamente refractaria. La circonia estabilizada es poco usada debido a su alto costo y en la mayoría de las aplicaciones puede sustituirse por otros refractarios [36]

#### **4.1.2.7.- Familia del carbono.**

A esta familia pertenecen el carbón, grafito y el carburo de silicio. El primero de ellos se oxida al aire con altas temperaturas lo cual es perjudicial ya que reduce su resistencia. En el caso del carburo de silicio la sílice es más propensa a oxidarse lo que reduce la resistencia.

#### **4.1.2.7.1.- Carbón y grafito.**

Ambos materiales son de carbón, pero la diferencia entre ambos radica en su estructura intermolecular. El primero de ellos se considera amorfo dependiendo de la temperatura que alcance durante la manufactura, el segundo está formado de cristales y tiene una estructura hecha de láminas de átomos de carbón con un arreglo hexagonal [36] y no es mojado por muchos de los materiales fundidos. Ambos tienen excelente resistencia al choque térmico la cual aumenta con el incremento de temperatura particularmente el grafito, también se usan con frecuencia en combinación con otros materiales que aumentan la resistencia al choque térmico y a la erosión [36]

#### **4.1.2.7.2- Carburo de silicio.**

El refractario tiene gran capacidad de soporte de cargas, tanto en frío como en caliente, resistencia al resquebrajamiento, características de transmisión de calor, resistencia muy notable a las escorias ácidas y a la abrasión mecánica, alta refractariedad y resistencia a la oxidación satisfactoria hasta los 800°C, pero baja resistencia eléctrica a altas temperaturas [38]

Debido a que el carburo de silicio al sinterizarse a la presión atmosférica no alcanza compactación suficiente se han desarrollado diversos métodos para llevar a cabo la operación. Entre los cuales se mencionan dos, el primero requiere la adición de arcilla refractaria a 90% de carburo de silicio en la composición, pero aún así el refractario es vulnerable al ataque de la atmósfera. El segundo consiste en añadir  $Si_3N_4$  o bien  $Si_2ON_2$ , ambos pueden añadirse al efectuar la sinterización atmosféricas necesariamente controladas, lo primero se puede conseguir mediante la adición de sustancias nitrogenadas, tales como áminas o ámidas [38]

## **4.2.- PROCESO DE FABRICACION DE UNA PIEZA REFRACTARIA.**

El proceso se puede resumir en tres partes

1) **Obtención y preparación de la materia prima** - El refractario crudo o sin procesar se obtiene a partir de piedras de minerales que se encuentran en bancos, las que posteriormente se rompen en máquinas especiales de mandíbulas con lo cual se reduce su tamaño. El material obtenido se calcina a alta temperatura a fin de eliminar la mayor parte de las impurezas indeseables. Seguido, el polvo resultante se tamiza haciéndolo más fino mediante mayas de diversos tamaños de retícula, obteniéndose lotes de tamaños de grano grueso, mediano y fino, con la finalidad de que al combinar determinado porcentaje de cada uno de ellos y chamota (material cocido de desperdicio) se consiga una porosidad menor y más homogénea. El mineral así tratado se combina a su vez con otros en proporciones establecidas a fin de estabilizar las fases [38]. En general, se prefiere un polvo más fino sobre uno grueso, ya que la primera opción da origen a que se obtenga menor porosidad lo cual es muy importante para el buen desempeño del zinc debido a su baja tensión superficial lo cual lo hace más inmune a la penetración del metal líquido.

Las operaciones anteriores se realizan según la presentación y/o la aplicación a que se vaya a destinar el refractario, por último se le agregan aglutinantes, agua u otras sustancias y en algunas ocasiones puede pasar a otros tratamientos posteriores, por ejemplo, en el material destinado al moldeo con mejorables características se requiere dar una granulación especial mediante asperjado [41]

2).- **Conformación.** La materia prima llega a este punto para adoptar la forma para la que ha de ser destinado, por ejemplo, los aisladores eléctricos se hacen prensados y los crisoles son colados

3).- **Cambio de estructura.** Una vez que la pieza adquiere la forma deseada es necesario dar un tratamiento a la estructura intermolecular del material. La primera etapa es el secado que tiene la finalidad de eliminar la humedad así como provocar su completa contracción de tal manera que en el cocimiento no se generen esfuerzos excesivos. Por ejemplo, si el vapor de agua se volatiliza con demasiada velocidad puede hacer explotar a la pieza literalmente, debido a ello es indispensable hacerlo lento y cuidadosamente. En el caso de piezas grandes las contracciones desiguales son otra fuente de generación de esfuerzos que pueden agrietar la pieza. Mediante métodos tradicionales el material se puede secar al aire libre y si se requiere mayor rapidez se puede conseguir mediante la exposición a lámparas infrarrojas. La temperatura a la que se somete la pieza en el secado no va más allá de los 600 [°C]

El proceso continua con el cocimiento de la pieza la cual consiste en someter a la pieza a temperaturas muy altas (hasta 2000°C) según el material que se utilice y las características deseadas. La operación requiere un tiempo considerable y puede ser desde varias horas hasta varios días. Para el cocimiento de los accesorios, el Laboratorio de Manufactura de la U N A M Campús Aragón cuenta con un horno de inducción suficiente para provocar un calentamiento de 1000 [°C] en piezas pequeñas como la boquilla

#### 4.3.- COMPORTAMIENTO EN EL SISTEMA DOSIFICADOR.

Existen escasos datos disponibles enfocados específicamente a las características de los refractarios utilizados no ferrosos en el sistema dosificador, debido a ello será muy útil tratarlos usando como analogía de aquellos usados en la colada continua de acero. El desempeño y los requerimientos de tales materiales son diferentes en todas las partes del sistema dosificador, por eso es conveniente tratarlos de la siguiente manera

##### A) Recipientes del sistema

- Cuchara (Dispositivo recibidor)
- Tundish (Dispositivo alimentador)

##### B) Accesorios.

- Boquilla
- Válvula
- Conductos contra la reoxidación.

#### **4.3.1.- RECIPIENTES DEL SISTEMA.**

El recipiente receptor y el alimentador requieren un material de revestimiento de material refractario el cual esta sometido a condiciones muy parecidas para ambos por lo cual se tratan juntos: Formación de una capa solidificada de metal fundido en el recipiente a causa del enfriamiento de la pared refractaria (cáscaras solidificadas como las presentas en la Fig. 16. y penetración en las juntas de las paredes cuando se usa un mortero. Particularmente en el tundish se tiene erosión localizada. Los aspectos que intervienen en el desempeño de los revestimientos son

A) - Deterioro

B) - Material

##### **4.3.1.1.- Deterioro.**

El mantenimiento en buenas condiciones del revestimiento y su desempeño repercute ampliamente en los resultados que se obtienen de la operación del sistema dosificador, sin embargo, existen varios agentes que contribuyen a su deterioro los cuales se citan a continuación

##### **4.3.1.1.1.- Reacción química.**

La reacción química de la escoria con alguna las fases del refractario que lo constituyen o bien cuando no es afín químicamente con aquella sustancia es el fenómeno que mayormente contribuye al deterioro, lo que puede dar lugar a un compuesto de bajo punto de fusión. La medida con la que este fenómeno indeseable se produce depende fundamentalmente de la velocidad de reacción la cual a su vez esta muy influida por la temperatura. Por ejemplo, un aumento de temperatura de 10°C doblara la velocidad de reacción la cual generalmente, es grande a altas temperaturas y pequeña a bajas temperaturas. Más aún, en el último de los casos una reacción tan baja provocará que se generen pequeñas cantidades de compuestos los cuales, junto con el refractario pueden resistir satisfactoriamente a la escoria. Esta es la razón por la que el utilizar refractarios básicos frente a escorias básicas y refractarios ácidos frente a escorias ácidas no debe ser una regla como se menciona en el subcapítulo 4.1.1.1 [38]. Otro factor perjudicial que interviene es la penetración de la escoria la cual aumenta con el área de contacto. Si el refractario es denso, la superficie será uniforme, pero por otra parte, si es poroso, la superficie de contacto puede aumentar considerablemente lo que hará aumentar la difusividad [39].

##### **4.3.1.1.2.- Mojado de la superficie por la escoria.**

La tensión superficial o cantidad de cohesión de las partículas de la escoria influye en gran medida. En otras palabras, la escoria mojara con mayor profundidad el refractario si

la fuerza de cohesión es menor que la atracción capilar hacia los poros [39]. Debido a esta situación y a la abrasión constante, el tiempo de vida útil de los materiales de revestimiento es muy corto, por ello deben ser proyectados para sufrir constante reposición. Adicionalmente, tal remoción es benéfica para eliminar el material sucio que se adhiere a las paredes del recipiente inevitablemente [16].

#### 4.3.1.1.3.- *Material.*

Según K. K. Kappmeyer y colaboradores [51], las características que debe cumplir un material de revestimiento en el tundish (dispositivo alimentador) son: facilidad de aplicación, baja conductividad térmica, refractariedad adecuada, retención del módulo de esfuerzo durante el precalentamiento, resistencia a la abrasión y a la corrosión durante la operación de la colada y finalmente baja contracción durante el secado para minimizar la formación de rompimiento durante el precalentamiento.

El arreglo común de las paredes de los recipientes es colocar una estructura de ladrillos refractarios revestidos con otro refractario moldeable que entraran en contacto con el metal fundido.

El recubrimiento de trabajo de la cuchara normalmente son bloques prefabricados de 80% MgO, 6% SiO<sub>2</sub>, 2% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3% CaO. Las placas tienen un grosor de 30 milímetros y se usan en frío, aunque las boquillas necesitan ser precalentadas para evitar enfriamiento. Estos tipos de recubrimientos usados sin precalentar tienen la desventaja de que al inicio de la colada la temperatura del acero disminuye, lo cual puede ser contrarrestado controlando el precalentamiento de la olla o utilizando calentamiento auxiliar, como plasma [60].

El recubrimiento del distribuidor y la práctica operacional varían dependiendo de la calidad del producto. Por ejemplo, los aceros ingenieriles demandan mínima contaminación y un control estricto de las operaciones de colada. Para satisfacer tales demandas existe un amplio rango de recubrimientos desechables, los cuales son compatibles con la producción de aceros limpios y dan una buena retención de calor debido a su buena capacidad aislante, también están diseñados para facilitar la operación del tundish. Los materiales más utilizados se hacen en base a magnesita, aunque se puede usar sílice si el grado de acero lo permite [54].

Otra variedad de refractario utilizada en ambos recipientes es el cemento refractario en seco aunque particularmente en el tundish se usa mortero protegido con una pared interna de azulejos los cuales son fáciles de eliminar debido a el frecuente deterioro que sufren. Por ejemplo, en plantas de fabricación de aceros ingenieriles el recubrimiento permanente es un material colado bajo en cemento: 55% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 45% SiO<sub>2</sub> (3% cemento). Este se aplica con una capa de 150 milímetros y se lleva aproximadamente tres días y medio para secarse a una temperatura final de 1000°C y dura varios meses [54].



### **4.3.2.- ACCESORIOS.**

Las características que deben cumplir los accesorios persiguen evitar su deterioro y el taponamiento u obstrucción en cualquier punto del orificio de drenaje que forma la boquilla y el conducto contra la reoxidación, debido a esta causa ambos se relacionan mutuamente. Los aspectos que involucran a su desempeño son los siguientes:

- A).- Características de operación.
- B).- Características de los materiales.

#### **4.3.2.1.- Características de operación.**

De los accesorios ya presentados quizá la boquilla y su relación con la válvula son de primordial importancia, tal y como lo advierte Chester :[54] "la boquilla perfecta es aquella que brinda una relación constante de flujo sin provocar salpicaduras a los lados del molde y sin contaminar al metal" y por si fuera poco tiene crucial influencia en el taponamiento u obstrucción como se vio en el subcapítulo 2.1.4, por lo anteriormente mencionado es conveniente tratar el desempeño de los accesorios en los siguientes puntos:

- A).- Compatibilidad de la boquilla con la válvula.
- B).- Evitar la obstrucción de la boquilla.
- C).- Otros accesorios.

#### **4.3.2.1.1.- Compatibilidad de la boquilla con la válvula.**

Este aspecto es uno de los rasgos más importantes en la colada continua. El sellado perfecto de la boquilla es muy importante, por ejemplo, cuando se tiene una válvula de rodillo la punta de ésta deberá sellar perfectamente con el contorno de la boquilla, ya que de lo contrario se tendrá goteo y el área de fuga será muy inmune al desgaste dando por resultado que cada vez se haga más grande el acceso. Cuando se usan válvulas deslizantes es necesario que exista un ajuste de deslizamiento adecuado, lo cual se consigue rectificando las superficies sujetas a fricción con materiales de dureza extremadamente alta como el diamante, en caso contrario el líquido fundido se introduce en el huelgo impidiendo el deslizamiento del plato móvil [54].

En el caso de las válvulas de rodillo también se deben tener cuidados y al respecto Ekholm y Hower [51] advierten: "la adhesión de la boquilla y la válvula puede deberse a un acoplamiento impropio o por fallas en la instalación y secado de la boquilla" y continúan: "cuando el molde esta lleno y el rodillo se asienta en la boquilla se obtendrá

un buen sellado si los contornos relativos de la cabeza del rodillo y la boquilla tienen cierto grado de deformación que les permite acoplarse". Al respecto Norton [39] se refiere a la compatibilidad como sigue "para que exista un ajuste apretado entre la punta del rodillo y la boquilla es necesario que alguna de las dos partes sea ligeramente plástica, pero no ambas, o la adherencia sería el resultado" Por ejemplo, el rodillo puede ser de una mezcla alúmina-grafito y la boquilla de arcilla refractaria

#### ***4.3.2.1.2.- Evitar la obstrucción de la boquilla.***

Como se ha tratado este fenómeno es causa de paros de la producción, por tanto se reportan diversos aspectos que influyen en dicho comportamiento

- La manera más eficaz de evitar el taponamiento de la boquilla es aumentar el diámetro del orificio según lo reporta H E Allen, L Watts y colaboradores [17]
- Según F Wilson y colaboradores [12], la eliminación de los cambios de forma y dirección del flujo de acero son factores que podrían reducir la fuerza centrífuga y la turbulencia y por consiguiente disminuir la frecuencia con la que ocurren los taponamientos u obstrucción
- Igualmente, la colocación incorrecta de la boquilla puede causar aumento de la turbulencia teniendo un significativo efecto en la cantidad de flujo que puede pasar a través de ella [12]
- Según lo reportado en las memorias del Congreso Nacional de Siderurgia [60], la rugosidad de la boquilla aumenta la tendencia a la adherencia de las inclusiones favoreciendo el comienzo del puente solidificado La resistencia a la abrasión del material esta determinada por su grado de compactación La superficie terminada contribuye en gran medida a aumentar la resistencia a la abrasión y al choque térmico. En la Fig 36. Se muestran los valores típicos de compactación en base al material que es posible alcanzar lo cual puede también interpretarse como la resistencia al esfuerzo que pueden soportar [41].

#### ***4.3.2.1.3. Otros accesorios.***

Respecto a la válvula de rodillo y el conducto largo contra la reoxidación se advierte por fabricantes y H E Allen que debido a su forma alargada existen grandes gradientes de temperatura que se desarrollan durante y especialmente al principio de la operación los cuales pueden dar origen a fracturas que los hagan inservibles. El otro aspecto relevante es que la válvula debe ser acoplada con el mecanismo de operación

#### **4.2.2.2.- Características del material.**

Actualmente, en la producción de aceros de alta calidad las boquillas de mayor uso son las de circonia, magnesita, alta alúmina, mullita (74%  $Al_2O_3$ , 24%  $SiO_2$ ) o de alúmina-

grafito que son utilizadas en conjunto con controladores de flujo. Adicionalmente Norton reporta otros materiales: la arcilla refractaria (con un 36 a 38% de alúmina) y cromomagnesita. El primero origina un flujo más constante que el segundo, pero contrariamente éste último tiene mayor resistencia al desgaste. Al respecto Ekholm y Hower han encontrado que las boquillas más densamente formadas tienen mayor resistencia al desgaste [54].

Otra alternativa usada principalmente para evitar el bloqueo de boquillas es diseñarlas de materiales sinterizados con adiciones de cal (Un ejemplo es un inserto de CaO en un bloque de alúmina-grafito). El óxido de calcio permite que las inclusiones adheridas a la boquilla sean arrastradas por el flujo de acero, sin embargo si este no es lo suficientemente rápido para evitar el bloqueo, las inclusiones grandes se alojarán en el flujo y por consiguiente se contaminará el acero (Ver también Fig 22) [60].

Los rodillos se hacen de arcilla refractaria (36-40% de alúmina) y de grafito-arcilla [54]. Los platos de deslizamiento se hacen de altas cantidades de alúmina (90%) o bien de cromomagnesita [51].

Los conductos largos contra la reoxidación se hacen de materiales muy resistentes al coque térmico, tales como la sílice, alta alúmina grafitizada y circón grafitizado e igualmente es muy importante su resistencia a la escoria cuando están sumergidos [17]. Para soportar el ataque de la escoria y la erosión, la selección común de material refractario de la boquilla es la circonia (94% ZrO<sub>2</sub>, 6% CaO, [porosidad (16%)]). Una alternativa más económica para periodos de colada más cortos o aplicaciones menos demandantes es el uso del circón [96% ZrO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>, porosidad (20%)]. También se usan las boquillas de materiales compósitos, los cuales consisten de alta alúmina con inserción de circonia [58].

Material aumentado el orden de la resistencia al desgaste	Robustez ó resistencia mecánica comparativa [kg/mm <sup>2</sup> ]
MgO	370
SiO	820
ZrO	1160
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2000
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	2200
SiC	2700
B <sub>4</sub> C	3500
Diamante	7000-8000

Fig. 36. Comparación de la resistencia a la abrasión en base al material [41].

## APARTADO TERCERO

### GENERACION DE ALTERNATIVAS DE SOLUCION

*Las alternativas de solución relativas al sistema dosificador de colada continua a tratar se originan de las necesidades planteadas en el análisis del problema, de ello destaca que el material a fundir tiene crucial repercusión en el desempeño y características de la operación. Debido a ello es necesario hacer una comparación entre dos de las principales aleaciones de aluminio dada su importancia en México el Zinalco y la aleación 6063 de aluminio.*

#### **a) Aspectos operacionales.**

*El zinalco presenta desventajas en cuanto a la operación, teniéndose dos aspectos. Su menor tensión superficial lo hace más adherente a las paredes de revestimiento de los recipientes [46] y permite menores velocidades de colada en proporción de 1/5.*

#### **b) Aspectos térmicos.**

*Las Ventajas del zinalco son que casi no se oxida y su temperatura de fusión, al ser más baja reduce la tendencia a la oxidación así como la energía requerida para realizar la fusión así mismo, su menor conductividad térmica reduce la pérdida de calor en el transcurso de la colada.*

#### **c) Aspectos estructurales.**

*Las propiedades macroestructurales de los productos obtenidos de zinalco son mejores, así lo reporta Torres Villaseñor: "El zinalco tiene resistencia a la tracción, límite de fluencia y densidad del orden de dos veces los valores correspondientes a la aleación de aluminio 6063, usada típicamente en perfiles para la industria de la construcción los cuales después de extruidos requieren un tratamiento de envejecimiento a fin de aumentar su dureza (contienen elementos endurecedores tales como el magnesio) y resistencia a la tracción, entre otras propiedades. En cuanto a las propiedades microestructurales se sistema se lograron obtener dendritas del orden menor de 40  $\mu\text{m}$ , lo cual es comparable con los resultados obtenidos usando aluminio [44]."*

#### **d) Aspectos económicos.**

*Es indudable su valor estratégico puesto que México no tiene aluminio.*

*Al hacer un balance de tales aspectos se ve que el zinalco presenta ventajas considerables por ello se escoge el desarrollo de las alternativas de solución para esta aleación y sus propiedades se muestran en la Tabla VIII. Así mismo se propone un plan para generarlas como sigue.*

**CAPITULO VI. Determinación de la forma de las medidas de los contenedores**

**CAPITULO VII. Determinación de un sistema de control de temperatura**

**CAPITULO VIII. Determinación de las características de los accesorios del sistema dosificador.**

*A continuación se plantean las necesidades de manera objetiva para ser utilizadas en la generación de alternativas de solución. Así mismo se analiza que recursos de los que se cuenta pueden o son útiles para desarrollar la solución de las necesidades en cuestión*

Propiedades físicas del zinalco.			
Referencia	Variable	Valor	Unidad
[44]	Rango de fusión	420 -480	[°C]
[44]	Densidad	5.4	[g/cm <sup>3</sup> ]
[44]	Conductividad térmica.	120-136	[W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
[44]	Conductividad eléctrica.	5.9	[m ohm cm <sup>-1</sup> ]
[50]	Viscosidad (Zn-20Al) a 420 y 480°C	2.0 y 1.8 X10 <sup>-1</sup>	[Kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ]
[50]	Viscosidad cinemática a 480°C	0.333X10 <sup>-6</sup>	[m/s <sup>2</sup> ]
[46]	Tensión superficial		[N m <sup>-1</sup> ]
[46]	Calor específico (20°C, zinc puro)	0.382	[KJ kg <sup>-1</sup> °K <sup>-1</sup> ]
[46]	Cambio de volumen en el enfriamiento (469°C hasta 0°C) para el zinc puro	7.28	[%]
[50]	Coefficiente de expansión térmica, desde 290 hasta 500°C	26	[mm <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> °K <sup>-1</sup> ]
[65]	Emisividad (aluminio y zinc, a 600°C)	0.11	

**Tabla VIII. Propiedades físicas de la aleación de zinalco y algunos datos útiles de composiciones similares.**

## **CAPITULO V**

### **DETERMINACION DE RECIPIENTES**

Los contenedores del metal deben tener características de forma y medida acordes con las condiciones de operación, debido a que tales aspectos ejercen gran influencia en el comportamiento del flujo del metal líquido lo cual juega un papel muy importante en todo el proceso de colada continua con relación a la calidad del producto final, evitar contratiempos, facilitar la operación y aumentar la productividad. Los aspectos son cuatro

- A) Su capacidad debe ser suficiente según la carga de metal fundido que se vaya a alojar
- B) Las características de los orificios de drenaje influyen decisivamente en el régimen de flujo del chorro de metal fundido que pasa de un recipiente a otro
- C) Debido a que el análisis de los puntos anteriores es decisivo se hace necesario la implementación de modelos experimentales por medio de los cuales se simule físicamente las características de flujo
- D) La medida de la chapa y el material dependen fundamentalmente de la presión que deben soportar. A partir de esto se trata su desarrollo físicamente

#### **5.1.-CAPACIDAD DE LOS RECIPIENTES.**

El plan para determinar esto es primeramente evaluar el volumen en bruto del metal fundido, con lo que se obtiene el valor menor que debe ocupar el contenedor y el segundo paso acoplar las medidas de los recipientes con la carga que debe tener el recipiente

##### **5.1.1.- VOLUMEN EN BRUTO DE METAL FUNDIDO.**

En la U.N.A.M. Campús Aragón están disponibles dos hornos de mufla que tienen la capacidad de fundir una carga de 15 Kg de aluminio en un tiempo de una hora y media. Mediante aquellos datos se deberá acoplar las necesidades en cuanto a la preparación y fusión del zinc lo cual se consigue con los cálculos que se presentan a continuación. El primer paso es determinar el volumen de la masa del metal de muestra, a partir de su densidad:

$$V = m/\rho \qquad \qquad \qquad 5.1$$

$$V = (15 \text{ kg}) / (2707 \text{ Kg/m}^3) = 5.54 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ [5.54 litros]} \qquad \qquad \qquad 5.1a$$

El calor aportado necesario para fundir la carga de aluminio hasta su punto de fusión de 660°C está dado por la siguiente ecuación:

$$Q = C_p (T_f - T_a) m$$

5.2

donde:

$C_p$  = Calor específico del aluminio = 0.920  
[kJ/kg °K] (valor medio de 20 a 660°C).

$T_{amb}$  = Temperatura ambiente = 20°C.

$T_f$  = Temperatura de fusión del aluminio puro  
660°C

Aplicando la ecuación anterior a los datos, se obtiene:

$$Q = (659 - 20^\circ\text{K})(0.920 \text{ KJ/Kg}\cdot^\circ\text{K})(\text{Kg}) = 8.818 \text{ KJ}$$

5.2a

La potencia de calefacción a su vez esta dada por la siguiente formula:

$$P = Q / t$$

5.3

donde:

$Q$  = Carga térmica de fusión = 8,818 [kJ]

$t$  = Tiempo en que se lleva la fusión  
[seg]

Aplicando los datos:

$$P = (8.818 \text{ KJ}) / (7200 \text{ seg}) = 1.224 \text{ KW}$$

5.3a

Con estos datos es posible encontrar la carga de zinalco que se puede fundir y el tiempo para que se lleve a cabo tal operación. Despejando de la ecuación (5.2) la masa se obtiene:

$$m = Q / (T_f - T_{amb}) (C_p)$$

5.4

donde

$T_f$  = Temperatura de calentamiento máxima  
requerida del zinalco = 600°C

$C_p$  = Calor específico del zinc puro = 0.382  
[kJ/kg °K]

$$Q = 8.818 \text{ [kJ]}$$

Aplicando los datos

$$m = (8.818 \text{ KJ}) / (600 - 20^\circ\text{C}) (0.382 \text{ KJ/Kg}\cdot^\circ\text{K}) = 39.79 \text{ Kg}$$

5.4a

Entonces, el volumen del zinalco viene determinado por la ecuación (3.1a). Tomando en cuenta que la densidad del zinalco (a 20°C) es  $\rho = 5400 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ :

$$V = 39.79 \text{ [Kg]} / 5400 \text{ [kg/m}^3\text{]} = 7.37 \times 10^{-3} \text{ [m}^3\text{]}$$

(7.37 litros)

5.1b

Al llevar a cabo la fusión de una carga de zinalco de 40 [kg] se requerirán los siguientes porcentajes de aleantes (la composición es Aluminio 21%, zinc 77% y Cobre 2%)

Aluminio =  $40 \times 0.21 = 8.4$  [kg] de aluminio

Cinc =  $40 \times 0.77 = 30.8$  [kg] de cinc

Cobre =  $40 \times 0.02 = 0.8$  [kg] de cobre. A continuación se evalúa la cantidad de calor necesaria para cada componente [59]

$$Q_{\text{Al}} = (600 - 20) [^{\circ}\text{C}] \left( 0.920 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}} \right] \right) (8.4 [kg]) = 4.945 [kJ] \quad 5.5a$$

$$Q_{\text{Zn}} = (600 - 20) [^{\circ}\text{C}] \left( 0.302 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}} \right] \right) (30.8 [kg]) = 6.824 [kJ] \quad 5.5b$$

$$Q_{\text{Cu}} = (1003 - 20) [^{\circ}\text{C}] \left( 0.377 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}} \right] \right) (0.8 [kg]) = 0.304 [kJ] \quad 5.5c$$

La cantidad de calor necesario para llevar a cabo la aleación es la sumatoria de las cantidades de calor calculadas

$$Q_{\text{total}} = \sum Q_{\text{componentes}} = 4.945 + 6.824 + 0.304 \text{ KJ} = 12.100 \text{ KJ} \quad 5.6$$

Como la potencia del horno es de 1.2247 [kW], aplicando la ecuación (3.3) se obtiene el tiempo necesario para llevar a cabo la aleación,

$$t = \frac{Q}{P} = \frac{12.100 [kJ]}{1.2247 [kW]} = 9.879 [seg] \approx 2 \text{ horas } 45 \text{ minutos} \quad 5.7$$

Finalmente, al considerar un factor de seguridad arbitrario para evitar cualquier derrame del metal, se puede expresar,

$$V_{\text{diseño}} = F.S. \times V = 1.2 \times (7.37 \times 10^{-3} \text{ m}^3) = 8.844 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ (8.88 litros)} \quad 5.1c$$

donde

F.S. = Factor de seguridad arbitrario  
para evitar el derrame del metal

V = Volumen calculado en la ecuación 5.1

## 5.1.2.- DETERMINACIÓN DE LAS MEDIDAS DE LOS RECIPIENTES.

Los contenedores que se encuentran en el sistema dosificador como es bien sabido son la cuchara y el tundish. Los criterios tomados para tal efecto son los siguientes: La cuchara que recibe el metal fundido deberá tener medidas acordes con la carga de metal fundido a manejar y el tundish a su vez, debe ser proyectado de tal manera que tenga



una determinada cantidad de veces que se llena antes que se drene toda la carga de líquido, lo cual toma gran relevancia en diseños de máquinas industriales de colada continua, ya que influye enormemente en la velocidad de producción posible y características adicionales que se verán más adelante [17] Cada uno de ellos tiene su formas geométrica típica lo que se usará como base para llevar a cabo los cálculos

A) Para la cuchara se tiene un cono con bases paralelas que también se puede llamar virola cónica.

B) Para el tundish se tienen una pirámide rectangular con bases paralelas y paredes anguladas (artesa)

### 5.1.2.1.- Cuchara.

A partir de la obtención del volumen se determinan fácilmente las dimensiones de este recipiente que como se nota en la Fig. 37 son: El ángulo de inclinación  $\beta$  (que generalmente su valor no va más allá de los 7 grados), la altura metalostática: H (que influye enormemente en la velocidad de descarga no puede fluctuar en grandes valores) y finalmente el radio mayor R y el radio menor r que quedan por determinarse los cuales se calculan seguido. Observando la Figura citada, por identidad trigonométrica simple se tiene [56]

$$\tan \beta = \frac{R-r}{H} \quad 5.8$$

como:

$$CO = (R - r) / H \quad 5.9$$

se obtiene:

$$\tan \beta = \frac{R - r}{H} \quad 5.10$$

El volumen del recipiente está dado por [56]:

$$V = \frac{\pi H}{3} (R^2 + r^2 + Rr) \quad 5.11$$

Despejando R como parámetro de la variable r a determinar primero en la ecuación (3.10).

$$R = r + H \tan \beta \quad 5.10a$$

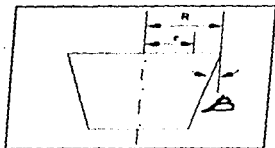


Fig. 37. Datos principales para determinar la correlación del volumen y las dimensiones de la cuchara.

Sustituyendo (5.10a) en (5.11) se obtiene una ecuación cuadrática de segundo grado:

$$r^2 + r H \tan \beta - \frac{(H \tan \beta)^2}{3} - \frac{3V}{\pi H} = 0 \quad 5.12$$

Esta última ecuación tiene la forma de un trinomio cuadrado perfecto:

$$Ax^2 + Bx + C = 0 \quad 5.13$$

donde:

$$A = 1$$

$$B = H \tan \beta$$

$$C = \frac{(H \tan \beta)^2}{3} - \frac{3V}{\pi H}$$

Que se resuelve fácilmente por medio de la fórmula general:

$$r_{1,2} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad 5.14$$

entonces, la ecuación (3.5) se resuelve:

$$r_{1,2} = \frac{-H \tan \beta \pm \sqrt{(H \tan \beta)^2 - 4 \left[ \frac{(H \tan \beta)^2}{3} - \frac{3V}{\pi H} \right]}}{2} \quad 5.15$$

tomándose  $r$  como el valor positivo que se obtenga.

Finalmente, el radio mayor  $R$  se determina usando la ecuación (5.10a).

### 6.1.2.2.- Artesa.

La forma típica de un tundish es una artesa como la que se muestra en la Fig. 38. A fin de simplificar el cálculo de las medidas de la misma se tomarán los siguientes criterios:

- Existen dos ángulos de inclinación en la artesa los cuales se consideran iguales.
- El volumen de la artesa esta determinado por un factor de multiplicación con respecto al volumen de la cuchara y el factor de seguridad para evitar cualquier derrame, denotado por  $R_s$ .

$$R_s = \text{volumen de la cuchara} \times F.S / \text{volumen de la artesa} \quad 5.16$$

c) Las longitudes de la parte superior de la artesa,  $L$  y  $a$  vienen determinados por las dimensiones inferiores de la misma. Las expresiones que se usan son las siguientes:

$$L = L' + H \tan \beta \quad 5.17a$$

$$a = a' + H \tan \beta \quad 5.17b$$

Tales criterios se demuestran por simples identidades trigonométricas los cuales se determinan fácilmente en la misma Figura mencionada.

d) Como se verá más adelante el largo de la artesa tiene mayor influencia que el ancho. Para conseguir esto se introdujo un factor de proporcionalidad  $z$  menor que uno denotado por,

$$a' = zL' \quad 5.18$$

e) Con respecto a las dimensiones se considera que al aumentar la profundidad proporcionalmente aumenta el tiempo de vaciado y las variaciones de flujo y al aumentar la longitud existen mayores pérdidas de calor [9].

El volumen de una artesa esta dado por: [70]

$$V = \frac{H}{6} \left\{ L(2a + a') + L'(2a' + a) \right\} \quad 5.19$$

Al tomar los criterios (3.16 a y b) y aplicarlos a la ecuación ( 3.18) se obtiene:

$$V = \left\{ \left[ (L + H \tan \beta) (2(a' + H \tan \beta) + a') \right] + L' (2a' + a' + H \tan \beta) \right\} \quad 5.19.$$

simplificando la ecuación anterior y reduciendo términos se obtiene:

$$V = \frac{H}{6} [6a' L' + 3L' H \tan \alpha + 3z L' H \tan \alpha + 2H^2 \tan^2 \alpha] \quad 5.19b$$

Modificando el orden de los términos y factorizando se obtiene:

$$3a' (2L' + H \tan \alpha) + L' (3H \tan \alpha) = \left( \frac{6V}{H} \right) - 2H^2 \tan^2 \alpha \quad 5.19c$$

Aplicando el criterio (3.17) la ecuación anterior queda:

$$3z L'^2 + L' (3z H \tan \alpha + 3H^2 \tan^2 \alpha) + 2H \tan \alpha^2 - \frac{6V}{H} = 0 \quad 5.20$$

La ecuación resultante tiene la forma de un trinomio cuadrado perfecto y así mismo la forma de la ecuación (3.20) la cual puede resolverse mediante la ecuación (3.14), donde:

$$A = 3z$$

$$B = 3H \tan \alpha (z + 1)$$

$$C = 2H \tan \alpha^2 - 6V/H$$

La resolución de la ecuación finalmente queda:

5.21

$$L' \tan \alpha z = \frac{\sqrt{[3H \tan \alpha (z + 1)]^2 - (12z) \left( 2H \tan \alpha^2 - \frac{6V}{H} \right)}}{6z}$$

Donde V es el volumen del tundish obtenido según el criterio 5.16.



Fig. 38. Medidas necesarias para especificar el contorno geométrico del tundish.

## 5.2.- CARACTERÍSTICAS DE FLUJO.

Tanto en el recipiente dosificador como el alimentador requieren el análisis de las características de flujo. En la colada continua a nivel industrial la relación entre ambos elementos determina la velocidad de producción. Tal situación se refiere a la frecuencia de cierre de los orificios de la cuchara y el tundish en tanto cualquiera de ellos o el molde se llena hasta su nivel adecuado para llevar a cabo la operación. La condición ideal para que no existan paradas es que el flujo sea "realmente" continuo, es decir, que el gasto descargado en el orificio de la cuchara sea igual al descargado en el(los) orificio(s) de tundish (distribuidor cuando tiene varios orificios de descarga) y asimismo con el gasto que se extrae en el(los) molde(s). Tal situación se muestra en la Fig. 39.

Sin embargo, en la práctica es común que no coincidan cualquiera de los gastos anteriores por ello es que generalmente se tiene que impedir u obstruir el drenado de líquido en alguna de los recipientes del sistema. Esta circunstancia es desfavorable porque a la vez que aumenta las pérdidas de calor, favorece la oxidación del metal y deterioro de revestimientos de recipientes disminuyendo la calidad de los productos y el aumento de los costos de producción [9].

El problema de tratar de acoplar lo más posible el gasto de salida de cada etapa mencionada requiere tomar en consideración la relación de área de sección transversal del orificio de drenado y la velocidad con que se descarga el líquido. Tal relación viene dada por la ecuación de la continuidad [57]

$$Q = A_n V_n \quad 5.2$$

donde

$Q_n$  = Flujo volumétrico a la salida del orificio [ $m^3/seg$ ] y  $n=1$  para la cuchara,  $n=2$  para el tundish y  $n=3$  para el molde

$A_n$  = Área de sección transversal [ $m^2$ ]

$V_n$  = Velocidad del chorro drenándose [ $m/seg$ ]

No importando de que material se trate la velocidad depende de la altura metalostática como ya se apuntaba en el Subcapítulo 3.15 de acuerdo con la ley de Torricelli (Fig. 40)

$$V = \sqrt{2gH} \quad (1.1)$$

La ecuación anterior puede expresarse también como

$$H = V^2/2g \quad 1.1a$$

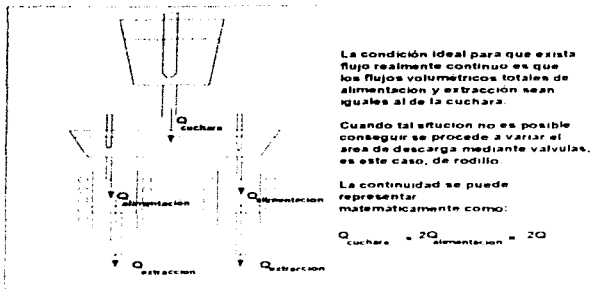


Fig. 39. Relación entre las características de flujo en todo el sistema de colada continua. En este caso el Tundish alimenta a dos moldes para aumentar la velocidad de producción.

El flujo volumétrico a la salida de la boquilla es reducido de acuerdo a la ecuación

$$Q_{\text{sal}} = C_d Q_0$$

5 23

donde  $C_d$  es el Coeficiente de descarga o de caudal que depende de la altura metalostática del líquido y del del área de sección transversal y tipo de orificio de contracta. En la Fig. 41, se ve como varía el coeficiente de descarga en el caso de un chorro drenándose en una boquilla con una válvula de rodillo. Para encontrar los valores se uso agua con diferentes niveles (alturas hidrostáticas) representado el comportamiento de acero líquido y se probaron dos tipos de válvulas con diferente tipo de orfio de contracta, uno angulado a 70 grados cuyas dimensiones se presentan y con otro redondeado cuyas dimensiones son aproximadas a la anterior [30]. Otro aspecto de particular importancia es el régimen de flujo a la salida del orificio de descarga. Existen tres regímenes de flujo

a) Flujo laminar. En el flujo laminar las partículas fluidas se mueven según trayectorias paralelas. Está gobernado por la ley que relaciona el esfuerzo cortante con la velocidad de deformación angular. La viscosidad del fluido es la magnitud física predominante y su acción amortigua cualquier tendencia a la turbulencia [55].

b) Flujo turbulento. En este caso las partículas fluidas se mueven en forma desordenada en todas direcciones. Es imposible conocer la trayectoria de una partícula individualmente.

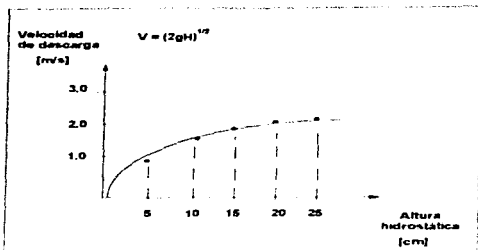


Fig. 40. Gráfica de la velocidad de descarga en función de la altura hidrostática para cualquier líquido.

c) Flujo transitorio: Es aquél que se da como una etapa intermedia entre las características de las dos anteriores, presentándose a velocidades intermedias entre ellos [55].

El régimen de flujo depende del valor del número de Reynolds, denotado por,

$$Re = DV/v$$

5 24

donde:

D = Diametro del orificio [m]

V = Velocidad de flujo del chorro  
descargado [m/s]

v = Viscosidad cinematica del fluido [m<sup>2</sup>/s]

Para propósitos ingenieriles se considera que el flujo en orificios es laminar si el numero de Reynolds es menor de 2100 y turbulento si es mayor de 4000. Otro factor de particular importancia es la determinación del tiempo de vaciado del tundish a fin de favorecer en lo más posible la flotación de inclusiones. En otras palabras, en tanto mayor es el tiempo de descarga del metal líquido en el recipiente, existe mayor oportunidad para lograr aquello

A fin de obtener una expresión matemática para determinar el tiempo de descarga se parte de la expresión (5.22) derivada [55, 56].

$$dV/dt = A_s V$$

5 22a

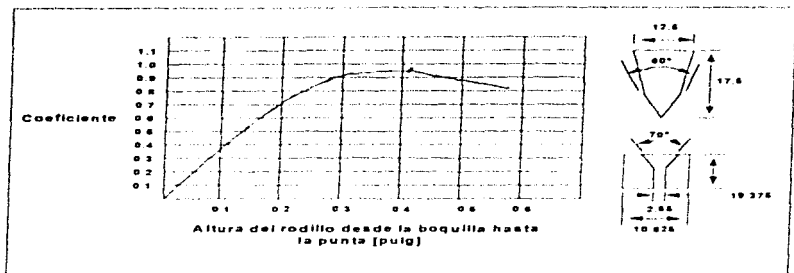


Fig. 41. Variación del coeficiente de descarga en función de la altura hidrostática y la altura del rodillo con una boquilla de orificio de salida de 2.65 cm. [30]

donde

$A_n$  = Área transversal del orificio de descarga [m<sup>2</sup>]

$V$  = Velocidad de descarga del flujo [m/s]

Sustituyendo la ecuación (1.1) en (5.22a).

$$dV/dt = A_n C_d (2gH)^{1/2} \quad 5.23$$

donde  $C_d$  es el coeficiente de descarga. Reacomodando la ecuación anterior,

$$\frac{dV}{\sqrt{2gH}} = A_n C_d dt \quad 5.23a$$

Aplicando integración se obtiene.

$$V \int_0^V \frac{dV}{\sqrt{2gH}} = A_n \int_0^t C_d dt \quad 5.23b$$

Seguido, el área transversal tanto de la cuchara como del tundish se considera constante para simplificar los cálculos, y es igual a  $\pi R^2$  (área circular) y  $L \times a$  (área rectangular) respectivamente, por lo tanto,



$$dV = R^2 X dH \quad 5.24a$$

$$dV = L X a X dH \quad 5.24b$$

Aplicando las ecuaciones anteriores a la ecuación 5.23c y resolviendo la integral el tiempo de vaciado para la cuchara y el tundish respectivamente, viene dado por:

$$t_v = \left[ \frac{L \cdot a \cdot R^2}{A_n \cdot C_q} X \sqrt{2g} \right]_{H_0}^{H_1} \quad 5.25a$$

$$t_v = \left[ \frac{L \cdot a \cdot R^2}{A_n \cdot C_q} X \sqrt{2g} \right]_{H_0}^{H_1} \quad 5.25b$$

### 5.3.- MODELOS EXPERIMENTALES.

La evaluación del efecto que tienen tanto los orificios como la forma y dimensiones de los recipientes tiene importancia crucial en el buen desempeño del sistema en su conjunto. Ante tal necesidad se han desarrollado varios métodos de modelación matemática, los cuales han sido muy ampliamente usados y mejorados en años recientes por la fácil disponibilidad de computadoras y paquetes con la finalidad de predecir los patrones de flujo en los recipientes del sistema dosificador, sin embargo, las ecuaciones fundamentales que describen el flujo de fluidos son muy complejas de resolver y sus soluciones requieren consideraciones y simplificaciones en un gran número de aspectos, y aun así siguen siendo complicadas [60]. En el caso el flujo de acero es muy difícil de observar directamente el comportamiento, con excepción de los chorros abiertos. Así, a fin de salvar las dificultades anteriores se han implementado modelos experimentales con un líquido factible de ser monitoreado (a diferencia de los chorros de acero líquido) los cuales han demostrado ser una alternativa efectiva y atractiva para evaluar el comportamiento desde el punto de vista cualitativo pero hasta la fecha se siguen desarrollando métodos para interpretar los resultados cuantitativamente [60]. En vista de lo anterior será indispensable desarrollar un modelo experimental lo cual se llevara a cabo a través de dos aspectos:

A) Justificación.

B) Aplicación

#### 5.3.1. JUSTIFICACION.

El requisito clave para que un modelo físico experimental represente al sistema real es lograr satisfacer un conjunto de criterios denominados genericamente como "Similitud hidrodinámica" los cuales comprenden:

### a) Similitud geométrica.

Este criterio se refiere a la similitud de forma. Los sistemas son similares cuando la relación de cualquier longitud correspondiente al otro sistema siempre es igual. Tal relación se conoce comúnmente como relación de escalas.

### b) Similitud cinemática

El criterio representa la similitud de movimiento. Las líneas de flujo del sistema modelo son geoméricamente similares a aquellas del sistema real.

Los números adimensionales usados para evaluar la validez del criterio son:

- Número de Froude

Representa físicamente lo siguiente: "Cuando se tiene un flujo de superficie líquida libre (L reemplaza la altura metalostática del líquido) tal como sucede en el tundish, la naturaleza de flujo del líquido (rápido o tranquilo) depende de si el número de Froude es mayor o menor de la unidad respectivamente". Se expresa como sigue:

$$N_{Fr} = \frac{V^2}{gL} \quad 5.26$$

donde:

V = Velocidad de chorro [m/s]

g = Aceleración de la gravedad = 9.81 [m/s<sup>2</sup>]

L = Longitud libre de flujo [m]

Heaslip demostró que el número de Froude solo puede ser satisfecho si se cumple el criterio de escala para todas las dimensiones [55].

- Número de Reynolds

El Número de Reynolds hace distinción entre regímenes de flujo lo cual ya se trató en el subcapítulo 5.2.

- Número de Weber.

El número de Weber representa la razón de las fuerzas inerciales a las fuerzas de tensión superficial, solo influye en modelos pequeños. Viene dado por:

$$N_{We} = \frac{\rho V^2 L}{\sigma} \quad 5.27$$

donde:

$\sigma$  = Tensión superficial [N/m<sup>2</sup>]

$\rho$  = Densidad del líquido [Kg/m<sup>3</sup>]

V = Velocidad de descarga [m/s]

### c) Similitud térmica

Los números adimensionales que involucran transferencia de calor son iguales en ambos sistemas. Este aspecto se cumple cuando los números de Grashof y de Prandtl son iguales, los cuales se determinan el subcapítulo 6.1.2.1.1.2

## 5.3.2.- APLICACION.

La aplicación de los métodos experimentales reportados se refieren al estudio de los siguientes aspectos de operación

A) Formación de vórtices.

B) Separación de inclusiones.

Ambos aspectos se relacionan mutuamente pero es conveniente tratarlos por separado.

### 5.3.2.1.- Formación de vórtices.

El fenómeno de la formación de vórtices es una de las causas principales del taponamiento de las boquillas según lo tratado en el subcapítulo 2.4.2. Puede presentarse en la operación de drenado en cualquiera de los contenedores del sistema dosificador, la cuchara y el tundish con adicionales efectos perjudiciales puesto que favorece al entrapamiento de aire y la turbulencia. El primer defecto se puede identificar como porosidades en las piezas terminadas y en un caso muy extremo piezas huecas en la parte central. El origen de este inconveniente se presenta cuando el nivel del recipiente es pequeño, comienza a manifestarse como un hoyuelo en la parte central que va descendiendo rápidamente, resultado de la succión de aire que se produce aguas abajo del nivel de la boquilla debido a que la altura metalostática del fluido es insuficiente para permitir un flujo continuo a través del orificio. Cabe aclarar que tal hoyuelo puede desarrollarse o no con la presencia de vórtice, al mismo tiempo la escoria de la superficie es succionada hacia el corazón del hoyuelo dando origen a suciedad [28] (Fig. 20)

En estudios actuales se ha demostrado que la generación de vórtices se retarda dejando reposar por un tiempo el líquido del recipiente según lo reporta M. Dubke y colaboradores [29].

Se reporta un modelo experimental a fin de evaluar las características de formación de vórtices. El equipo utilizado fue un recipiente cilíndrico que en el fondo tiene un orificio. En la parte alargada del conducto de drenaje se colocó una fotocelda y un bulbo

receptor, sistema que detecta el instante preciso en que empieza la formación del vórtice cuando existe cualquier cantidad de aire en el interior del conducto. La alimentación del metal líquido en el recipiente se efectúa mediante un tubo tangencial que imprime movimiento circular al fluido antes de que se drene por el orificio. De ambos arreglos se hicieron dos pruebas en la primera el orificio de drenado se tapa para permitir el llenado del recipiente pero el rodillo se retira, en el segundo el rodillo se levanta un poco [28]

#### **5.3.2.1.1.- Pruebas sin tapón.**

De las pruebas en las que no se usó rodillo de restricción se obtuvieron las siguientes características de formación de vórtices [28]

- La rapidez de formación de entrada de aire aumenta con la cantidad de turbulencia en el recipiente la cual puede disminuirse dejando reposar cierto tiempo el líquido en el recipiente e igualmente disminuye la velocidad angular
- El diámetro del recipiente tiene poca influencia, ya que para las pruebas del modelo 1 y 2 se encontró que la formación de vórtice muestra un comportamiento casi idéntico
- A medida que aumenta el orificio de drenado disminuye la altura a la que el vórtice tiene su origen

Cuando se usa rodillo obstruyendo el orificio de drenado el comportamiento de formación de vórtices es diferente. En la Tabla. XI, se muestran las dimensiones de los arreglos y el fluido que manejan

Las pruebas realizadas fueron dos, según la altura y la colocación del tapón

a) Tapón separado unos cuantos centímetros de la boquilla. El comportamiento se muestra en la Fig. 42. En la que se observa que la punta del rodillo es el centro del vórtice desarrollado

#### **5.3.2.1.2.- Pruebas con tapón ligeramente arriba de la boquilla.**

Para este caso el vórtice es concéntrico a la punta del rodillo y continúa su desarrollo en forma ligeramente excéntrica al rodillo y al mismo tiempo gira alrededor de este. Simultáneamente a esto, se desarrollan ondas en la superficie que son claramente visibles. El giro excéntrico del vórtice aumenta de velocidad y se producen burbujas que van a la punta del rodillo y posteriormente se enlaza para continuar su evolución y finalmente extinguirse con la presencia de burbujas (Fig.43).

De las pruebas anteriores se obtuvieron datos relevantes acerca de la formación de los vórtices:

a) Cuando la punta del tapón es baja se produce un vórtice excéntrico al rodillo del tapón y se origina desde arriba generando ondulaciones en la superficie

b) Cuando la punta del tapón es de unos cuantos centímetros el vórtice se desarrolla de abajo hacia arriba

### 5.3.2.2.- Separación de inclusiones no metálicas.

La limpieza superficial e interna del producto depende en gran parte del comportamiento hidrodinámico del fluido tanto en el sistema dosificador como en el molde [60]. La limpieza de inclusiones no metálicas se lleva a cabo en el tundish por medio de tres mecanismos (1) La adherencia a las paredes refractarias, (2) la filtración y (3) la flotación. De los tres modos el más conveniente es la última opción puesto que es fácil eliminar el metal fundido contaminado de la superficie mediante un sangrado. La adherencia trae problemas con el cambio constante de revestimiento y el método de filtración requiere refractarios porosos especiales [10.62].

Altura [mm]	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Fluido	Diametro interno [mm]	Diametro interno de la boquilla [mm]	Longitud de la boquilla [mm]	Diametro del rodillo [mm]
480	2.135	Agua	1190	26.9	180	30
176	0.195	Agua	595	14.0	120	15
90	0.0678	Hg	240	5.4	34	6.5

Tabla IX. Características y dimensiones del equipo usado para análisis del vórtice [28].

En la Fig.44. se muestra la integración de las partes del tundish. Nótese tres características importantes: (1) que el nivel de metal líquido es pequeño para evitar grandes fluctuaciones de velocidad de drenado, (2) que tiene unas tapas para evitar las pérdidas de calor y el rasgo más importante en este momento (3) puede contar con un escape de líquido superior para llevar el sangrado y (4) tiene una forma muy alargada y angosta. Este último aspecto favorece a la flotación de inclusiones no metálicas debido a que el viaje que tiene que recorrer el fluido desde la descarga de la cuchara hasta la buza sumergida de alimentación es bastante largo y así las escorias tendrán tiempo para flotar y por consiguiente se separación se completará en forma muy sencilla mediante un dispositivo de sangrado al principio de cada colada [62]. Por tal motivo, en operación es muy frecuente el uso de vertederos así como diques los cuales se usan para aumentar la distancia que deben recorrer las trayectorias de cada corriente como se muestra en la Fig. 45. Tales elementos se hacen comúnmente de cromita o cromita-magnesita debido a que están sometidos a bastante fricción [61].

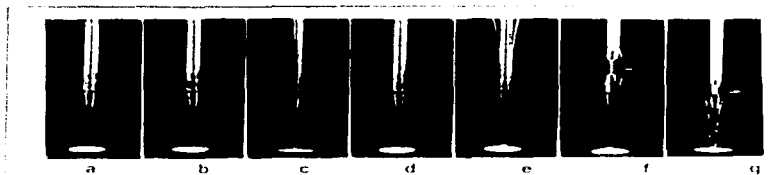


Fig. 42. Formación de un vórtice en el que no existen ondulaciones en la superficie. Un núcleo de aire se presenta en la punta del rodillo (a, b, c, d). Después un segundo vórtice aparece alrededor del rodillo cerca de la superficie (e, f). No hay conexión entre ambos vórtices hasta que finalmente se unen para formar uno solo y el rodillo es el centro (g). Las flechas de las ilustraciones indican los niveles de agua en la superficie [28].

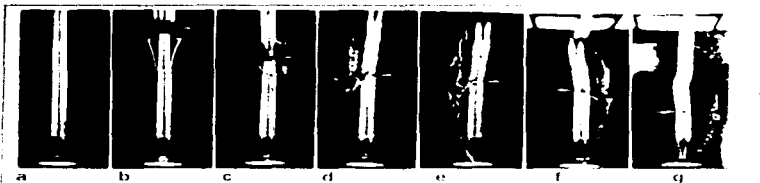


Fig. 43. Desarrollo de vórtice cuando se presentan ondulaciones en la superficie. (a) Un núcleo de aire entra desde la parte de abajo en tanto que otro se esta formando concéntricamente al rodillo. (b) El vórtice superior empieza a girar excéntricamente al rodillo y se forman ondas superficiales. (c) Entonces el vórtice se desconecta por sí mismo del rodillo y (d) se forman burbujas que viajan hacia la parte más baja, (e y f) La formación del vórtice llega a su punto culmine y (g) eventualmente se desintegra desapareciendo completamente [28].

### 5.2.3. ELEMENTOS PARA PROPONER UN MODELO.

Los modelos hidrodinámicos se han desarrollado extensivamente para simular el comportamiento del acero, sin embargo, en la Revista International Metals Reviews [19] se reporta que también se han aplicado para el aluminio. En ambos casos se usa comúnmente agua como fluido de caracterización, no obstante que puede hacerse de cualquier líquido (no necesariamente de agua como su nombre lo puede dar a entender). La mayor dificultad es justificar el modelo propuesto para lo cual se partimos de la primera condición se determina como la comparación entre los números de Reynolds, tanto del modelo como del prototipo usando la ecuación 5.24. Por lo tanto, si el régimen de flujo es igual o parecido si existe similitud al respecto. Criterio que también se aplica al número de Froude de lo que se obtiene la igualdad.

$$\frac{V_m^2}{R L_m} = \frac{V_p^2}{R L_p}$$

5.28

Donde m representa al modelo y p al prototipo. Despejando la velocidad de descarga en el modelo.

$$V_m = V_p \sqrt{\frac{L_m}{L_p}}$$

5.28a

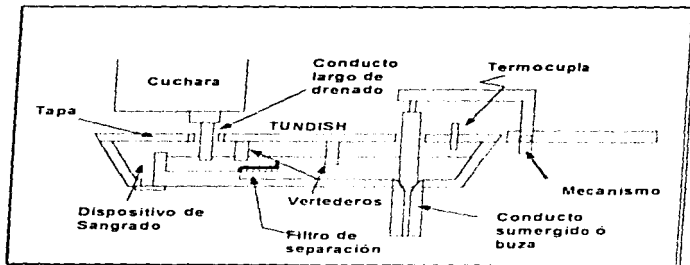
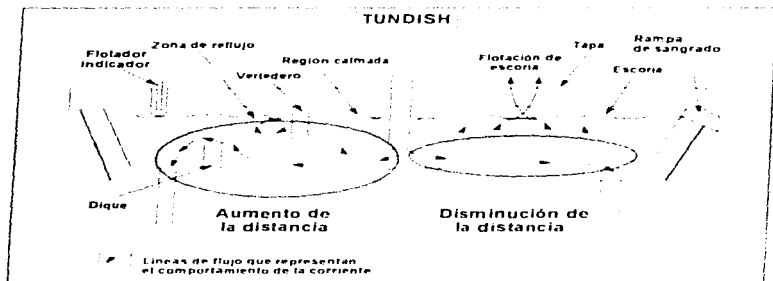


Fig. 45. Diagrama esquemático del tundish con algunos elementos para favorecer la separación de inclusiones no metálicas [61].

De lo cual se obtiene su altura hidrostática necesaria mediante la ecuación (3.1). Después de ello se tiene las dimensiones principales del modelo y se evalúa la correspondencia de escalas.

Al analizar la caracterización de los flujos de chorro es importante observar ciertas zonas específicas que forman los flujos tales como recirculación y zonas calmadas, lo cual resulta importante puesto que se puede considerar en ambos casos que el líquido permanece en una misma zona provocando que a la larga se pierda calor y como consecuencia se forman verdaderos pedazos solidificados que finalmente van a dar a el orificio de descarga provocando el taponamiento de la boquilla. Por último, cabe reiterar que el aumento de las trayectorias de flujo da lugar a el aumento del tiempo de residencia del líquido en bruto, lo cual da mayor oportunidad a la flotación de inclusiones no metálicas. Otro criterio de importancia es evaluar la cantidad de mezclado que se da en el recinto de lo líquido como resultado de la homogeneidad de comportamiento de los chorros de flujo y por consiguiente mejora la difusión y la distribución de temperaturas que repercuten directamente en las condiciones de alimentación en el molde [64].



**Fig. 45.** Diagrama esquemático del tundish que muestra el trazo de las líneas de flujo para el análisis de separación de inclusiones, los óvalos representan la magnitud comparativa de la distancia o tiempo de residencia de las corrientes que circulan por acción de la fuerza de gravedad [61].

El comportamiento de flujo se lleva a cabo casi siempre con la inyección de un pequeño flujo de azul de metileno mezclado con permanganato de potasio en la corriente que se requiere analizar. Las líneas de flujo trazadas muestran el patrón de flujo que se tiene.



Mediante un cronometro se mide el tiempo de trayectoria y con aparatos ópticos especiales se puede determinar la velocidad de flujo de la corriente. Los eventos pueden ser registrados mediante fotografías, diagramas o aparatos especiales [10]. Recientemente se ha conseguido medir la concentración por zonas de líquido de referencia [64].

## 5.4.- DETERMINACIÓN DE LA CHAPA Y LAS CARACTERÍSTICAS PARA SU DESARROLLO.

Una vez que se han determinado las medidas de los recipientes se procede a determinar como afecta el espesor de la chapa, lo cual esta muy relacionado con el material y la forma geométrica a realizar. Después de ello se trata el desarrollo de la chapa, aspecto necesario para su conformación.

### 5.4.1.- MATERIAL Y ESPESOR DE LA CHAPA.

Las medidas de recipientes sujetos a presión tal como se nos presenta (tal es el caso de los esfuerzos de temperatura y soporte del metal líquido en nuestro caso) viene determinada en el código ASME el cual estandariza las relaciones entre las dimensiones, forma del recipiente y método para soldar de tal manera que el recipiente en un conjunto tenga un servicio adecuado a los esfuerzos a que ha de estar sometido. Por supuesto no sin olvidar que se debe tomar un factor de seguridad. Tal información se trata dividiéndola en dos partes.

A) Para la virola cónica (recipiente receptor o cuchara) y,

B) Para el tanque rectangular (recipiente alimentador o tundish)

#### 5.4.1.1.- Virola Cónica.

Se toman las mismas variables del esquema de la Fig. 36. Las fórmulas estandarizadas que se reportan según [57]

$$t = \frac{F \cdot D}{2 \cos \alpha (SE - 0.6 F)} \quad 5.29$$

$$P = \frac{FSEt \cos \alpha}{D + 12t \cos \alpha} \quad 5.30$$

donde:

t = Espesor de la pared [pulg]

P = Presión de diseño o presión máxima de trabajo permitida [lb/pulg<sup>2</sup>]

S = Valor del esfuerzo del material [lb/pulg<sup>2</sup>] (Apéndice A.1)

E = Eficiencia de la junta (consultar el tipo de soldadura Apéndice A.3)

D = Diámetro interior [pulg]

$\alpha$  = La mitad del ángulo en el vértice [grados].

La presión de diseño anterior considera un factor de seguridad de 1.5 dado por:

$$P = P_{\text{material}} \times 1.5 \quad (\text{Materiales sugeridos en Apéndice A.1}) \quad 5.31$$

donde  $P_{\text{material}} = \rho g H + P_{\text{atmosférica}}$

#### 5.4.2.2- Artesa.

En la Fig. 37 se muestra un esquema de los datos necesarios para llevar a cabo el cálculo. No se cuenta con datos para paredes inclinadas, por tal motivo se puede tomar el criterio de considerar que se trata de un recipiente con las paredes perpendiculares al plano [57]. Al igual que el caso anterior la especificación viene dada por la presión de diseño y el material mediante la siguiente expresión:

$$t = 2.45L \sqrt{\frac{PFD}{SE}} \quad 5.32$$

donde:

$\alpha$  = Factor que depende de la relación de la longitud a la altura del tanque H/L (ver la gráfica del Apéndice A.2)

E = Módulo de elasticidad [lb/pulg<sup>2</sup>] (Apéndice A.1 se sugieren algunos materiales)

G = Densidad relativa del líquido contenido = [ $\rho_{\text{liquido}}/\rho_{\text{agua}}$ ]

S = Valor del esfuerzo de la placa [lb/pulg<sup>2</sup>] (Apéndice A.1)

t = Espesor de la placa requerida [pulg]

#### 5.4.2.- DESARROLLO DE LA CHAPA.

A partir de los datos obtenidos en la etapa anterior y las dimensiones finales de los recipientes se procede a determinar el trazo de la chapa con la finalidad de que al doblarla quede la forma deseada. Dado que la geometría de la artesa es muy sencilla se

preve que no se tendrán problemas al respecto. Por ello es que se dará especial importancia al desarrollo de la virola cónica. Para llevar a cabo esto, se parte de la forma terminada la cual se representa en la Fig. 46a junto con las medidas que nos serán más útiles para su trazo. Note que al doblar la chapa se debe considerar la fibra o plano medio de la misma. Partiendo de las dimensiones principales se calcularán las siguientes:

$$\operatorname{tg}(\alpha/2) = d_2 - d_1 / 2h \quad 5.33$$

$$h_2 = h d_2 / d_m \quad 5.34$$

$$h_1 = h_2 - h \quad 5.35$$

$$g_2 = [h^2 + \frac{d_m^2}{4}]^{1/2} \quad 5.36$$

Otras medidas que nos serán útiles son:

$$g_1 = g_2 \frac{(d_1 + e)}{d_2 - d_1} \quad 5.37$$

$$h_3 = e / 2 \operatorname{sen}(\alpha/2) \quad 5.38$$

$$c = e / 2 \cot(\alpha/2) \quad 5.39$$

$$R = g_1 + g_2 \quad 5.40$$

Finalmente, el trazado de la virola (Fig. 46b) es un trapecio circular cuyos radios R y g, ya se han determinado, el valor de los arcos resulta:

$$S_1 = \pi (d_1 + e) \quad 5.41a$$

$$S_2 = \pi (d_2 + e) \quad 5.41b$$

Estas últimas expresiones sólo son válidas cuando el espesor de la chapa es pequeño y en ángulo de inclinación también lo es. Si el centro O es accesible se toma como centro para hacer el arco g, y R obteniéndose los puntos 1-1' y 2-2' que unido por medio de rectas radiales completan el desarrollo propuesto. En caso contrario, se fijará la posición de los arcos mediante cuerdas y flechas (Fig. 46b), para lo cual serán útiles las fórmulas,

$$\beta = \frac{180 - d_{2m}}{R} \quad 5.42a$$

$$c_1 = 2g_1 \operatorname{sen}(\beta/2) \quad 5.42b$$

$$c_2 = 2R \operatorname{sen}(\beta/2) \quad 5.42c$$

$$f_1 = g_1 [1 - \cos(\beta/2)] \quad 5.42d$$

$$f_2 = R [ 1 - \cos(\theta/2) ]$$

5.42e

$$H = g_2 + f_1$$

5.42f

$$p = H - f_2$$

5.42g

Con las dimensiones calculadas se fijarán los puntos 1-1'-1 y 2-2'-2 de los arcos menor y mayor respectivamente. Las dimensiones L y H corresponden a las mínimas del rectángulo en el cual se puede inscribir el trapecio circular correspondiente a la virola desarrollada, y servirán para pedir la chapa necesaria, cuyas dimensiones serán las de L y H aumentadas en 20 a 30 mm.

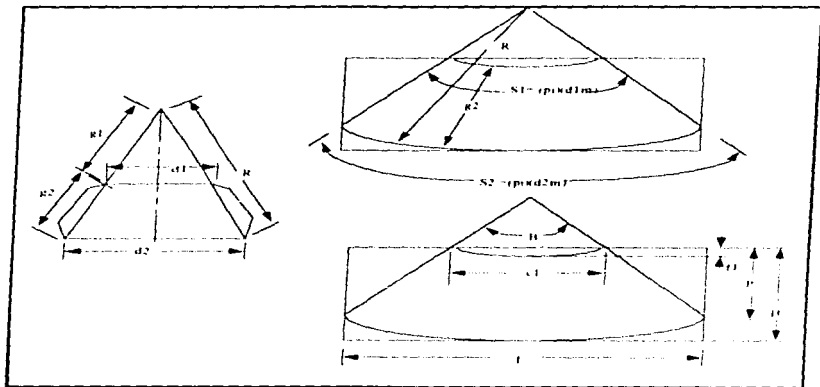


Fig. 46. Detalle de los datos necesarios para desarrollar una virola cónica.

## CAPITULO VI

### CONTROL DE TEMPERATURA EN EL SISTEMA DOSIFICADOR

Como se ha visto, este aspecto es determinante para obtener una homogénea y correcta micro y macro estructura de la sección transversal solidificada, así como también evita dificultades en la operación de la máquina de colada continua. Dado que en el capítulo cuarto se cuenta con una basta aportación de datos respecto a pruebas desarrolladas es conveniente escoger cual de ellas tuvo mejor desempeño, principalmente en el intervalo de temperaturas, que es lo que nos ocupa en este momento.

**a) Propiedades microestructurales** - Según la prueba cuatro del subcapítulo 4.2.2.4 y los datos aportados por la Fig. 33,

Temperatura de alimentación al molde = 540 [°C]

Velocidad de extracción = 23 [mm/s]

**b) Propiedades macroestructurales** - Se escoge el sistema de colada semicontinua semejante al usado en la prueba cuatro ya que mediante esto se logran obtener propiedades excepcionales al respecto. Cabe destacar que se utilizó un control de temperatura de alimentación en el molde de 600 ±5°C cuyo sistema es semejante al mostrado en la Fig. 35. De lo anterior se puede deducir que se requiere un rango de temperatura de 540 °C a 605°C con la finalidad de analizar los resultados con tales características. Las variables usadas en las fórmulas se presentan en la Tabla X. a fin de simplificar el desarrollo matemático.

El calor es energía en movimiento que implica que un cuerpo cede energía y que el otro gane, por consiguiente sólo se transmite de una sustancia de mayor temperatura a otra de menor temperatura. Como el sistema dosificador en general está a alta temperatura tiende a ceder calor a su entorno por ello sufre cierta cantidad de pérdida de calor en todo su recorrido (desde que se recibe en la cuchara hasta que se vacía en el molde) el cual generalmente se acumula en varios elementos: la boquilla, el conducto dosificador, la válvula o las capas de los recipientes (soporte y revestimiento del mismo), lo cual resulta perjudicial puesto que se reduce la temperatura del metal líquido. Dada aquella circunstancia tan desfavorable los fabricantes han implementado diversas alternativas comunes para minimizar esto: (a) Usar materiales de baja capacidad por conducir el calor, (b) Colocación de un recinto con aislamiento térmico y por último, (c) Colocación de elementos de aportación de energía, bien ya sea para añadir la carga de calor perdido durante la operación o bien para dar precalentamiento a las paredes de los elementos para lo cual es necesario que tengan buena capacidad de acumular el calor lo cual también ayuda a mejorar la resistencia al choque térmico de tales materiales. El primer método estrictamente se debe tomar como criterio. Los dos métodos restantes se

analizan a continuación para al último conjuntarse en un sistema, lo cual en otras palabras se divide en:

- A) Colocación de aislamientos térmicos.
- B) Sistema de aportación de energía calorífica
- C) Sistemas de medición de temperatura y actuadores de corrección.

## **6.1.- AISLAMIENTO TERMICO.**

Las bajas conductividades térmicas y las buenas propiedades aislantes se logran primordialmente con materiales de baja y bien distribuida porosidad así como baja densidad volumétrica sin importar mucho la composición química. Para los hornos metalúrgicos se deben combinar la baja conductividad térmica con la habilidad de soportar temperaturas elevadas sin sufrir descomposición o cambios estructurales. Este tipo de materiales sirve para evitar quemaduras y en ocasiones electrocuciones; además, cuando es bien proyectado es un medio eficiente para ahorrar energía. Por lo tanto su determinación requiere de los elementos a considerar,

- A).- Consideraciones para escoger el material
- B) - Determinación de la carga térmica a aportar
- C).- Medida del espesor de material

### **6.1.1.- CONDICIONES PARA ELEGIR EL MATERIAL.**

La elección del material depende de la temperatura máxima de operación, la absorción de humedad que reduce las propiedades de aislamiento (lo cual tiene mucha importancia en el caso de la colada continua, ya que pueden existir escapes o presencia de vapor de agua proveniente del molde de enfriamiento) y por último, el riesgo de incendio [65]. Otro aspecto importante es el esfuerzo que puede soportar cuando se colocan cosas pesadas sobre de él, según lo advertido por los fabricantes.

### **6.1.2.- DETERMINACIÓN DE LA CARGA TÉRMICA A APORTAR.**

El fenómeno se presenta de dos formas claramente diferenciables que se muestran explicando como se lleva a cabo. En un instante determinado sucede que se está perdiendo una cantidad instantánea de calor a lo que se lo llama transferencia de calor en régimen permanente. Por ejemplo, la temperatura de un líquido en un "termo"

permanece un buen tiempo en este régimen puesto que se mantiene prácticamente invariable y a medida que este transcurre el tiempo se va disipando determinada potencia calorífica no despreciable como en el ejemplo anterior. A este último régimen se le llama transitorio. Por consiguiente, los fenómenos de transferencia de calor pueden ser tratados en dos regímenes:

- A).- Régimen permanente y,
- B).- Régimen transitorio.

#### *6.1.2.1.- Régimen permanente*

En la Fig. 47. Se muestra un balance de energía destacando las interacciones que se presentan en la cuchara lo cual también se explica como sigue: el metal en movimiento y en contacto continuo con las paredes del recipiente cede su calor a las paredes del recipiente (Convección), el calor que reciben las paredes se conduce de la cara interior a la exterior (conducción) y por último el metal fundido caliente así como las paredes exteriores del recipiente en contacto con el aire disipan cierta cantidad de calor (radiación). A continuación se tratan los métodos de transferencia de calor en primera instancia para al último mostrar el balance de energía

- A) - Transferencia de calor por conducción
- B) - Transferencia de calor por convección,
- C) - Transferencia de calor por radiación
- D) - Balance de energía.

#### *6.1.2.1.1- Transferencia de calor por conducción.*

En este caso, el fenómeno se debe a la interacción de las vibraciones atómicas del material, manteniéndose invariables las posiciones principales de los átomos. Dada su baja conductividad térmica, los materiales refractarios tienen la capacidad de ser aislantes térmicos y resistir el ataque químico del metal fundido al mismo tiempo. Existen otros materiales que tienen baja porosidad pero que no son fabricados para ir en contacto con el metal fundido sino simplemente para aislar el entorno del sistema evitando las pérdidas de calor y tienen la ventaja de que pueden aguantar altas temperaturas. Las características de la transferencia de calor dependen de la forma de la superficie en la que sucede el fenómeno. En base a las necesidades se tomarán dos formas:

- A).- Placa plana.
- B).- Cilindro.

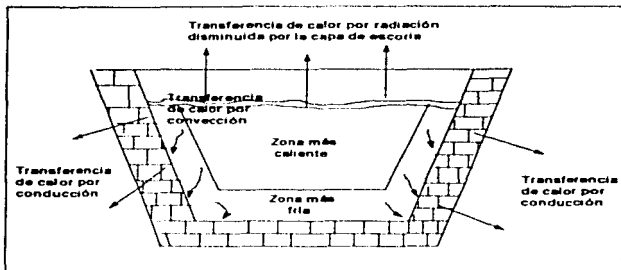


Fig. 47. Balance de energía en un recipiente de colada continua.

#### 6.1.2.1.1.1.- Placa plana.

La transferencia de calor por conducción en una placa plana esta dada por la ecuación de Fourier:

$$q = - \kappa \frac{dT}{dx} \quad 6.1$$

donde  $x$  representa la distancia. El símbolo negativo representa que el calor fluye de una temperatura más alta a una más baja,  $q$  es la potencia unitaria de flujo de calor por unidad de longitud asumida en la dirección  $x$ ,  $dT/dx$  es el gradiente de temperatura como una función de la distancia. Al integrar la ecuación (6.1) se obtiene

$$q = \kappa \frac{T_{int} - T_{ext}}{L} \quad 6.2$$

El flujo de calor total a través de una superficie viene dado como

$$Q_{cond} = Aq \quad 6.3$$

Al aplicar la ecuación (6.1) se obtiene el flujo de calor total,



$$Q = K \cdot A \frac{T_{int} - T_{ext}}{L}$$

Cuando se trata de varias capas superpuestas como en la Fig. 48a. se usa la fórmula:

$$Q = A \frac{T_{int} - T_{ext}}{\sum_{i=1}^n \frac{L_i}{K_i}}$$

6.4a

Medición	Unidades	Símbolo
Temperatura alta	[°C]	T <sub>c</sub>
Temperatura baja	[°C]	T <sub>h</sub>
Longitud de la placa plana	[m]	L
Conductividad térmica del material	[W/m °K]	K
Area	[m <sup>2</sup> ]	A
Conductividad térmica	[W/m ·°K]	k
Flujo de calor	[W/m <sup>2</sup> ]	q
Calor neto transferido.	[W]	Q
Coefficiente de transferencia de calor por convección	[W/m <sup>2</sup> ·°K]	h
Densidad	[Kg/m <sup>3</sup> ]	ρ
Masa	[Kg]	m
Constante de Aceleración de la gravedad	= 9.1 [m/s <sup>2</sup> ]	g
Coefficiente de difusividad térmica = K/ρC <sub>p</sub>	[m <sup>2</sup> /s]	α
Calor específico a presión constante	[J/Kg ·°K]	C <sub>p</sub>
Viscosidad cinemática	[m <sup>2</sup> /s]	ν
Constante de linealidad	[°K <sup>-1</sup> ]	β
Velocidad de flujo	[m/s]	V
Numero de Prandtl =	[adimensional]	Pr
Número de Grashof =	[Adimensional]	Gr
Temperatura ambiente	= 25 [°C]	T <sub>a</sub> ó T <sub>amb</sub>
Diferencia de temperaturas	[°C]	ΔT
Temperatura de fusión	[°C]	T <sub>f</sub>
Número de Fourier =	[adimensional]	F <sub>o</sub>
Número de Biot =	[adimensional]	Bi
Constante de Stefan-Boltzmann	= 5.67 X 10 <sup>-8</sup>	σ
Emisividad	[Adimensional]	ε
Fracción de calor que fluye de la superficie A a la B	[W/m <sup>2</sup> °K]	F <sub>A-B</sub>
Corriente eléctrica	[Ampere]	i
Voltaje	Volt	V
Potencia	[Watt]	W

Tabla X. Valores usados en los cálculos de transferencia de calor.

### 6.1.2.1.1.2.- Cilindro.

Para el caso de un cilindro largo de capa simple (Fig. 48b) la ecuación de Fourier (6.1) se integra para obtener la transferencia de calor unitario para una capa simple:

$$Q = \frac{2\pi KL(T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

6.5

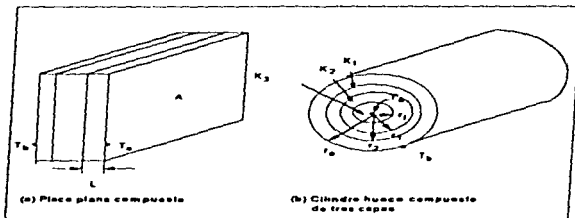


Fig. 48. Cuerpos geométricos. (a) Placa plana y (b) Cilindro recto para realizar cálculos de transferencia de calor.

### 6.1.2.1.1.2.- Transferencia de calor por convección.

El intercambio de calor entre un cuerpo sólido y un fluido es un fenómeno bastante más complejo que la transmisión de calor por conducción. Consiste en que las partículas de fluido en contacto con una pared sólida a diferente temperatura modifican su densidad moviéndose y permitiendo que otras lleguen. Así, la interacción entre cada una de las partículas provoca la generación de gradiente de calor que viaja a través de una delgada película en la superficie que tiene contacto con el fluido cuyas características de flujo son muy importantes [59]. La siguiente expresión simplificada con buena aproximación el flujo de calor unitario:

$$Q_{con} = Ah(T_1 - T_2)$$

6.8

La mayor dificultad es determinar el coeficiente de transferencia de calor, el cual depende en gran medida de múltiples variables que describen la forma y medidas de la superficie, las propiedades del fluido y la velocidad de flujo. Las comprobación de tales expresiones están determinadas por el uso de métodos experimentales. Como se recordará, las únicas formas que se tienen en el sistema dosificador son un cilindro y un paralelepípedo rectangular. El seguimiento para obtener el coeficiente de transferencia de calor  $h$  se da a continuación:

1ro. Determine la dimensión característica según la forma correspondiente. Para un cilindro vertical la longitud característica es el diámetro  $D$  y en el caso de un paralelepípedo rectangular se puede dividir en dos partes: placa plana horizontal (del fondo) con cara caliente hacia arriba y placa plana vertical la de las paredes.

La dimensión característica de una placa plana horizontal es el promedio de los lados y en el caso de una placa plana vertical se trata de la altura de la placa. Igualmente será útil determinar este valor para un espacio cerrado acotada entre dos paredes planas a distinta temperatura (lo cual provoca el flujo de calor) en la separación  $\delta$ .

2do. Obtenga los números adimensionales y variables:

$$Pr = \nu/\alpha \quad 6.9$$

$$\alpha = KC_{pf} \quad 6.9a$$

$$\beta = 1/(273[^\circ K] + T_c) \quad 6.10$$

$$Gr = g\beta(T_w - T_c)L_c^3/\nu^2 \quad 6.11$$

$$Ra = GrPr \quad 6.12$$

donde:

$T$  = temperatura del fluido [ $^\circ C$ ]

$L_c$  = Longitud característica [m]

3ro. Determine el número de Nusslet según la forma que tenga el caso de estudio. Los datos para realizar el cálculo se dan en la Tabla XI. Como se observa el número de Nusslet viene determinado por el intervalo de valores del número de Raleigh.

4to. Finalmente determinar el coeficiente convectivo de transferencia de calor,

$$h_{promedio} = NU_{promedio} K/L_c \quad [W/m^2 \cdot ^\circ K] \quad 6.13$$

Situación física	Valor de $Nu_{promedio}$	Intervalo de Número de Ra
Cilindros verticales y placa plana vertical	0.59 $Ra^{1/4}$ 0.10 $Ra^{1/3}$	$10^4 < Ra < 10^9$ $10^9 < Ra < 10^{12}$
Placa plana horizontal con la cara caliente hacia arriba	0.54 $Ra^{1/4}$ 0.15 $Ra^{1/3}$	$2.6 \times 10^4 < Ra < 1 \times 10^7$ $10^7 < Ra < 3 \times 10^{10}$
Espacio encerrado	0.18 $Gr_c^{1/4} (\delta/L)^{1/8}$ 0.065 $Gr_c^{1/3} (N/L)^{1/9}$	$2 \times 10^2 < 2 \times 10^5$ $2 \times 10^8 < 1 \times 10^7$

Nota: L es la dimensión menor de las placas en el espacio [59]

Tabla XI. Determinación del número de Nusslet a partir de la forma y el número de Raleigh [59].

Para simplificar los cálculos de la determinación del coeficiente convectivo de transferencia de calor de una superficie con el aire quieto a baja temperatura utilice la fórmula que sigue. [59].

$$h_{promedio} = c_1 (\Delta T / L_c)^{1/4} \quad [W/m^2 \cdot K] \quad 6.14$$

el valor de la constante  $c_1$ , se da en la Tabla XII.

Configuración $R_{cr}$ y $L_c$	$c_1$	
	Temperatura	
	27 [°C]	127 [°C]
Cilindro y placa plana verticales	1.53	1.41
Placa plana horizontal		
$Ra_{cr} = 10^7$ $L_c = L$	1.40	1.29
$Ra_{cr} = 3 \times 10^{10}$ $L_c = L$	0.7	0.64

Tabla XII Valores necesarios para determinar el Número de Nusslet en paredes expuestas a aire quieto y a baja temperatura

#### 6.1.2.1.1.3.- Transferencia de calor por radiación.

Las pérdidas de calor por radiación se presentan en la superficie del metal líquido y el chorro que se drena. La radiación en la cabeza metalostática del metal líquido se ve muy atenuada cuando las temperaturas son bajas (ley de Stefan-Boltzmann) y cuando en la superficie flota escoria. Cuando se manejan temperaturas altas o aleaciones susceptibles de oxidarse se usan fundentes de cobertura [5].

En los modos anteriores de transferencia de calor se necesita materia intermedia entre las sustancias que intercambian calor. Sin embargo, en la radiación no se requiere un medio de esa naturaleza. Esto es así debido a que esta forma de energía se emite por el simple hecho de contar con una temperatura determinada en su superficie. En consecuencia, su naturaleza es del mismo tipo de los rayos X, la luz visible y las ondas de radio. El rango característico de las ondas de radiación térmica es de una longitud de onda de 0.1 y 100 micrómetros [39]. Reiterando, los sólidos, líquidos y algunos gases

emiten radiación térmica como resultado de su temperatura. Sin embargo, un emisor ideal, al que se le llama cuerpo negro, absorbe toda la radiación térmica que recibe de acuerdo a la ley de Stefan-Boltzmann,

$$e_b = \sigma T^4$$

6.15

donde:

$e_b$  = Potencia emisiva de un cuerpo negro [W/m<sup>2</sup>]

$\sigma$  = Constante de Stefan-Boltzmann =  $5.67 \times 10^{-8}$  [W/m<sup>2</sup>°K<sup>4</sup>]

T = temperatura de la sustancia irradiante [°K]

En cambio un cuerpo gris disipa cierta cantidad de calor lo que se designa por un factor llamado emisividad  $\epsilon$ . Los valores de la emisividad van desde cero hasta la unidad, por ejemplo un cuerpo negro tiene una emisividad de 1 porque no refleja ninguna cantidad de calor. Entonces, la ecuación anterior queda,

$$e_b = \epsilon \sigma T^4$$

6.15a

Al llevar a cabo un estudio intercambio de energía por este método es usual que se desprece la convección siempre que el fluido intermedio a las superficies sea transparente y que se presenten cuerpos diversos que emitan o absorban energía. Debido a que la forma es un factor clave que influye decisivamente en la transmisión de calor se ha evaluado su efecto por medio del llamado "factor de forma" que se designa como la fracción de energía que parte de la superficie m y se dirige a la superficie n. Para tomar un ejemplo específico  $F_{1,2}$  representa la fracción de energía que proviene de la superficie 1 y que chocará con la superficie 2. Sin embargo como se verá más adelante la determinación de este coeficiente para el caso que nos interesa viene dado directamente en una gráfica el cual se trata de una espira de conductor irradiando calor a una superficie rectangular (Subcapítulo 6.2, párrafo segundo). Dicha gráfica se presenta en el Apéndice B.2. EL flujo de calor viene determinado por la energía que irradian o disipan los dos elementos térmicos en cuestión, tomando en cuenta los criterios señalados, el flujo de calor unitario queda,

$$q = \epsilon F_{1,2} \sigma (e_{b1} - e_{b2})$$

6.16

Al tomar en cuenta el área de transferencia de calor se tiene el flujo de calor total, ecuación 6.3.

### 6.1.2.1.1.3.- Balance de energía.

Una vez que se han determinado todos los coeficientes que representan las resistencias térmicas es común aislar por separado los coeficientes de convección y conducción evaluando el flujo de calor total a través de la pared como

$$Q = A (T_{amb} - T_{ext}) / (1/\Sigma R_{0,1,2,...,n}) \quad 6.17$$

Donde  $\Sigma R_{1,2,...,n}$  es la sumatoria de las resistencias térmicas denotadas por:

$$R_{convección} = 1/h_{conv}$$

$$R_{conducción} = L_n/K_n \text{ (Para una placa plana [ecuación 6.2]) y}$$

$$R_{conducción} = 2\pi L_n (r_o/r_i) / K_{n+1} \text{ (Para un cilindro largo [ecuación 6.5] y } n = 0,1,2,\dots \text{ y)}$$

El siguiente paso es considerar que la forma del sólido influye en gran medida en la transferencia de calor ya que zonas específicas tales como esquinas, bordes y cambios de área provocan mayor pérdida de calor, y es más notable su efecto en tanto las paredes sean más grandes, en el Apéndice B 1 aparecen las expresiones para determinar el factor de forma que es igual a [59]

$$S_{total} = \Sigma S_c + S_w + S_e \quad 6.6$$

donde:

$$S_c = \text{Factor de forma para una esquina} = \Delta x/15. \quad 6.6a$$

$$S_w = \text{Factor forma para una pared} = A/L \quad 6.6b$$

$$S_e = \text{Factor de forma para una orilla} = 0.54L \quad 6.6c$$

Antes de calcular deberá hacerse una contabilización de todos estos factores. Luego, la transferencia de calor viene dada por:

$$Q = A S_{tot} (\Delta T) / \Sigma R \quad 6.7$$

Esta ecuación entonces cuantifica el flujo de calor por conducción y convección a lo que deberá añadirse por último el calor por radiación para obtener la carga térmica final.

### 6.1.2.2. Régimen transitorio.

Según Yoseshwar y colaboradores [9] el factor mas importante que gobierna la temperatura en bruto del tundish y por consiguiente del líquido alimentado en el molde durante la colada es el control de la temperatura del fluido que emerge de la cuchara. Las fuentes de perdida de calor tienen diferentes motivos pero los que se consideran a continuación son la transferencia continua con el aire y la acumulación de calor de los refractarios y aislantes. El precalentamiento también es una medida importante así como el llenado con rapidez del tundish

Según Z. Zekely [63] la cuchara se puede considerar como un cuerpo semiinfinito, en el cual siempre existe una parte del cuerpo en que la temperatura permanece constante cuando ocurre un cambio de temperatura en una de sus fronteras. Un ejemplo tangible de esto lo constituye la corteza terrestre. Si se cambia la temperatura en la superficie de la tierra, siempre habrá algún punto que no experimente el efecto del cambio. Más aun, a una distancia de varios pies debajo de la superficie de la tierra, puede ser que no se sientan las fluctuaciones de temperatura en la superficie durante un largo tiempo. Sin embargo, esto se puede aplicar a recipientes cuya capacidad es de Toneladas, por ello es que en lugar de tomar este criterio se considerara el siguiente. Seguido, se determinara una expresión matemática a fin de determinar las variaciones de temperatura a partir las condiciones de frontera. Para ello se parte de la ecuación de un balance de energía,

$$\text{Razón de pérdida de calor por convección hacia el aceite} = \text{Razón de disminución de la energía interna del revestimiento}$$

Representando por  $T$  a la temperatura del metal fundido en el tiempo  $\tau$ , se escribe,

$$hA(T - T_{\infty}) = -\rho C_p V \frac{dT}{d\tau} \quad 6.18$$

En el miembro de la derecha de la igualdad aparece un signo menos debido a que la energía interna decrece con el tiempo si el revestimiento pierde calor. Esta situación se muestra en la Fig 49. Nuevamente haciendo un balance de energía se obtienen las ecuaciones,

$$\text{En el cuerpo a:} \quad h_a A_a (T_a - T_b) = \rho_a C_{p,a} V_a (dT_a / d\tau) \quad 6.18a$$

$$\text{En el cuerpo b:} \quad h_b A_b (T_b - T_a) + h_b A_b (T_b - T_{\infty}) = \rho_b C_{p,b} V_b (dT_b / d\tau) \quad 6.18b$$

De esta manera se obtienen un par de ecuaciones diferenciales lineales simultáneas para  $T_a(\tau)$  y  $T_b(\tau)$ . Las condiciones iniciales son

$$T_a(0) = T_b(0) = T_{\infty} \quad 6.19$$

Para resolver (6.18 a y b) usamos las condiciones iniciales para obtener  $T_b$  en términos de  $T_a$  y de  $dT/d\tau$ . Sustituyendo estas expresiones a través de (6.19) se obtiene una ecuación diferencial de segundo orden para  $T_a$ .

$$d^2T/d\tau^2 + C_1 dT/d\tau + C_2 T_a = C_2 T_{\infty} \quad 6.20$$

Resolviendo por medio de la fórmula 5.14,

$$C_1 = (h_a A_a) / (\rho_a C_{p,a} V_a) + (h_b A_b) / (\rho_b C_{p,b} V_b) + (h_b A_b) / (\rho_b C_{p,b} V_b) \quad 6.20a$$

$$C_2 = [(h_a A_a) / (\rho_a C_{p,a} V_a)] \cdot [(h_b A_b) / (\rho_b C_{p,b} V_b)] \quad 6.20b$$

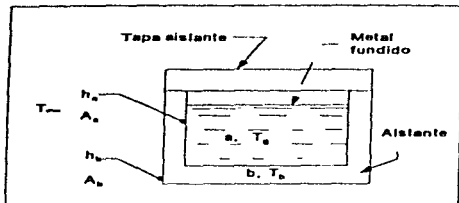


Fig. 49. Modelo para desarrollar el comportamiento del metal líquido en un recipiente [79].

La solución en estado permanente (integral particular) de 6.20 claramente  $T_0 = T_\infty$ , mientras que la solución transitoria es:

$$T_0 = A \exp(m_1 \tau) + B \exp(m_2 \tau) + T_\infty \quad 6.21$$

donde A y B son constantes arbitrarias y,

$$m_1 = (-C_1 + [C_1^2 - 4C_2]^{1/2}) / (2) \quad 6.22a$$

$$m_2 = (-C_1 - [C_1^2 - 4C_2]^{1/2}) / (2) \quad 6.22b$$

Seguido A y B se determinan mediante la aplicación de las condiciones iniciales,

$$dT_0 / d\tau = 0, \text{ para } \tau = 0 \quad 6.23$$

obteniendo,

$$A = [(m_2) / (m_2 - m_1)] (T_0 - T_\infty) \quad 6.23a$$

$$B = [(-m_1) / (m_2 - m_1)] (T_0 - T_\infty) \quad 6.23b$$

Finalmente, se obtiene

$$\frac{(T_0 - T_\infty)}{(T_0 - T_\infty)} = A \cdot m_2 \cdot [\exp(m_1 \tau)] - B \cdot m_1 \cdot [\exp(m_2 \tau)] \quad 6.24$$

donde:

$$T_0 = \text{Temperatura de bulbo del metal } [^\circ\text{C}] \quad 6.24$$



$\tau$  = Tiempo transcurrido en régimen transitorio [s]

6.24

$T_o$  = Temperatura inicial del líquido [°C]

6.24

### 6.1.3. ESPESOR DEL AISLAMIENTO TERMICO NECESARIO.

Aunque este tipo de materiales brindan amplios beneficios son bastante caros. Por ello es que en el cálculo de las paredes y el material de aislamiento térmico es clásico que se tomen en cuenta dos aspectos esenciales: El costo de acumulación de la energía y el costo del aislante, es decir, cuando se aumenta el espesor del material lo hace también el calor acumulado en las paredes del mismo, lo que repercute en el costo de energía.

El problema de conciliar el espesor mínimo de revestimiento combinado con la mínima acumulación de calor se resuelve mediante la manipulación de la ecuación principal de transferencia de calor para un cuerpo cilíndrico:

$$Q = \frac{T_c - T_{sm}}{\frac{1}{2\pi KL} + L \left[ \frac{1}{R} + \frac{1}{r} \right]} \quad (1) \quad 6.25$$

Según la ecuación anterior, en tanto la diferencia de temperatura  $T_c - T_{sm}$  sea más grande, mayor será  $Q$  y como la intención es que la temperatura  $T_{sm}$  sea lo más baja posible. También puede notarse que tanto para la resistencia convectiva como para la conductiva interviene la variable  $r_2$ . Entonces, se requiere determinar el valor de  $r_2$  para el cual  $Q$  sea máximo. Para ello se deriva la expresión anterior, o sea,

$$\frac{dQ}{dr_2} = \frac{0 - (T_c - T_{sm}) \left[ \frac{1}{2KLr_2} - \frac{1}{2hLr_2^2} \right]}{\left[ \frac{1}{2\pi KL} + \frac{1}{2\pi hLr_2} \right]^2} \quad 6.25a$$

Es fácil darse cuenta que dicha expresión se cumpla es necesario que:

$$\frac{1}{2\pi KL} - \frac{1}{2\pi hLr_2^2} = 0 \quad 6.26$$

reduciendo:

$$r_2 = \frac{K}{h} = r_c \quad 6.27$$

donde  $r_c$  es el radio crítico, valor para el que se obtiene la menor temperatura en la pared exterior de la superficie de aislamiento con el mínimo espesor de material posible.

En la Fig. 50. se observa el comportamiento cuando  $t_2 > r_{cr}$ , aumentan los costos por consumo de energía a causa de que se acumula una cantidad excesiva de calor con un consecuente aumento del consumo de energía de calefacción (Curva A) aumentando los costos totales (Curva C), en caso contrario, si  $t_2 < r_{cr}$  aumentan los costos por incremento de la cantidad de material (Curva B) acrecentando el costo total (Curva C). Cabe aclarar que aunque se ha tratado el caso particular de una pared cilíndrica este cálculo también es válido para paredes rectas.

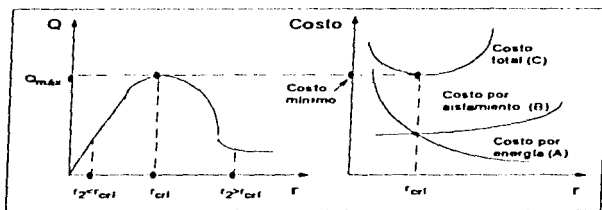


Fig. 50. Ilustración gráfica de los factores que afectan la determinación de aislamientos térmicos.

## 6.2.- ELEMENTOS DE APORTACION DE CALOR.

El sistema propuesto puede asemejarse a un horno, el cual está proyectado para fundir la carga que tenga en su interior, a diferencia del sistema propuesto que tiene únicamente la finalidad de aportar el calor perdido durante la operación de la colada. Existen tres métodos de generación de calor bien conocidos: sistemas de combustión interna, inducción y resistencias eléctricas. Sin embargo, a nivel experimental este último resulta ser el más conveniente por las siguientes razones: [22]

1<sup>o</sup>.- Los hornos de resistencia eléctrica son los preferidos en laboratorios por su simplicidad, limpieza y ausencia de mantenimiento y calidad óptima de los productos que brinda.

2<sup>o</sup>.- El uso de la energía eléctrica tiene la ventaja sobre los combustibles en que

- No existe el peligro de varios defectos en la producción que puedan ocasionar un deterioro de los recipientes contenedores o hacerlos inservibles.

- Si existe una falla eléctrica, el metal puede dejarse solidificar y después ser refundido sin causar daño.

3º.- Las ventajas de los hornos de resistencia eléctrica sobre los hornos de inducción son: Inversión de capital más baja y economía en el espacio disponible. El costo inicial de los hornos de crisol es más bajo y ocupan menos espacio.

- Costo reducido por mantenimiento. Los hornos de crisol requieren poco mantenimiento el costo de su revestimiento es bajo y fácil y rápido de colocar.

La información conveniente para crear un sistema de calentamiento mediante resistencias se puede dividir en cuatro secciones.

- A).- Características principales del calentamiento mediante resistencias eléctricas.
- B).- Determinación de los elementos de calentamiento.
- C).- Conexiones más comunes de resistencias eléctricas.
- D).- Embobinado de resistencias dobladas.

### **6.2.1.- PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LAS RESISTENCIAS ELÉCTRICAS.**

Para la especificación de las características de un resistor eléctrico se deben tomar en cuenta los siguientes puntos:

#### **6.2.1.1.- Temperatura de trabajo,**

Esta característica es indispensable para que los conductores de calentamiento (resistores) no sufran deterioro. De entre varios materiales destacan las aleaciones a base de cromo-níquel y Cromo-aluminio-Fierro ya que se usan para temperaturas inferiores a los 1500°C.

#### **6.2.1.2.- Duración**

Según el Instituto de electrotecnia de Eseen se determino que a la temperatura de 1100°C la aleación Cr80%-Ni20% tiene una duración de 400 horas. La resistencia a la oxidación es un factor muy importante en la aplicación de las resistencias. La corrosión se debe a la formación de una capa de óxido muy adherente y prácticamente impermeable al oxígeno, que se forma a partir de las componentes de la aleación después de la primera puesta en servicio del conductor de calentamiento. Por tal motivo hay que garantizar esta capa de óxido protegiéndola contra los ataques de los gases del medio ambiente.

La resistencia a la oxidación y a la corrosión debida a la capa de óxido es mayor al aumentar el calibre y aún más al disminuir la temperatura de trabajo

### **6.2. 1.3.- Comportamiento químico.**

En general las resistencias eléctricas no deben estar en contacto con azufre, cloro, bromo, anhídrido carbónico o flúor, puesto que sufren alteración química. En particular en el volumen 15 de Metals Handbook se reporta que las aleaciones a base de Ni-Cr no deben estar en contacto con atmósferas de plomo o de cinc puesto que se reducen.

### **6.2. 1.4.- Presentación comercial.**

Las resistencias eléctricas se encuentran en diferentes formas según la aplicación a las que se vayan a destinar y en general se pueden clasificar en forma de cartucho con gran poder de irradiación de calor y tipo conductor con sección transversal pequeña. Para fijarlas se usan formas variadas de soportes de arcilla refractaria (1000°C). La cantidad de alúmina recomendable para los soportes es de 40%. En la Fig 53 se ejemplifican diferentes formas de instalación para los dos tipos mencionados junto con algunas formas posibles de instalación.

## **6.2.2.- DETERMINACION DE LOS ELEMENTOS DE CALENTAMIENTO.**

En el Subcapítulo anterior se han determinado las expresiones fundamentales para obtener la carga térmica perdida en el transcurso de la operación del sistema dosificador. A partir de esto entra en consideración la aportación de ésta, así como el tiempo en que se desea transferir variables que se toman como punto de partida para especificar las características de los elementos de calefacción. Los cálculos para determinar estos factores se basan en dos leyes fundamentales de la electricidad la primera es la ley de Ohm que postula, "El voltaje aplicado a un circuito cerrado es proporcional a la corriente que circula por él", es decir

$$V = RI$$

6 29

donde:

V = Voltaje aplicado al conductor [Volts]

R = Constante de proporcionalidad o resistencia del conductor [Ohms]

I = Corriente que circula por el conductor [Amperes]

Dado que el material influye en la capacidad de generación de calor de un conductor se debe tener presente desde el principio. Para ello se determina la temperatura máxima de trabajo con lo que se elige el material de la resistencia eléctrica de tal manera que no sufra deterioro por esa causa. La aleación 80% níquel y 20% cromo (kantel) es la más ampliamente utilizada, la cual tiene una temperatura máxima de operación de 1200°C y una temperatura de fusión de 1400°C.

La segunda es la ley de Joule que dice: "La cantidad de calor disipada por un conductor es proporcional al cuadrado de la intensidad de la corriente que pasa por él", es decir:

$$P = RI^2 \quad 6.30$$

Ya que la energía pérdida del metal fundido debe ser igual a la aportada por las resistencias eléctricas se puede decir que:

$$P_{\text{in}} = P_{\text{out}} \quad 6.31$$

La potencia aportada por un conductor eléctrico también esta dada por:

$$P = IV \text{ [Watts]} \quad 6.32$$

El primer paso para realizar los cálculos es determinar el voltaje de operación (que normalmente puede ser de 125 o 240 Volts). A partir de los datos de voltaje de operación y carga térmica necesaria es posible obtener la corriente que pasa por el conductor mediante la ecuación (6.32) modificada:

$$I = V/P \text{ [Amperes]} \quad 6.32a$$

Seguido, al despejar la ecuación (6.29) se encuentra la resistencia del conductor,

$$R = V/I \text{ [ohms]} \quad 6.29a$$

Con los datos de voltaje de operación [Volts], carga térmica [Watts] y resistencia del conductor [ohms] se puede usar la Tabla del Apéndice B.3 Para determinar el calibre recomendado por el fabricante.

Después, con el dato del calibre se usa la misma Tabla y se determina la cantidad lineal de resistencia [Ohms/metro]. La longitud requerida de conductor viene dada por una regla de tres:

$$\frac{R}{L} = [R / L]_{\text{min.}} \quad 6.30$$

Por lo tanto, la longitud del resistor viene dada por:

$$L = \frac{R}{[R / L]_{\text{min.}}} \quad 6.30a$$

Por último, se hace el arreglo de resistencias tratando de distribuir lo mejor posible la aportación de calor.

### 6.2.3.- CONEXIONES DE RESISTENCIAS.

Como anteriormente se mencionó, el valor total de la potencia calorífica disipada depende de la corriente y la resistencia del conductor. Así mismo; la correcta distribución de la energía así como la cantidad acorde con la demanda están determinadas por el arreglo del circuito. Las conexiones comunes de resistencias son

#### 6.2.3.1.- Conexión en serie.

En la Fig. 51(a) Se muestra un arreglo de resistencias en serie. La intensidad de corriente es idéntica en cada resistencia, la tensión de alimentación es igual a la suma de todas las caídas de voltaje. La resistencia total es igual a la suma de las resistencias. Esto puede expresarse como

$$I = \frac{E}{R_1 + R_2 + \dots + R_n} \quad 6.31a$$

$$R_t = R_1 + R_2 + R_3 \quad 6.31b$$

$$E = e_1 + e_2 + \dots + e_n \quad 6.31c$$

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad 6.31d$$

Donde:

$R_t$  = Resistencia total [ohm].

$E$  = Tensión total [Volt]

$I$  = Corriente en el circuito [Ampere]

#### 6.2.3.2- Conexión en paralelo.

En la Fig 51(b) se muestra esta conexión. Según la ley de Ohm la suma de las corrientes de los circuitos derivados es igual a la de alimentación. Así mismo el voltaje de cada uno de los circuitos derivados es igual al de alimentación.

$$I = i_1 + i_2 + \dots + i_n \quad 6.32a$$

$$R_t = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}} \quad 6.32b$$

$$E = e_1 = e_2 = \dots = e_n \quad 6.32c$$

Donde:

$I_n$  = Corriente en cada malla.

$E$  = Voltaje de alimentación.

$R_n$  = Resistencia en cada malla

Cuando las resistencias a conectar en paralelo tienen el mismo valor se tendrá que para:  
2 Resistencias...  $R_t = r/2$ , 3 resistencias  $R_t = r/3$ , ect.

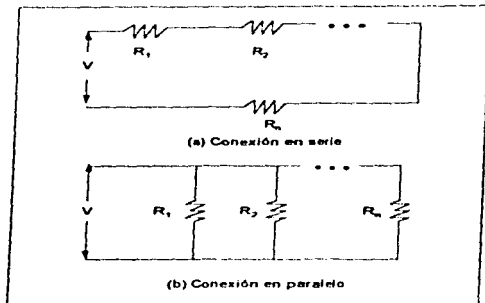


Fig. 51. Conexión en serie y en paralelo.

### 6.2.3.3.- Conexión en sistema trifásico.

Los sistemas tradicionales monofásicos han sido en su mayoría sustituidos por sistemas trifásicos para la generación de grandes sistemas de potencia porque, (a) Son más eficientes, (b) requieren sistemas más pequeños en tamaño y  $\Phi$  Requieren menor cantidad de conductor para generar la misma potencia [66] Existen dos tipos de conexión, (a) Estrella y (b) Delta Este método brinda la posibilidad de llevar a cabo el control de temperatura mediante los siguientes posibilidades

a) Modificando la conexión de estrella a triángulo y viceversa

b) Insertando o excluyendo del circuito dos o más estrellas o deltas en paralelo

c) Arreglos con semiconductores de potencia.

d) Quitando ramales para obtener sistemas bifásicos o monofásicos.

A continuación se ven ambas conexiones considerando que cada fase tiene la misma carga, o en otras palabras que el sistema se encuentra equilibrado en cuyo caso si no es así se deberán tomar importantes precauciones.

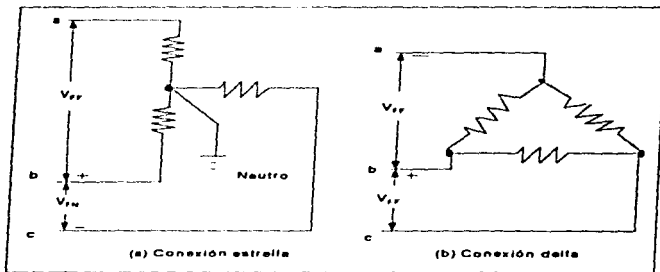


Fig. 52. Conexión trifásica

#### 6.2.3.3.1- Conexión estrella.

La conexión se muestra en la Fig. 52(a). en los que se identifican dos voltajes: (a) Voltaje de fase ( $V_{FN}$  ó Neutro-Fase) y Voltaje de línea ( $V_{FF}$  ó Fase a Fase). Según las leyes de defasamiento[66] se tiene

$$I_L = I_\phi$$

6.33a

$$V_L = \sqrt{3} V_\phi$$

6.33b

#### 6.2.3.3.2- Conexión delta.

En la Fig. 52(b) se muestra el arreglo, por leyes de defasamiento se tiene:



$$l_c = 3 l_s$$

6 34a

$$V_c = V_s$$

6 34b

Finalmente, en la Fig. 53. se muestran tres configuraciones posibles de colocación ilustrando las diferentes tipos de conexión.

#### 6.2.4.- EMOBINADO DE RESISTENCIAS DELGADAS.

En la Fig. 53. se aprecia claramente como existen dos variedades de resistencias: las hay de espesor muy ancho en forma de cartucho y delgadas en forma de alambre. Mediante esta última opción se puede conseguir una mejor distribución de temperatura dado que permiten un mayor espaciamiento de la distribución del calor irradiado, por ello es que se toma mayor atención al respecto. Así mismo, las longitudes de conductor que se requieren son a menudo muy largas, es por ello que se requiere embobinarlas con la finalidad de que parezca un resorte muy largo y por consiguiente aumente la longitud efectiva del conductor y se disminuye enormemente el área que ocupa

#### 6.2.4.- EMOBINADO DE RESISTENCIAS DELGADAS.

En la Fig. 53. se aprecia claramente como existen dos variedades de resistencias: las hay de espesor muy ancho en forma de cartucho y en forma de alambre. Mediante esta última opción se puede conseguir una mejor distribución de temperatura dado que permiten un mayor espaciamiento de la distribución del calor irradiado, por ello es que se toma mayor atención al respecto. Así mismo, las longitudes de conductor que se requieren son a menudo muy largas, es por ello que se requiere embobinarlas con la finalidad de que parezca un resorte muy largo y por consiguiente aumente la longitud efectiva del conductor y se disminuye enormemente el área que ocupa (Fig. 54a)

Para llevar a cabo el embobinado surgen dificultades diversas las resistencias de mayor calibre aunque requieren mayor longitud y por tanto mayor inversión, tienen mejor resistencia mecánica y duración. También, ninguna espira del embobinado deberá tener contacto con otra ya que de lo contrario se presentará un corto circuito. Considere una espira de resistencia enrollada vista de perfil (haga de cuenta que es un resorte de lado). Esta compuesto de perímetro exterior e interior y medio que se considerara como efectivo, de ello surgen dos conceptos el radio de curvatura  $r$  y el avance que se definirá como la longitud que avanza el conductor cada vez que se tenga una espira [o bien que el conductor recorra  $360^\circ$  ( Fig. 54b) ]

Suponga que se tiene un radio de curvatura  $r$  que sumado al radio del conductor se obtiene el radio efectivo, es decir,

$$r_{\text{efectivo}} = (DN/2) + r$$

6 35

Donde  $DN$  es el diámetro nominal del conductor (Fig. 54c). Así que el perímetro efectivo viene dado como,

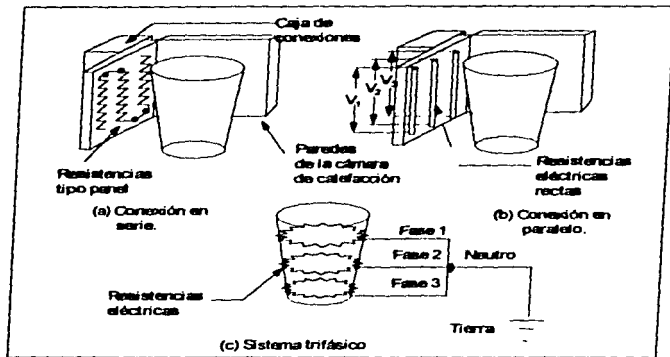


Fig. 53. Arreglos para conectar resistencias eléctricas así diferentes formas de calefacción.

$$P_{\text{efect}} = \pi D_{\text{efect}} = 2 \pi r_{\text{efect}} = \pi(DN + 2r) \quad 6.36$$

Por otro lado, recuerde que cada vez que el conductor da una vuelta se tiene una espira, es decir,

$$L_{\text{cond}} = n P_{\text{efect}} \quad 6.37$$

Donde  $n$  es el número total de espiras o vueltas del conductor. Así mismo, el avance se relaciona con la longitud del espacio como,

$$\text{Avance} = L_{\text{efect}} / n, \text{ [longitud/vuelta]} \quad 6.38$$

Despejando,

$$n = L_{\text{elect}} / \text{avance}$$

6.38a

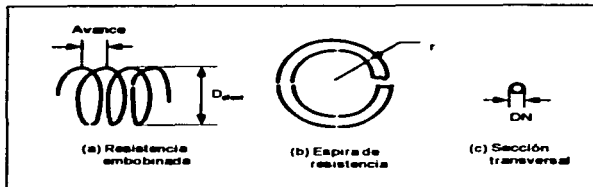


Fig. 54. Detalle de una resistencia embobinada.

Sustituyendo (6.38a) en (6.37),

$$L_{\text{cond}} = (L_{\text{elect}})(P_{\text{elect}}) / \text{avance}$$

6.38a

Despejando el  $P_{\text{elect}}$  de la ecuación anterior,

$$P_{\text{elect}} = \frac{L_{\text{cond}} \text{Avance}}{L_{\text{elect}}}$$

6.40

Nuevamente sustituyendo (6.36) en (6.40),

$$\pi (DN + 2r) = \frac{L_{\text{cond}} \text{Avance}}{L_{\text{elect}}}$$

6.41

despejando,

$$\text{Avance} = \frac{\pi (DN + 2r) L_{\text{elect}}}{L_{\text{cond}}}$$

6.42

### 6.3.- INTEGRACION DEL SISTEMA

En esta etapa todos los elementos del control de temperatura se conjugan para formar un sistema. El problema que se presenta es regular la temperatura del líquido que se encuentra en el interior de los recipientes. Así mismo, se ha determinado que el intervalo

de temperaturas se encuentra entre 550 y 600 [°C] El funcionamiento clásico de un sistema de este tipo se ha presentado en el subcapítulo 2.5.1 así como cada una de sus partes. Por lo tanto, en esta ocasión nos enfocaremos a determinar las diferentes variantes de control de temperatura así como las características del transductor

Generalmente no se toma como magnitud controlada la temperatura de la carga o el metal, siempre y cuando exista una relación de transferencia de calor, la cual ya se ha determinado También necesariamente deberá existir un tiempo en régimen permanente considerable para que se puedan tomar lectura confiable Por lo tanto, los valores teóricos deben ser comprobados mediante experimentos Sin embargo, en algunos casos especiales es posible medir la temperatura de la carga directamente En general se distinguen varios tipos de regulación, pero en el caso de hornos para fundir metal el Instituto de Electrotecnia de Essen [65] recomienda usar un dispositivo de regulación "todo o nada" que permite poner en servicio o fuera de servicio toda la potencia

El elemento que determina la temperatura se llama transductor el cual tiene la función de captar una señal física de cierto tipo y convertirla en otra que sea factible de ser interpretada Los elementos actuadores pueden ser también transductores al mismo tiempo: En este caso constan de un elemento metálico que se deforma en función de la temperatura a la que se exponen, con lo cual se consigue un movimiento físico del material lo que a su vez provoca que se encienda o apague el circuito, según sea el caso El principio de deformación provoca variaciones en la resistividad de los metales lo que se aplica en los termopares Los pirómetros de radiación se utilizan para altas temperaturas Si se deseara medir directamente la temperatura del metal líquido se debe considerar la conductividad térmica y emisividad de la escoria que flota en el metal Las medidas obtenidas se leen directamente en los aparatos

Los transductores más ampliamente utilizados son los termopares, los cuales consisten de dos alambres retorcidos de diferente material que al someterse a altas temperaturas se provoca la generación de una fem La juntura recomendada para una temperatura menor de 900°C es de hierro-constantán La señal eléctrica que genera el transductor cuando llega a un valor dado puede accionar un relevador que hace las funciones de actuador Finalmente cuando un termopar se cubre con un embudo de vidrio refractario al arreglo se le llama pirómetro, el cual es muy usado en los hornos de combustión o bien, adicionalmente existe la posibilidad de que dicho embudo sea mojado por el metal, con lo que se obtiene una medida inmejorable Note que el termopar en este caso recibe la energía calorífica por radiación

# CAPITULO VII

## DETERMINACION DE REFRACTARIOS

En el Subcapítulo 4.2 se vio una panorámica general del proceso para fabricar una pieza refractaria. De tales procedimientos el moldeo presenta dificultad especial dado que las piezas a desarrollar son muy pequeñas en comparación de aquellas que se venden para fines industriales es por ello que a continuación se da un enfoque especial analizando en función de nuestras necesidades los métodos de moldeo adecuados, para lo cual se dividen los refractarios a en dos partes:

A) - Revestimiento de recipientes.

B) - Accesorios.

### 7.1.- REVESTIMIENTOS DE LOS RECIPIENTES.

De la información presentada en el Cuarto Capítulo se obtienen las necesidades al respecto:

- Especificar la manera de instalarlos y de eliminarlos cuando estén deteriorados, así como tiempo de vida útil bajo condiciones normales de operación.
- Evaluar el comportamiento de los revestimientos.
- Que no sufran deterioro durante servicio o instalación.

De las presentaciones de refractario las formas especiales y los ladrillos se usan aplicaciones industriales a muy altas temperaturas y además resultan ser excesivamente caros. Dadas tales circunstancias se considera que el uso de materiales moldeables en el interior de la chapa de acero los cuales generalmente se moldean mediante el "moldeo en barbotina". Básicamente el proceso consiste en suspender los materiales crudos, finamente pulverizados en un medio líquido (la suspensión se lleva a cabo mediante la acción de un desemulsificador) y verter la mezcla (llamada barbotina) en un molde poroso, generalmente de yeso o de madera. El cual tiene la facultad de absorber la humedad de la barbotina a través de la superficie de contacto. De esta manera se forma una capa solidificada que adopta la forma de la superficie del molde y va creciendo a medida que transcurre el tiempo de reposo hasta que alcanza el espesor deseado, posteriormente se vierte el resto y se separa la forma monolítica del molde terminando la operación [40]. El proceso se muestra en la Fig. 55. La composición y tratamiento de la barbotina es importante para obtener piezas sin deformación plástica, agrietamiento o alabeo. El tamaño y forma de las partículas, los iones absorbidos y el agua empleada

tienen efectos tan acusados sobre las propiedades de las barbotinas cerámicas que el proceso, aun en la actualidad sigue siendo un arte. Esto hace que su eficacia dependa de la destreza manual del operario; sin embargo, hoy día utiliza su aplicación se ha facilitado gracias a que las mezclas son elaboradas para aplicarse directamente y con resultados comprobados por los fabricantes [42, 43].

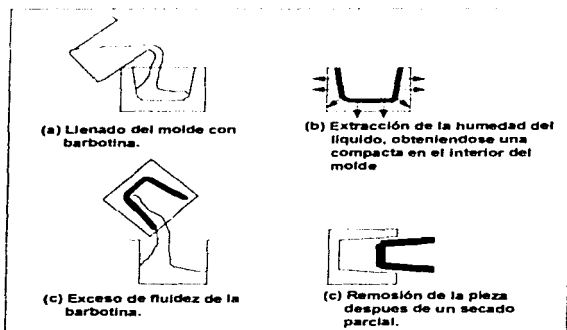


Fig. 55. Proceso de colada en barbotina [41].

## 7.2.- ACCESORIOS.

Los problemas encontrados con tales elementos son de índole de resistencia mecánica en operación, la cual se relaciona a su vez con la fabricación y además, envuelve prácticamente a las características de la resistencia a la abrasión, al choque térmico y al despostillamiento o resquebrajamiento. Por lo tanto, a fin de analizar tales aspectos es necesario dividirlos en dos partes:

A) Fabricación.

B) Análisis de operación.

## **7.2.1.- FABRICACION DE ACCESORIOS.**

Aunque el colado por barbotina visto en el capítulo anterior se puede aplicar a este caso se tienen otros métodos con los cuales se obtiene mayor densificación de la pieza moldeada, característica muy importante en los accesorios según lo tratado en el Subcapítulo 4.2.2. Cabe hacer notar que los materiales para cementación, plásticos y refractarios secos presentados en el Subcapítulo 4.1.1.2 se pueden aplicar y están procesados especialmente para aquellos métodos que dan mayor compactación a la pieza de los que se escogen los siguientes por los más viables.

- A) - Prensado.
- B) - Apisonado
- C) - Extrusión

### **7.2.1.1- Prensado.**

La importancia de la eficacia de esta operación se refleja particularmente en el buen desempeño de la boquilla para lo cual es deseable que se logre la mayor densificación posible, de tal manera que su rugosidad y porosidad sean muy bajas obteniendo el menor desgaste; lo mismo sucede con la punta del rodillo en la que destaca adicionalmente la perfección de la forma ya que deberá sellar perfectamente con el asiento de la primera. Precisamente ambas características pueden controlarse de manera estricta con este método, no bastando con ello también permite operaciones posteriores para mejorar el acabado tales como el barrenado y el rectificado [41].

El prensado unidireccional es una de los métodos más factibles de conformar las piezas deseadas. Se le denomina de esa forma por aplicarse la fuerza en un sólo sentido, a diferencia del método bidireccional en el cual se aplica la fuerza por ambos lados. En el segundo caso se obtienen piezas con exigencias de magnífica densificación y acabados, lo cual no aventaja demasiado a el primer método propuesto.

El elemento indispensable para llevar a cabo la operación es una prensa que como su nombre lo sugiere es una máquina la cual aplica presión bajo condiciones controladas de carga, dirección, carrera y velocidad. En los laboratorios de Ingeniería Civil de la U.N.A.M. Campús Aragón se cuenta con dos máquinas de este tipo las cuales pueden desarrollar una carrera de 400 milímetros aproximadamente y una presión de 60 Toneladas la más pequeña y otra más grande de 200 Toneladas por centímetro cuadrado, por tal motivo será necesario adaptar los métodos implementados a tales circunstancias. Al respecto la "Power Metallurgy Association " [52] reporta que los requerimientos de las prensas para alúmina son de 8 a 10 y de 10 a 12 Toneladas por pulgada cuadrada para el carburo, por lo tanto se puede utilizar la prensa más pequeña.

La operación comienza con la preparación de la masa a prensar. Para ello se le mezcla con deafluclante, plastificante, aglutinante y algunas veces lubricante, en proporciones adecuadas, según deba ser su composición. El deafluclante reduce la cantidad de líquido para granular la masa. El plastificador aumenta la capacidad de deformación de la masa lo cual se lleva a cabo en algunos materiales los cuales no tienen propiedades plásticas naturales (o facilidad de deformación), tales como la arcilla o los óxidos refractarios casi puros (magnesita o la alumina). El aglutinante promueve la capacidad de aglomeración de la masa evitando espacios de aire, sin embargo, se debe utilizar moderadamente para evitar que se volatilice en la operación de sinterizado o cocimiento. El lubricante disminuye la cantidad de rozamiento entre el dado y la pieza prensada, aumenta la fluidez del material en las esquinas y también ayuda a mejorar la densificación. En la Tabla. XIII Se presentan las sustancias usadas para la operación de prensado de varios materiales de importancia [41]. Finalmente, la mezcla se granula mediante asperjado para lograr una homogeneidad más alta y eliminar cualquier cantidad de aire atrapada [41].

Material	Aglutinante	Plastificante	Lubricante
Alumina	Alcohol polivinílico	Glicol polietileno	Estearato de aluminio
Refractarios	Ca/Na ligno sulfonate	Agua	Acido esteareico
Cerámica para azulejo	Arcilla refractaria y polisacáridos	Agua	Arcilla en estado coloidal

Tabla. XIII. Sustancias comunes que se usan para preparar la mezcla para efectuar el prensado [41].

La medida de grano del polvo que se prefiere es de 40 [µm] puesto que presentan buena fluidez. Los granos finos más allá del 5% del total de la masa tienden a introducirse en el hueco del dado y la matriz aumentando la fricción y reduciendo la cantidad de escape de aire de la masa. Los granos muy gruesos generalmente tienen forma muy irregular y aumentan la cantidad de rozamiento en las paredes lo cual disminuye la cantidad de densificación de la pieza. Por ello es que se prefieren granos redondos que puedan permitir el acomodo y deslizamiento perfectamente [41].

La operación se puede llevar a cabo de dos formas según se muestra en la Fig. 56. El arreglo superior consiste de un punzón superior (A), punzón inferior (B), rodillo central para la formación de la concavidad (C) y dado para conformar la pieza lateralmente (D). Durante la compactación todos los elementos permanecen estacionarios (Primer paso). En la operación el punzón entra dentro del dado y comprime el polvo contra el punzón inferior y la superficie lateral del dado (Segundo paso). La eyección de la pieza se puede llevar a cabo de dos maneras en la primera el dado y el rodillo central permanecen estáticos mientras el punzón inferior se eleva, en el segundo caso el pistón inferior



permanece estático mientras que el dado y el rodillo del centro se bajan hasta el punto en que emerge la pieza. El arreglo se puede hacer con prensas neumáticas o hidráulicas [52]

El arreglo inferior de la Figura mencionada consiste de un dado (A), un punzón inferior (B) y un rodillo central para formar la concavidad (C). En este caso no se utiliza un punzón superior sino que se tiene un yunque o una superficie gruesa (D) la cual se desliza sobre el dado hasta el nivel del polvo escapa hacia el exterior. El yunque entonces se sujeta en la posición de compresión. La compresión puede efectuarse mediante dos formas de actuación de los elementos. La primera requiere que el punzón inferior desempeñe las funciones de llenado, compresión e inyección de la pieza, mientras que el dado se usa como referencia estacionaria. La otra forma requiere que el punzón inferior se mantenga fijo como referencia en tanto que el dado se mueve a la posición de llenado, compresión e eyección durante el ciclo del prensado. Este método ofrece la ventaja de requerir una menor cantidad de piezas en movimiento, debido a ello se minimizan los costos de los herramientas y el tiempo requerido para lograr la operación [52]

Observe que en todos los casos el punzón inferior puede adoptar la forma circular de la punta del rodillo utilizado para tapar la boquilla.

Existen dos variantes del proceso que se designan en función de la cantidad de agua que requiere la preparación de la masa: el prensado en seco y el prensado en húmedo. La cantidad de agua agregada es de 0 a 4% para el primero y de 10 a 15% para el segundo caso, el cual se aplica generalmente para la obtención de piezas de chamota, o bien para la fabricación de formas pequeñas, especialmente en accesorios de la industria eléctrica y de la construcción tales como ladrillo o azulejo y piedras de desbaste para la industria manufacturera [41]

#### **7.2.1.2.- Apisonado.**

Otro método factible y más económico que el anterior es el apisonado, el cual se ejemplifica mediante el moldeo de un crisol (Fig. 57). El procedimiento se lleva a cabo como sigue: similarmente al prensado se introduce un pistón en un collar de dado, se invierte el conjunto y se vacía en la cavidad de la forma un polvo cerámico previamente tratado con lubricante. Sin embargo, el polvo se coloca alimentándolo poco a poco y distribuyéndolo en su lugar a medida que es apisonado con un rodillo. Si se tiene un martillo de aire será muy útil para tal propósito, pero no es realmente necesario. Cuando se ha obtenido la altura deseada del crisol se prosigue a escuadrar el nivel. Por último se vierte una capa terminal de grafito sobre el fondo del crisol y se retira el pistón [22]

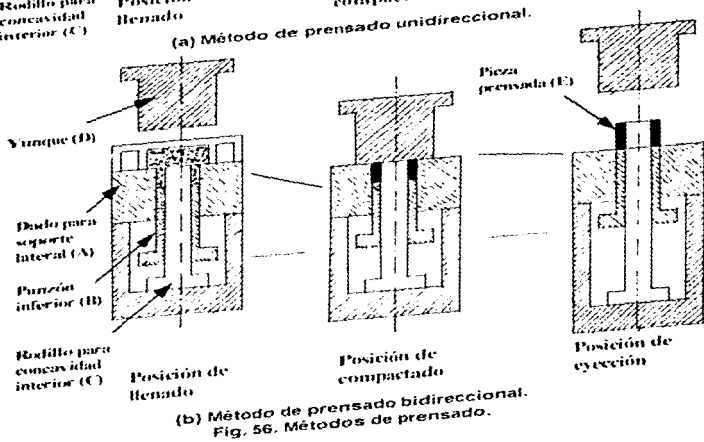
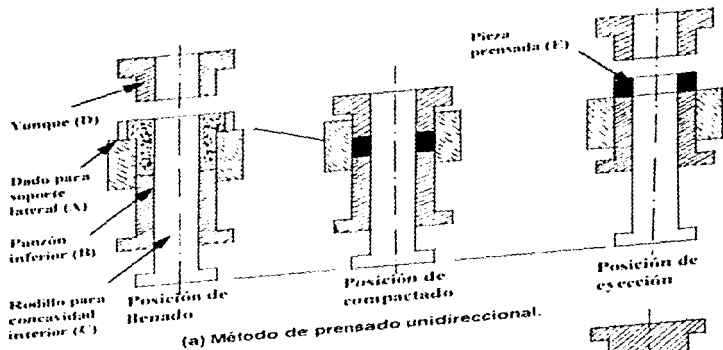


Fig. 56. Métodos de prensado.

### **7.2.1.3.- Método de extrusión.**

Este método se adapta para la fabricación de piezas largas como el rodillo refractario. El procedimiento consiste en la deformación una masa plástica bastante rígida la cual se fuerza a través de una boquilla para formar una barra de sección constante para posteriormente recortarse en tramos como pieza definitiva o utilizable como masa de partida para futura conformación.

En la Fig. 58. se muestra el principio del procedimiento. El refractario (A) se comprime en el cilindro (B), frecuentemente bajo vacío, por medio del pistón C. En (D) se restringe el flujo y se provoca un incremento en la presión de la masa del cilindro que se ve obligada a pasar por (D) en una barra de sección constante.

Las pastas no arcillosas, como las de alúmina, se extruyen con plastificantes orgánicos como la metacelulosa y el alcohol polivinílico. Hay dos sistemas generales, uno con un plastificante blando en el que se coloca una masa preformada en el cilindro y se extruye a menos de  $350 \text{ Kg/cm}^2$  y otro en el que se emplea un aglutinante duro, como la cera, y se coloca una masa granulada en el cilindro bajo vacío, para proceder a extruirla a presiones más elevadas. A menudo se coloca una placa perforada delante del cuello o la matriz para desmenuzar la mezcla. Uno de los problemas es conseguir que el aglutinante quede bien mezclado con el óxido de forma que todas las partículas queden recubiertas.

Todas las pastas de óxidos extruidas tienen un gradiente de densidad desde el centro hasta la periferia que provoca tensiones durante el cocimiento. No obstante, como el gradiente es simétrico, no causa dificultades en secciones pequeñas y poco complicadas. El uso del propulsor helicoidal es común para la formación de barras de arcilla e igualmente el uso del vacío es prácticamente universal [71].

### **7.2.2.- ANALISIS DE COMPORTAMIENTO.**

Las características que deben cumplir estos elementos son resistir invariablemente las condiciones de operación y conseguir el acoplamiento mutuo entre ellos. El seguimiento lógico para lograr tales objetivos implica tratar los aspectos que se dan a continuación:

- A) Análisis de los efectos de la temperatura
- B) Análisis de enfriamiento.
- C) Análisis de los elementos de que consta la válvula.
- D) Relación del conducto sumergido con las características del molde.

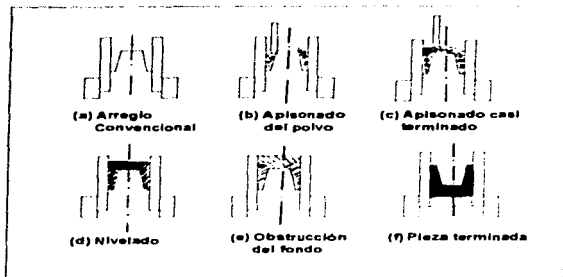


Fig. 57. Etapas de apisonado de un crisol [22].

#### **7.2.2.1. Análisis de efectos provocados por temperatura.**

Al conjunto de efectos nocivos producidos por esta causa se les llama "desconchado", lo cual se genera por dos causas: (a) Un gradiente de temperatura en el cuerpo refractario, debido a su enfriamiento o calentamiento, especialmente cuando no es de forma regular, lo cual es suficiente para producir tensiones de magnitud tal que pueden llegar a la rotura. (b) Una variación en el coeficiente de expansión térmica entre la capa superficial y el cuerpo refractario, debida a la penetración superficial de la escoria o a un cambio estructural, mientras funciona, lo suficientemente grande como para cizallar la capa superficial [39]. A continuación se tratan ambos efectos.

##### **7.2.2.1.1. Efecto del choque térmico.**

El fenómeno tiene particular importancia en la cochura de los refractarios puesto que deben ser calentados a temperaturas superiores a los 1200 grados centígrados por un tiempo sumamente prolongado (24 Horas). En la operación de la colada continua los elementos más inmunes al choque térmico son el conducto largo contra la reoxidación y el rodillo de la válvula de lanza. Tal situación se debe al alto gradiente térmico a que se ven sometidos especialmente al principio de la colada lo cual provoca esfuerzos internos de diverso tipo los cuales se deben comprender antes de proseguir con el análisis, para ello se presenta un esquema en la Fig. 59.

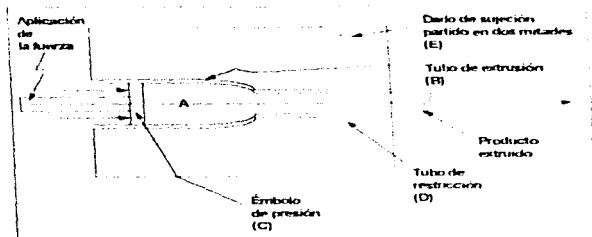


Fig. 58. Método de extrusión [71].

El calentamiento o enfriamiento súbitos han sido ampliamente estudiados analizando los esfuerzos que se generan en las piezas de cualquier refractario, especialmente aquellos de cerámica de tales experimentos se toman las conclusiones útiles al respecto [39]

- Las tensiones producidas por gradientes de temperatura son de igual magnitud pero de sentido contrario.
- Cuando aparece un calentamiento súbito no aparecen fuerzas de tensión longitudinal
- Los cantos son lugares en los cuales los esfuerzos son pequeños, por lo tanto los vértices se descascarillan mas bien debido a la debilidad mecánica que a causa de los gradientes de temperatura superiores
- Los esfuerzos provocados por variaciones bruscas de temperatura son directamente proporcionales al tamaño. La evaluación exacta de los esfuerzos que sufre un cuerpo refractario en interacción con la temperatura requiere de métodos complicados, por ello es que muchas veces es necesario probarlos en operación. Dado que el cocimiento del material es el punto más crítico en la vida de los refractarios, siempre y cuando se les den condiciones de operación cuidadosas esto puede evaluarse cualitativamente según los datos aportados en la Tabla XIV.

Tipo de ladrillo	Resistencia al desconchado
Arcilla refractaria de alta refractariedad tipo corriente	Buena
Arcilla refractaria de alta refractariedad resistente al desconchado	Buena
Corriente de muy alta refractariedad	Muy buena
Semisilice	Excelente
De alto contenido de alumina	De excelente a buena
Silice	De buena a excelente
Cromita magnesia, cementados químicamente	por debajo de 1200 [°F]
Cromita- magnesia- calcinadas	De aceptable a buena
Cromita- magnesia, cementado químicamente	De aceptable a buena
Magnesia- Cromita, calcinadas	Excelente
Fosferita	Excelente
Carburo de Silicio	Aceptable
Carbón y grafito	Excelente
	Excelente

Tabla. XIV. Resistencia al desconchado de diversos tipos de refractario.

#### 7.2.2.1.2.- Efecto de la Interacción de un inserto de metal dentro de un material refractario

Este efecto toma particular importancia en el acoplamiento del rodillo de la valvula con el vástago de material metálico. La situación se da por los diferentes coeficientes de dilatación lineal de los materiales en contacto. Para explicarlo se muestra un esquema en la Fig. 59a y b-, los cuales se encuentran a una temperatura ambiente en (a) y posteriormente se ven sometidos a un cambio brusco de temperatura. El aumento de longitud se llama dilatación térmica y esta dado por

$$\Delta L = (\alpha) (\Delta T) (L)$$

7 2

Donde

$\alpha$  = Coeficiente de dilatación lineal [°C<sup>-1</sup>]

L = Longitud del cuerpo [m]

$\Delta T$  = diferencia de temperaturas entre el refractario y el metal [°C]

Al llevarse a cabo el calentamiento se observa que el metal tiene siempre mayor expansión y mayor resistencia que el refractario y por consiguiente este último es más inmune al rompimiento, por ello es que se analizarán los esfuerzos producidos

### 7.2.2.1.2.1.- Esfuerzo longitudinal.

Considérese las elongaciones para el material refractario y el vástago [67]

$$\delta_{R1} = (\alpha_r) (\Delta T) (L_r) \quad 7.2a$$

$$\delta_{M1} = (\alpha_M) (\Delta T) (L_M) \quad 7.2b$$

Las fuerzas existentes en ambos materiales hacen que el vástago se acorte (lo comprimen) y alarguen al refractario (lo tensionen), a fin de que el alargamiento final sea el mismo. las fuerzas que se generan se muestran en la misma figura, note que ambas son de la misma magnitud para que se conserve el equilibrio, las cuales también generan elongaciones:

$$\delta_{R2} = \frac{(P_r)(L_r)}{E_r A_r} \quad 7.3a$$

$$\delta_{M2} = \frac{(P_M)(L_M)}{E_M A_M} \quad 7.3b$$

Ahora se puede determinar una ecuación que exprese el echo de que el alargamiento final es el mismo para ambas barras, o sea:

$$\delta_{R1} - \delta_{R2} = \delta_{M1} + \delta_{M2} \quad 7.4$$

Una segunda ecuación para las fuerzas axiales se obtiene del equilibrio estático,

$$P_r = P_M \quad 7.5$$

Esto es, la fuerza de compresión en el vástago es igual a la fuerza de tensión en el refractario. Al combinar las ecuaciones se obtiene la fuerza de ensamble provocada por el cambio de temperaturas [67]

$$P_r = P_M = \frac{(E_r A_r \alpha_r + E_M A_M \alpha_M) (\Delta T) L}{\frac{L_r}{E_r A_r} + \frac{L_M}{E_M A_M}} \quad 7.6$$

El alargamiento final se obtiene al sustituir (7.4) en (7.6) lo que origina,

$$\delta = \frac{(E_r A_r \alpha_r + E_M A_M \alpha_M) (\Delta T) L}{E_r A_r + E_M A_M} \quad 7.7$$

Donde,

$E_R$  = Módulo de elasticidad para el rodillo [MPa]

$E_v$  = Modulo de elasticidad para el vastago o alma de acero [MPa]

$A_R$  = Area transversal del refractario [ $m^2$ ]

$A_v$  = Area transversal del vastago [ $m^2$ ]

$\alpha_R$  = Coeficiente de dilatacion lineal del refractario [ $m^3K/m$ ]

$\alpha_v$  = Coeficiente de dilatación lineal del vastago [ $m^3K/m$ ]

El generacion de esfuerzos se puede evitar eliminando el contacto, o bien minimizar la magnitud de los esfuerzos por esta causa combinando adecuadamente los coeficientes de dilatacion termica del refractario y el metal, asi como procurar que la union evite que el refractario se mantenga en compresion en lugar de tension debido a su altisima resistencia a la compresion. Para conseguir esto se pueden seguir dos metodos

- Usar metales tales como el "Kovar" o "Invar" y algunas aleaciones de Niquel-Hierro que tienen coeficientes de dilatacion termica parecidos al de la ceramica
- Los metales de coeficientes elevados tales como el aceros laminados en frio y aceros inoxidable que pueden utilizarse solamente cuando la temperatura no sea excesiva [40]

#### 7.2.2.1.2.1.- Esfuerzo cortante.

El esfuerzo axial del alma de acero a su vez induce esfuerzos cortantes en el refractario. En la Fig. 59c, se presenta como de costumbre el alma de acero en el refractario. En la cual se presentan las interacciones de los esfuerzos proyectados sobre los ejes coordenados. El punto de partida sera la teoria de la deformacion de Poisson, la cual esta dada por [67]

$$\epsilon_{lateral} = -(\nu)(\Delta L)$$

7 8

donde

$\nu$  = modulo de Poisson  
[adimensional]

$\nu = \epsilon_l / \epsilon_a =$   
Deformacion lateral/Deformacion axial

Las propiedades de un material en cortante se han determinado experimentalmente y de los resultados de estas pueden trazarse los diagramas esfuerzo-deformacion. La porcion inicial de este diagrama se comporta en linea recta para la cual el esfuerzo cortante y la deformación son directamente proporcionales, lo que se puede interpretar como la Ley de Hooke

$$\tau = G\gamma$$

7 9



Donde:

$G$  = Módulo de elasticidad a cortante  $\gamma$  = Deformación por esfuerzo cortante [adimensional]  
(también conocido como módulo de rigidez) [MPa]

$\tau$  = Esfuerzo cortante [Mpa]

En este caso será útil calcular el esfuerzo cortante que sufre el refractario. Partiendo del valor obtenido anteriormente,

$$\tan \gamma = \tau/h \quad 7.10$$

Donde

$h$  = Espesor del refractario  $\delta$  = Deformación obtenida en la ecuación (7.7).

Note que aplicando la función inversa a la ecuación anterior se puede determinar el valor de  $\gamma$  el cual se debe aplicar a la ecuación (7.9)

#### 7.2.2.2.- Análisis de enfriamiento.

El estudio del fenómeno tiene gran trascendencia en los efectos de acumulación de calor ya sea para evitar el enfriamiento de la boquilla cause el paro total de la operación o bien que el metal fundido en contacto con el revestimiento refractario sufra pérdida de calor. Para conseguir esto se puede proseguir de dos formas: (a) aplicar precalentamiento y (b) Colocar aislamiento térmico, a continuación se tratan ambos métodos

##### 7.2.2.2.1.- Precalentamiento.

La cantidad de calor aportado necesario para compensar la pérdida de calor requiere las suposiciones de que el líquido circulante en el orificio de la boquilla tiene temperatura constante y que no existe pérdida de calor en los extremos de la boquilla. Según Karlekar [59] es útil usar la fórmula

$$q = C_{p,l} \Delta T \quad 7.11$$

##### 7.2.2.2.2.- Enfriamiento en estado transitorio.

Los cálculos desarrollados hasta ahora toman en cuenta un estado permanente, sin embargo, a partir de que la pieza refractaria entra en operación sufre enfriamiento gradual. A continuación se procede a determinar teóricamente las variaciones de temperatura en las partes de los accesorios que se consideren más importantes [59]

A fin de determinar una expresión matemática que explique su comportamiento se sigue el mismo método que en el Subcapítulo 6.1.2.2 solo que en este caso suponga que se tiene una bola de acero sumergida en un balde de agua que pierde su calor por convección, de lo que se obtiene el balance de energía.

$$\text{Razón de pérdida de calor por convección hacia el aceite} = \text{Razón de disminución de la energía interna de la bola de acero}$$

Modificando la ecuación (6.18),

$$\frac{dT}{dt} + \left( \frac{hA}{\rho V c_p} \right) T = \left( \frac{hA}{\rho V c_p} \right) T_{\infty} \quad 7.12$$

La ecuación no homogénea de coeficientes constantes se puede resolver definiendo una nueva variable independiente,  $T - T_{\infty}$ , y observando que  $d(T - T_{\infty})/dt$  es igual a  $dT/dt$  cuando  $T_{\infty}$  es igual a una constante. Partiendo de esto se obtiene,

$$\frac{d(T - T_{\infty})}{dt} + \left( \frac{hA}{\rho V c_p} \right) (T - T_{\infty}) = 0 \quad 7.13$$

En seguida haga  $C' = \ln C$  y tome antilogaritmos. La solución de la ecuación se transforma en,

$$T - T_{\infty} = C e^{-\left( \frac{hA}{\rho V c_p} \right) t} \quad 7.14$$

Integrando

Aplicando la condición inicial en  $t = 0$ ,  $T - T_{\infty} = T_0 - T_{\infty}$ , se obtiene como resultado  $T - T_{\infty} = C e^{-\left( \frac{hA}{\rho V c_p} \right) t}$ , por consecuencia,

$$\ln \left( \frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} \right) = - \left( \frac{hA}{\rho V c_p} \right) t \quad 7.15$$

Como  $C = T_0 - T_{\infty}$ , y aplicando antilogaritmos, finalmente,

$$T - T_{\infty} = (T_0 - T_{\infty}) e^{-\left( \frac{hA}{\rho V c_p} \right) t} \quad 7.16$$

Obteniendo la llamada ecuación de difusión la cual se aplica para resolver problemas cuya resistencia interna sea despreciable, pero ese caso no nos ocupa puesto que el refractario tiene muy baja conductividad térmica, por lo tanto, su resistencia a permanecer en estado cuasiestático es muy alta. Esto se determina con el cálculo del número de Biot

$= hL C_p / K$ , donde  $L$  es la longitud característica e igual a  $D/4$  para un cilindro largo de diámetro  $D$  como es el caso del rodillo de la válvula, la boquilla y el conducto sumergido o buza

Cuando el número de Biot es mayor de 0.1 se deben utilizar las cartas de Heisler (Apendice B.5 para un cilindro largo y B.6 para una placa plana), las cuales muestran graficamente la relacion entre: [59]

$$\left[ \frac{T(0, \tau) - T_\infty}{T_i - T_\infty} \right] \quad \text{Contra} \quad \left[ \frac{h^2 \tau}{K} \right] \quad \text{y} \quad \text{Biot} \quad 7.17$$

Puesto que ya se cuenta con el numero de Biot y la longitud característica prosiga a determinar el numero de Fourier. Con estos datos es suficiente para encontrar la relación de temperaturas (relación de la izquierda antes presentada) y usando las graficas del Apendice B7 y B.8 se puede determinar la cantidad de calor perdido o ganado según sea el caso. Dicha Tabla relaciona  $(U/U_\infty)$  contra  $(h^2 \tau / K)$  junto con el número de Biot. Donde  $U_\infty$  es el calor transferido en el instante preciso del comienzo del régimen transitorio, o sea:  $\tau = 0$  y  $U$  es el calor transferido en el transcurso del tiempo:  $\tau > 0$

#### 7.2.2.2.- Aislamiento térmico.

Los accesorios a los cuales se les coloca aislamiento térmico realmente requieren poca cantidad de aislamiento puesto que su tamaño es pequeño y por lo mismo acumulan cantidad de vapor despreciable.

### 7.2.3.- CARACTERÍSTICAS DEL MECANISMO DE ACCIONAMIENTO DE LA VÁLVULA

Según lo anterior la válvula de rodillo es la más factible de ser desarrollada debido a que su funcionamiento es más sencillo y su costo de fabricación es mucho más bajo. Debido a ello, es necesario desarrollar un mecanismo de ascenso-descenso de la válvula por medio del cual abrir o cerrar el acceso de la boquilla. Así mismo es deseable que tal mecanismo ejerza una fuerza que force al rodillo a deformarse elásticamente adoptando la forma del orificio de la boquilla así como también que mediante ella se consiga un buen ajuste de tal manera que su asiento sea totalmente perpendicular (Fig. 24). A continuación se tratan dichos aspectos.

#### 7.2.3.1.- Métodos de accionamiento de la válvula.

Como se ha mencionado, en la Fig. 24, se muestra uno de los mecanismos para ser aplicado en la operación de ascenso-descenso, sin embargo, tal parece que este sistema se utiliza en cucharas de enormes capacidades (toneladas), de ello se desprende que al ser la válvula muy larga se requiere un ajuste lateral y longitudinal de la colocación de la punta del rodillo. En la Fig. 60, se muestra otro mecanismo el cual consta de una

cremallera circular deslizante y un engrane que es fácilmente accionado mediante una palanca, además de que es mucho más sencillo que el anterior y es factible de ser usado para recipientes pequeños. En ambos casos se requiere que tengan dos tipos de sistemas: uno que sostenga la válvula en el caso de que se requiera obturación y otro de presión para forzar el asiento del rodillo

### 8.2.2.3.2.- Análisis de fuerzas en le marco del mecanismo.

Las fuerzas naturales que interactúan en el marco dan lugar a deflexiones que influyen en el correcto ajuste del rodillo en la boquilla, tal y como se muestra en la Fig. 61, lo cual depende de los materiales y dimensiones utilizados. El marco está compuesto de dos varillas, representadas por sus momentos de inercia  $I_1$  e  $I_2$ . La descomposición de fuerzas se observa en la parte izquierda de la Figura. El momento con respecto al punto 2 viene dado como,

$$M_2 = W \cdot l_2 + q \cdot l_2^2 / 2 \quad 7.18$$

El ángulo de deflexión provocado por el peso y la carga distribuida viene dada por,

$$\theta_2 = \frac{M_2 \cdot l_2}{E \cdot I_2} \quad 7.19$$

Sustituyendo la ecuación (7.18) en (7.19) se obtiene [67]

$$\theta_2 = \frac{(W \cdot l_2 + q \cdot l_2^2 / 2) \cdot l_2}{E \cdot I_2} \quad 7.20$$

Multiplicando términos,

$$M_2 \cdot l_2 = \frac{W \cdot l_2^3 + q \cdot l_2^4}{2 \cdot E \cdot I_2} \quad 7.21$$

finalmente, la flecha producida por la deflexión es,

$$f_2 = \frac{M_2 \cdot l_2^2}{2 \cdot E \cdot I_2} \quad 7.22$$

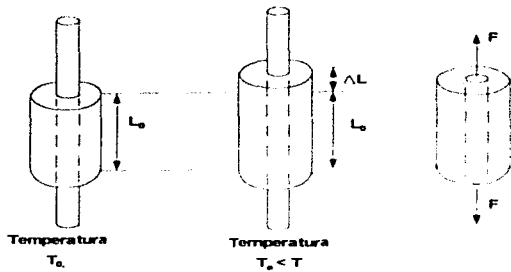
Donde

$\theta_2$  = Ángulo de deflexión de la viga empotrada 2-3 [rad]

$q$  = Carga lineal de la varilla 2-1 [Kg/m]

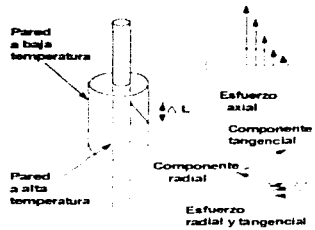
$W$  = Peso de el rodillo [Kg]

$f_0$  = Flecha debida a la deflexión varilla 2-3 [m]

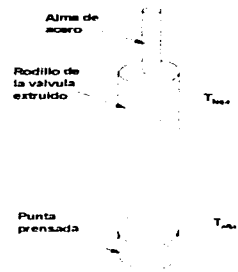


(A) Dilatación del refractario en un alma de acero por efecto del aumento de temperatura.

(b) Generación de Esfuerzo tensionante



(c) Generación de esfuerzo cortante



(d) Generación de esfuerzos por el gradiente de temperatura

Fig.59. Generación de esfuerzos en el rodillo en un alma de acero.

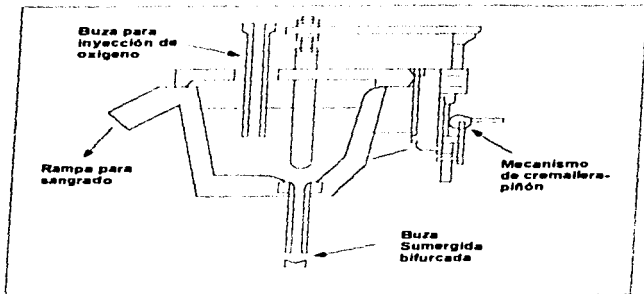


Fig. 60. Válvula de lanza con accionamiento de cremallera-piñón.

#### 7.2.2.3.2.- Correlación entre la buza sumergida y las características en el molde.

Según Zequely y colaboradores [50] la longitud del molde acorde con el orificio de salida de la buza sumergida favorece la correcta mezcla del metal fundido en el molde. La Fig. 62. Ilustra este aspecto lo cual se relaciona con la fórmula siguiente para la óptima longitud de mezclado: [50]

$$\frac{l_m}{R} = 0.14 - 0.08 \left( \frac{r}{R} \right)^2 + 0.06 \left( \frac{r}{R} \right)^4$$

7.23

Donde:

$l_m$  = Longitud óptima del molde [cm]

$r$  = Radio de la buza [cm]

$R$  = Radio del molde [cm]

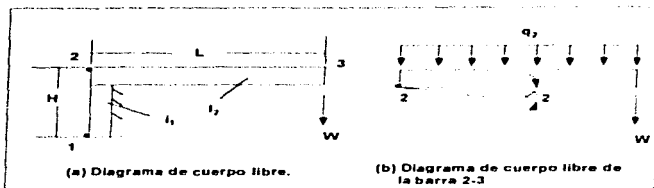


Fig. 61. Interacciones de las fuerzas y deflexiones en el marco del soporte del mecanismo.

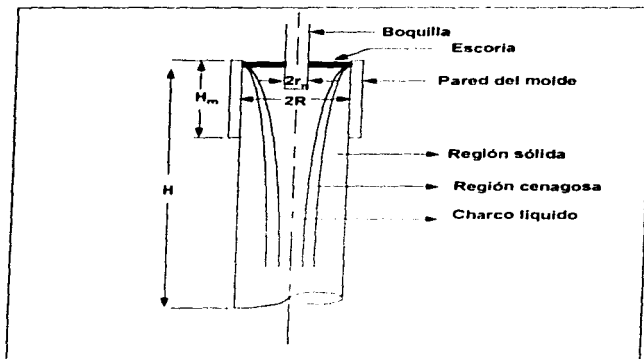


Fig. 62. Partes necesarias para conseguir la correcta difusividad del fluido en el molde [50].

## **APARTADO CUARTO EVALUACION Y DESICION**

*En esta etapa se desea probar las soluciones anteriormente propuestas. A través de está acción se van encontrando criterios y medidas objetivas o subjetivas así como también se van haciendo tomas de decisión, lo cual se llevará a cabo buscando la compatibilidad y menor costo de los elementos del sistema. El resultado al final será la determinación de la alternativa mejor*

### **CAPITULO VIII. EVALUACION DE LAS SOLUCIONES**

La evaluación de las alternativas propuestas se debe llevar a cabo de lo general a lo particular lo cual se puede lograr siguiendo el orden anterior

- A).- Características de los recipientes
- B) - Características del sistema de control de temperatura.
- C).- Características de los refractarios

#### **8.1.- CARACTERISTICAS DE LOS RECIPIENTES.**

A partir de la obtención de la capacidad de los recipientes se procede a determinar cada uno de sus elementos logrando que las características entre si vayan acordes con las expectativas de funcionamiento en operación y por último se desarrollan cálculos para su desarrollo, todo ello se logra a través de los siguientes puntos.

- A) Cálculos de sus medidas
- B) Características de descarga
- C) Condiciones de operación.
- D) Modelo propuesto
- E) Espesor de la chapa y desarrollo de los recipientes.



### 8.1.1.- MEDIDAS DE LOS RECIPIENTES.

En esta sección se desarrollan los cálculos para determinar las dimensiones de los recipientes acordes con su capacidad determinada en el Subcapítulo 5.1. Para llevar a cabo esto se hicieron recipientes de diversas medidas evaluando cada uno mediante la determinación del tiempo de descarga puesto que es favorable que el líquido permanezca el mayor tiempo posible en el tundish promoviendo la separación de inclusiones no metálicas así como en la cuchara afectando positivamente la continuidad de la operación de ambos elementos. Observando la fórmula 5.24a se nota claramente que al disminuir la altura y aumentar la sección transversal del recipiente aumenta también el tiempo de descarga. Por lo tanto, a continuación se presenta el cálculo para cada uno de los recipientes elegidos en base a este criterio.

#### 8.1.1.1- Cuchara.

**Planteamiento:** "Se requiere determinar las medidas de una virola cónica de 8 844 X10<sup>3</sup> [m<sup>3</sup>] con una altura de 10 hasta 35 [cm] y con un ángulo en las paredes de 7°."

**Ejemplo:** Suponiendo que se tiene una altura de 0.2 [m].

$$\begin{aligned} A &= 1 && 5.13a \\ B &= (0.20 \text{ m})(\tan 7^\circ) = 0.0245 \text{ m} && 5.13b \\ C &= (0.0245 \text{ m})^2 / (3) - [(8.844 \text{ [m}^3]) / (1000) (0.2 \text{ m}) (3.14)] = && 5.13c \end{aligned}$$

Sustituyendo,

$$\begin{aligned} r &= (-0.0245 + [(0.0245)^2 + 4(1)(0.0138)]^{1/2}) / (2) (1) && 5.14a \\ r &= 0.1306 \text{ m} \\ R &= 0.1306 \text{ m} + (0.20 \text{ m})(\tan 7^\circ) = 0.1557 \text{ m} && 5.10b \end{aligned}$$

**Toma de decisión:** Se necesita hacer un recipiente en forma de virola cónica cuyas medidas son: Un radio mayor de 0.557 m y un radio menor de 0.1306 m con una altura de 0.20 m. Cabe aclarar que es necesario aumentar un poco la altura del recipiente evitando cualquier posible rebose del nivel del líquido. Las dimensiones finales se muestran en el Plano Uno.

#### 8.1.1.2.- Tundish.

**Planteamiento:** "Hacer una artesa con paredes sezdadas a 7°, con un volumen de 4.442 X10<sup>3</sup> [m<sup>3</sup>], además la longitud deberá triplicar al ancho". Note que el volumen de este recipiente es la mitad del de la cuchara por considerarse algo práctico.

**Ejemplo:** Suponiendo que se tiene una altura de 10 [cm].

$$A = 0.3 \quad 5.20a$$

$$B = (0.1 \text{ m}) (\tan 7^\circ) (1 + 0.3) / (2) = 0.00798 \text{ m} \quad 5.20b$$

$$C = (0.333) (0.15 \text{ m})^2 (\tan 5^\circ)^2 - (4.422 \text{ m}^3) / (1000) (0.10 \text{ m}) \quad 5.20c$$

$$= 0.00496 \text{ m}^2$$

$$L' = (-0.00798 + [(0.00798)^2 + 4(0.3)(0.04496)]^{1/2}) / (2) (0.3) \quad 5.21a$$

$$= 0.37 \text{ m}$$

$$L = 0.37 + (0.10 \text{ m})(\tan 7^\circ) = 0.382 \text{ m} \quad 5.17c$$

$$a' = (0.37) / (3) = 0.111 \text{ m} \quad 5.18a$$

$$a = 0.111 + (0.10 \text{ m})(\tan 7^\circ) = 0.123 \text{ m} \quad 5.17d$$

**Toma de decisión:** Hacer una artesa con una sección rectangular superior de 0.382 X 0.370 metros y una sección rectangular inferior de 0.123 X 0.111 metros. La altura del recipiente es de 0.10 metros y las medidas anteriores están ajustadas para que se obtenga un ángulo de inclinación de 7° en las cuatro paredes laterales. Este recipiente tiene la ventaja adicional de que tiene similitud hidrodinámica con el reportado por S. Shinhay y colaboradores [64], lo cual se verá más adelante y al mismo tiempo facilita su evaluación. Aunque los criterios planteados tiene la desventaja de que favorecen las pérdidas de calor y la adherencia de inclusiones se propone corregir estos aspectos más adelante.

### 8.1.2.- CARACTERISTICAS DE DESCARGA.

**Planteamiento:** "Obtener las características adecuadas de los orificios de descarga acordes con las características de los recipientes previamente determinados y con el diámetro del molde de forma tal que la continuidad se mantenga lo más uniforme posible en todo el recorrido del flujo. Otro aspecto importante es la determinación del tiempo de descarga de los recipientes en base a los elementos antes mencionados."

El primer aspecto que se destaca para llevar a cabo esto es la forma de la boquilla. Un orificio curvo disminuye la posibilidad de taponamiento pero provoca un mayor coeficiente de descarga disminuyendo el tiempo de vaciado, en cambio, uno cónico aumenta el tiempo de vaciado. Tales aseveraciones se notan en la Fig. 41. Para aplicar la ecuación de la continuidad partiremos de la altura de los recipientes lo que a su vez determina la velocidad de drenado del fluido:

$$H_{\text{recipiente}} = 25 \text{ cm} (0.25 \text{ m})$$

$$H_{\text{molde}} = 10 \text{ cm} (0.1 \text{ m})$$

$$V_{\text{recipiente}} = 2.21 \text{ m/s}$$

$$V_{\text{molde}} = 1.4 \text{ m/s}$$

Según la ecuación 5.23,

$$Q = A_{\text{recipiente}} V_{\text{recipiente}} = C_{\text{recipiente}} A_{\text{molde}} V_{\text{molde}} = A_{\text{molde}} V_{\text{molde}}$$

8.1



$$Q = (C_{d\text{desc}}) (A_{\text{uch}}) (V_{\text{uch}}) = (C_{d\text{desc}}) (A_{\text{uch}}) (V_{\text{uch}}) = (\pi D_{\text{noche}}^2 / 4) V_{\text{noche}} \quad 8.7$$

Tomando los valores encontrados,

$$Q = (0.3)(3.166 \times 10^{-4} \text{ m}^2) (2.21 \text{ m/s}) = (1.3) (1.115 \times 10^{-5} \text{ m}^2) (1.4 \text{ m/s}) \quad 8.8$$

$$= 2.194 \times 10^{-5} \text{ [m}^3/\text{s}] = 9 \text{ lit/s}$$

Despejando,

$$D_{\text{noche}} = [4Q / \pi V_{\text{noche}}]^{1/2} = [2.194 \times 10^{-5} \text{ [m}^3/\text{s}] / \pi (6 \times 10^{-3} \text{ m/s})]^{1/2} = 0.0668 \text{ m} \quad 8.9$$

$$= 6.68 \text{ cm} = 2.6317 \text{ pulg}$$

De los valores anteriores se obtiene un diámetro de 6.632 cm. A continuación se determina el tiempo de vaciado para los recipientes escogidos para las boquillas.

#### 8.1.2.1.- Cuchara.

Para desarrollar los cálculos se toma el coeficiente de descarga  $C_d = 1.3$ ,  $A_c = 3.166 \times 10^{-4} \text{ [m}^2]$ ,  $V = 2.21 \text{ m/s}$  y  $R = 0.148 \text{ m}$

$$T_v = [(\pi)(0.148 \text{ m})^2 (2.21 \text{ m/s}) / (3.166 \times 10^{-4} \text{ m}^2) (1.3)] [0.25 \text{ m} / 2 (9.81 \text{ m/s}^2)]^{1/2} \quad 5.25c$$

$$= 188.7 \text{ segundos} = 3 \text{ minutos}, 8 \text{ segundos}$$

#### 8.1.2.2.- Tundish.

Como en el punto anterior los datos son  $C_d = 0.3$ ,  $A_c = 1.115 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ ,  $V = 1.4 \text{ m/s}$ ,  $L = 0.29 \text{ m}$  y  $a = 0.147 \text{ m}$ .

$$T_v = (0.29 \text{ m})(0.147 \text{ m})(1.4 \text{ m/s}) / (1.115 \times 10^{-5} \text{ m}^2)(0.3) [0.1 \text{ m} / 2 (9.81 \text{ m/s}^2)]^{1/2} \quad 5.25e$$

$$= 909 \text{ segundos} = 15 \text{ minutos} 9 \text{ segundos}$$

### 8.1.3.- **CONDICIONES DE OPERACION.**

**Planteamiento:** Determinar las condiciones de operación reales acordes con las características del sistema propuesto. Para ello tenga presente que se debe esperar un lapso de tiempo antes de permitir el vaciado de ambos recipientes con la finalidad de conseguir que la turbulencia cese y se de una valiosa oportunidad para la flotación de escorias, sin embargo otra forma sería eliminar el segmento solidificado del producto al inicio de la operación. Para ambos recipientes se propone un tiempo de espera de dos minutos. El tiempo estimado de operación es,

$$T_{\text{Total}} = T_{\text{espera recipientes}} + T_{\text{vaciado del tundish}}$$

$$= 4(60[\text{s}]) + 20[\text{s}] + 909 \text{ segundos} = 1109 \text{ segundos}$$

= 18 minutos aproximadamente

**Toma de decisión:** El modo de operación que se considera más adecuado es: Vacíe el metal fundido en la cuchara verificando previamente las condiciones de refractarios y accesorios y que estos se encuentren a la temperatura de precalentamiento adecuada. Espere un tiempo adecuado (dos minutos) para que la mayoría de las inclusiones no metálicas floten y el líquido en el recinto del recipiente pierda turbulencia con la finalidad de evitar cualquier generación de vórtices. Hecho esto, permita el vaciado de la cuchara hasta aproximadamente al 62% de su nivel estimando que a este valor se llenará el tundish, procure no abrir demasiado para disminuir la turbulencia del líquido tanto en el orificio de la boquilla y buza sumergida como en el recinto del tundish. Ello traerá mayor duración de los refractarios así como menor tiempo de espera para la separación de inclusiones. Posteriormente abra los orificios de ambos recipientes accionando los mecanismos, de tal manera que la distancia del rodillo a el asiento de la boquilla sea según lo especificado. Si es posible vigile los flotadores de ambos recipientes corrigiendo las variaciones de continuidad mediante el accionamiento de la palanca de cada uno.

**Planteamiento.** Debido a lo determinado anteriormente es necesario estimar la altura metalostática que debe tener la cuchara cuando haya vaciado la mitad de su volumen ( $4.22 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ ). Esto toma trascendencia en el cálculo de las pérdidas de calor debido a que el área que ocupa el metal fundido es la que más pierde calor. Para conseguir esto se procede a despejar la ecuación 5.10.

$$H = (R - r) / (\tan\beta) \quad 5.10a$$

Sustituyendo en 3.11.

$$V = [\pi [(R - r) / (\tan\beta)] (R^2 + r^2 + Rr)] / 3 \quad 5.11a$$

Desarrollando.

$$(3 \tan\beta V) / (\pi) = R^3 - r^3 \quad 5.11b$$

Despejando R que es el factor desconocido.

$$R = [(3 \tan\beta V) / (\pi) + r^3]^{1/3} \quad 5.11c$$

Aplicando los datos ya conocidos.

$$R = ([ (3) (\tan 7^\circ) (4.44 \times 10^{-3}) / (\pi) ] + r^3)^{1/3} \quad 5.11d$$

$$R = 0.1395 \text{ m}$$

Sustituyendo este valor en 5.10a.

$$H = (0.95 - 0.13 \text{ m}) / \tan 7^\circ = 0.0744 \text{ m}$$

### 8.1.4.- MODELO PROPUESTO.

**Planteamiento:** "Implementar un modelo hidrodinámico por medio del cual se optimise la separación de incrustaciones no metálicas cumpliendo con los criterios de similitud hidrodinámica en base al modelo real".

Como punto de partida para desarrollar el modelo se deben satisfacer los criterios de similitud hidrodinámica. Para ello se requieren los datos mostrados en la Tabla del Apéndice C.1. En el caso particular de un flujo motivado predominantemente por gravedad Sekely [56], reporta que se requiere que el modelo y el prototipo cumplan con el criterio de similitud geométrica, que los números de Froude sean iguales para ambos y que el flujo en la boquilla sea turbulento para ambos. El primer criterio a considerar es el de la similitud de régimen de flujo, debido que de esta manera se obtuvieron resultados reales. Para ello primero se determina el régimen de flujo en la descarga del prototipo del tundish,

$$Re_{\text{prot}} = [(2) (9.81 \text{ m/s}^2) (0.1 \text{ m})]^{1/2} (3.383 \times 10^{-3} \text{ m}) / 0.333 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}] = 1.142 \times 10^4 \quad 5.24c$$

Así mismo en cuenta la ecuación y que se trata de un modelo de agua se tiene,

$$D_{\text{modelo}} = (Re_{\text{prot}}) (1/\rho_{\text{agua}}) / (2H_{\text{modelo}} g)^{1/2} = (3.2275 \times 10^4) (1.006 \times 10^{-4}) / [(2) (9.81 \text{ m/s}^2)]^{1/2} (H_{\text{modelo}})^{1/2} = (0.00072) / (H)^{1/2} \quad [m] \quad 5.24d$$

Esta ecuación arroja valores interesantes, por ejemplo, si se tiene un orificio de 1.7 milímetros se requiere una altura hidrostática de 0.1793 metros, mismos que se escogieron para ser evaluados a continuación. El siguiente criterio es el número de Froude, el cual se determinara primeramente para el prototipo,

$$Fr_{\text{prot}} = (1.4[\text{m/s}])^2 / (9.81 [\text{m/s}^2]) (38.6 \times 10^{-2} [\text{m}]) = 0.5176 \quad 5.26a$$

Igualando los números de Froude del prototipo y del modelo obtenemos la siguiente ecuación,

$$Fr_{\text{modelo}} = Fr_{\text{prot}} = V_{\text{modelo}}^2 / g \times L_{\text{modelo}} \quad 8.10$$

despejando se obtiene la longitud del modelo, dato que nos hace falta,

$$L_{\text{modelo}} = V_{\text{modelo}}^2 / g Fr_{\text{prot}} = [(2gH)^{1/2}]^2 / g Fr_{\text{prot}} = 2H / Fr_{\text{prot}} \quad 8.11$$

Introduciendo valores a la ecuación anterior,

$$L_{\text{modelo}} = (2 \times 17.93 \times 10^{-2} [\text{m}]) / (0.5176) = 0.6928 \text{ m} \quad 8.12$$

Por último se evalúa el factor de escalas respecto a la longitud y profundidad del modelo,

$$L_{\text{prot}} / L_{\text{modelo}} = 0.386 \text{ [m]} / 0.6928 \text{ [m]} = 0.5571$$

8 13

$$H_{\text{prot}} / H_{\text{modelo}} = 0.1 \text{ [m]} / 0.1793 \text{ [m]} = 0.5577$$

A manera de conseguir fundamentar la evaluación del prototipo [llamado 1] se cita a continuación la semejanza de escalas con respecto a un modelo de colada continua [llamado 2] para acero desarrollado por Sinhay y colaboradores [64]

$$L_{\text{modelo1}} / L_{\text{modelo2}} = 0.386 \text{ [m]} / 0.75 \text{ [m]} = 0.5147$$

$$H_{\text{modelo1}} / H_{\text{modelo2}} = 0.1 \text{ [m]} / 0.18 \text{ [m]} = 0.5688$$

$$D_{\text{modelo1}} / D_{\text{modelo2}} = 0.007653 / 0.0174 = 0.434$$

**Toma de decisión** Por lo tanto, se aprueba el modelo propuesto por Sinhay y colaboradores [64] en base a que presenta similitud en los factores de Número de Reynolds, Número de Froude así como similitud geométrica. Fundamentados en estos resultados se nota que este modelo hidrodinámico es aplicable al prototipo real para la optimización de la separación de inclusiones no metálicas. Debido a tal circunstancia se presentan los resultados y características del modelo experimental llevado a cabo por Sinhay y Colaboradores [64] en el Apéndice C.2. las medidas finales del tundish detallado en el Plano Uno son aproximadas a las propuestas y la colocación del dique es acorde con la escala del prototipo propuesto y su ubicación se muestra en el Plano Tres.

### **8.1.5.- ESPESOR DE LA CHAPA Y DESARROLLO DE LOS RECIPIENTES.**

**Planteamiento:** Se requiere determinar el espesor adecuado de la chapa/lamina tal que soporte los esfuerzos provocados durante la operación

**Toma de decisión.** Para nuestro caso el espesor de la chapa no importa mucho puesto que los esfuerzos que debe soportar son pequeños dado que el peso que soportan es ligero y bajo la consideración de que las dilataciones que sufren los recipientes no son importantes, por lo tanto dicho aspecto se dejara a criterio de los fabricantes. El método de soldadura es más importante e igualmente se deja a criterio de la experiencia

**Planteamiento.** Determinar las variables de trazo para desarrollo de una artesa para del tundish y de una virola cónica para la cuchara. Se deberá tomar en consideración que el espesor de la chapa es pequeño. Así mismo se debe prever la colocación de asas para la transportación de los recipientes así como la colocación de tapas en las cabinas evitando que el vapor del zinc tenga contacto con las resistencias. Para la cuchara se escoge una lámina calibre 18 cuyas dimensiones finales son (revisar el Plano Número ocho que tiene el desarrollo de los recipientes)

$$d_1 = 19.73 \text{ cm} = 0.1973 \text{ m}$$

$$d_2 = 24.1 \text{ cm} = 0.241 \text{ m}$$

$$d_m = (d_1 - d_2) / 2 = 0.02185 \text{ m} \quad H = 30.8 \text{ cm} = 0.308 \text{ m}$$

$$e = 1 \text{ mm} = 0.001 \text{ m}$$

Usando las ecuaciones presentadas en el Subcapítulo 5.4.2,

$$\operatorname{tg}(\alpha/2) = d_2 - d_1 / 2h = (0.241 - 0.1973) / 2(0.308) = 0.07094 \quad 8.15a$$

$$\alpha/2 = \operatorname{tg}^{-1}(0.07094) = 4.0578^\circ \quad 8.15b$$

$$h_2 = hd_2 / (d_m) = (0.508)(0.241) / (0.241 - 0.1973) = 1.6985 \text{ m} \quad 8.15c$$

$$h_1 = h_2 - h = 1.6985 - 0.308 = 1.3906 \text{ m} \quad 8.15d$$

$$d_{1m} = d_1 + e = 0.1973 + 0.001 = 0.1974 \text{ m} \quad 8.15e$$

$$d_{2m} = d_2 + e = 0.241 + 0.001 = 0.2411 \text{ m} \quad 8.15f$$

$$g_1 = g_2 d_{1m} / (d_1 - d_2) = (0.3072)(0.1974) / (0.241 - 0.1973) = 1.3878 \quad 8.15g$$

$$g_2 = [h_2 + d_m^2 / 2]^{1/2} = [(0.308)^2 + (0.02185)^2]^{1/2} = 0.3072 \text{ m} \quad 8.15h$$

$$h_3 = e / 2 \operatorname{sen}(\alpha/2) = (0.001) / 2 \operatorname{sen}(4.0578^\circ) = 0.000706 \text{ m} \quad 8.15i$$

$$C = e / \operatorname{cot}(\alpha/2) = (0.001) / 2 \operatorname{cot}(4.0578^\circ) = 0.000035 \text{ m} \quad 8.15j$$

$$R = g_1 + g_2 = 1.3878 + 0.3072 = 1.695 \text{ m} \quad 8.15k$$

Posteriormente se determinan las dimensiones de la lamina,

$$S_1 = \pi d_m = (3.1415)(0.1974) = 0.6201 \text{ m} \quad 8.15l$$

$$S_2 = \pi d_m = (3.1415)(0.2411) = 0.7574 \text{ m} \quad 8.15k$$

$$C_1 = 2g_1 \operatorname{sen}(\beta/2) = 2(1.3878) \operatorname{sen}(25.6035 / 2) = 0.6150 \text{ m} \quad 8.15l$$

$$C_2 = 2R \operatorname{sen}(\beta/2) = 2(1.695) \operatorname{sen}(25.6035 / 2) = 0.75115 \text{ m} \quad 8.15m$$

$$f_1 = g_1 [1 - \cos(\beta/2)] = (1.3878) [1 - \cos(25.604 / 2)] = 0.03449 \text{ m} \quad 8.15n$$

$$f_2 = R [1 - \cos(\beta/2)] = (1.695) \cos(25.604 / 2) = 0.04213 \text{ m} \quad 8.15o$$

$$H = g_2 + f_1 = 0.3072 + 0.03449 = 0.34169 \text{ m} \quad 8.15p$$

$$P = H - f_2 = 0.3079 + 0.04213 = 0.35003 \text{ m} \quad 8.15q$$



Las medidas finales del desarrollo de los recipientes se muestran en Plano Ocho

## **8.2.- DESARROLLO DEL SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA**

Una vez que el metal fundido es vaciado en la cuchara desde ese momento empieza a perder calor, ya sea por que se acumula en las paredes de los recipientes o debido simplemente a que el aire ambiente esta mas frio. En vista de esto es necesario dar un precalentamiento a los recipientes con la finalidad de disminuir el gradiente de temperatura entre el metal fundido y las paredes, o bien con el aire interior. La condición más importante es que el metal se encuentra alojado a una temperatura de 600 °C. Tomando en cuenta este valor se propone que antes de iniciar la colada el gradiente de temperatura de la cuchara sea de 75°C y el del tundish de 50°C es decir, que en el primer caso la temperatura en el recinto de la cabina de la cuchara se encuentre a 525°C y en el tundish a 550°C. Otro dato importante es que el tiempo de operación es de aproximadamente 1100 segundos. Así, la secuencia logica para determinar las características de los elementos de calefacción necesarios para conseguir dicho precalentamiento se lleva a cabo mediante el desarrollo de cálculos de transferencia de calor como sigue:

- A) Determinar las interacciones de calor en los recipientes
- B) Determinar las interacciones de calor de la cabina
- C) Hacer un balance de energía del sistema
- D) Determinar las características de los elementos de calefacción y distribución

### **8.2.1.- INTERACCIONES DE CALOR EN LOS RECIPIENTES.**

El calor fluye desde el centro del liquido fundido hacia las paredes de los recipientes los cuales presentan cierta resistencia a que el calor se pierda en el medio exterior, así la primera resistencia que se presenta es aquella que se presenta por convección entre las paredes de los recipientes y posteriormente se determina el valor el espesor adecuado de refractario en las paredes de los recipientes y por consiguiente las resistencias por conducción. Tales resistencias térmicas son ordenadas en su conjunto para determinar el flujo de calor a través de la superficie en cuestión, como ultimo paso se evalúa el comportamiento del sistema propuesto en su conjunto en estado transitorio. Esto se puede resumir en los siguientes pasos.

- A). - Determinación de los coeficientes de convección en las paredes
- B). - Determinación de flujo de calor en la superficie

C).- Determinación del espesor adecuado de aislamientos

D).- Determinación del flujo de calor a través de las paredes.

E).- Evaluación del sistema en estado transitorio

### 8.2.1.1.- COEFICIENTES DE CONVECCION EN LAS PAREDES.

Existen zonas fácilmente identificables donde sucede esto. Las paredes de los contenedores y la superficie del metal. A continuación se desarrollan los cálculos para ambos recipientes.

Un valor muy importante que no varía es la viscosidad cinemática del metal

$$\nu = \mu / \rho = 2.0 \times 10^{-4} \text{ Kg/m}^2 \text{ s} / (5400 \text{ kg/m}^3) = 0.333 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad 6.9a$$

Suponga que la diferencia de temperatura que se presenta en la capa laminar es de 10°C, o sea que la pared del recipiente se encuentra a 590°C. La difusividad viene dada como,

$$\alpha = k/\rho C_p = (70 \text{ W/m}^2\text{K}) / (5400 \text{ kg/m}^3)(0.320 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{K}) = 0.405 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad 6.9a$$

Otro valor importante es el número de Prandtl.

$$\text{Prandtl} = \nu/\alpha = (0.333 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}) / (0.405 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}) = 0.822 \quad 6.9$$

La pared de estudio está en contacto con metal fundido a 600°C. La temperatura media que se presenta entre el recipiente y el metal es aproximadamente de 575°C, de lo que se obtiene el valor de la difusividad térmica. Seguido se ven ambos recipientes.

#### 8.2.1.1.1.- Cuchara

- Paredes laterales.

La longitud característica según Karlekar [59].

$$L = H = 0.077 \text{ m} \quad (\text{Cilindro de paredes laterales}) \quad \text{T. XII}$$

Valor obtenido en el subcapítulo 8.1.3

$$\text{Gr} = (9.81 \text{ m/s}^2) (0.00118 \text{ }^\circ\text{K}^{-1})(10 \text{ }^\circ\text{K}) (0.077 \text{ m})^3 / (0.333 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})^2 = 4.76 \times 10^8 \quad 6.11a$$

$$\text{Ra} = (4.76 \times 10^8) (0.822) = 3.91 \times 10^7 \quad 6.12a$$

Tomando los datos de la Tabla XI:  $Nu = 0.59Ra^{1/4}$

$$Nu = (0.59) (5.72 \times 10^6)^{1/4} = 82.97 \quad \text{T. XI}$$

$$h = (82.97) (70 \text{ W/m}^2\text{K}) / (0.077 \text{ m}) = 75.43 \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{K} \quad \text{6.13a}$$

• **Superficie del fondo**

La longitud característica es:

$$L_c = D/4 = (0.272 \text{ m}) / (4) = 0.06975 \text{ m} \text{ [Placa plana con cara caliente hacia arriba]} \quad \text{T. XII}$$

$$Gr = (9.81 \text{ m/s}^2) (0.00118 \text{ }^\circ\text{K}^{-1})(10 \text{ }^\circ\text{K}) (0.0697 \text{ m})^3 / (0.33 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})^2 = 3.53 \times 10^6 \quad \text{6.11b}$$

$$Ra = (3.539 \times 10^6) (0.822) = 2.909 \times 10^6 \quad \text{6.12b}$$

Tomando los datos de la Tabla XI:  $Nu = 0.54Ra^{1/4}$

$$Nu = (0.54) (2.909 \times 10^6)^{1/4} = 70.52 \quad \text{T. XI}$$

$$h = (70.52) (70 \text{ W/m}^2\text{K}) / (0.06975 \text{ m}) = 70.77 \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{K} \quad \text{6.13b}$$

**8.2.1.1.2- Tundish.**

El tundish se puede dividir en dos partes, las placas verticales laterales y la superficie del fondo. La constante de linealidad viene dada por,

$$\beta = 1 / (273 + 575^\circ\text{K}) = 1.179 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$$

• **Paredes laterales.**

La dimensión característica es

$$L_c = 0.1 \text{ m}$$

$$Gr = (9.81 \text{ m/s}^2) (0.00179 \text{ }^\circ\text{K}^{-1})(10 \text{ }^\circ\text{K}) (0.1 \text{ m})^3 / (0.333 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})^2 = 1.583 \times 10^9 \quad \text{6.11c}$$

$$Ra = (1.583 \times 10^9) (0.822) = 1.301 \times 10^9 \quad \text{6.12c}$$

Tomando los datos de la Tabla XI:  $Nu = 0.59Ra^{1/4}$

$$Nu = (0.59) (1.301 \times 10^9)^{1/4} = 112.05 \quad \text{T. XVI}$$

$$h = (112.05) (70 \text{ W/m}^2\text{K}) / (0.1 \text{ m}) = 78.4 \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{K} \quad \text{6.13c}$$

- **Superficie del fondo**

La dimensión característica tomando los promedios de la sección inferior y superior del recipiente viene dada por

$$L_c = (Lxa) / (L + a) = (0.376 \times 0.117 \text{ m}^2) / (0.376 + 0.117 \text{ m}) = 0.0892 \text{ m}$$

(Superficie del fondo o placa plana horizontal)

$$Gr = (9.81 \text{ m/s}^2) (0.0018 \text{ }^\circ\text{K}^{-1})(10 \text{ }^\circ\text{C}) (0.0892 \text{ m})^3 / (0.333 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})^2 = 1.11 \times 10^9 \quad 6.11d$$

$$Ra = (1.11 \times 10^9) (0.822) = 9.12 \times 10^8 \quad 6.12b$$

Tomando los datos de la Tabla XI:  $Nu = 0.54 Ra^{1/4}$

$$Nu = (0.54) (9.12 \times 10^8)^{1/4} = 93.85 \quad T. XI$$

$$h = (93.85) (70 \text{ W/m}^\circ\text{K}) / (0.0892 \text{ m}) = 73.65 \times 10^3 \text{ W/m}^\circ\text{K} \quad 6.13d$$

### 8.2.1.1.2.- Paredes exteriores.

Las longitudes características se determinan aumentando seis centímetros para el diámetro de la cuchara y tres centímetros para la altura compensando en ambos casos el aumento por el espesor de las capas que se añaden a las paredes. Consultando el Apéndice B.10 se tiene que el número de Prandtl del aire a una temperatura de 800 °K (525°C) es de 0.689 y una conductividad térmica de 0.05779 W/m°K y el coeficiente de expansión térmica esta dado como

$$\beta = 1 / (273 + 525^\circ\text{K}) = 1.253 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$$

En base a esto se llevan a cabo los cálculos.

#### 8.2.1.1.2.1- Cuchara.

- **Paredes laterales.**

La dimensión característica aumentando tres centímetros en la altura es

$$L_c = 0.1 \text{ m}$$

$$Gr = (9.81 \text{ m/s}^2) (0.00125 \text{ }^\circ\text{K}^{-1})(10 \text{ }^\circ\text{K}) (0.1 \text{ m})^3 / (82.29 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})^2 = 1.8152 \times 10^4 \quad 6.11a$$

$$Ra = (1.81 \times 10^4) (0.689) = 1.25 \times 10^4 \quad 6.12a$$

Tomando los datos de la Tabla XI:  $Nu = 0.59 Ra^{1/4}$

$$Nu = (0.59) (1.25 \times 10^4)^{1/4} = 6.2393$$

T. XI

$$h = (6.239) (0.05779 \text{ W/m}^2\text{K}) / (0.1 \text{ m}) = 3.6 \text{ W/m}^2\text{K}$$

6.13a

- **Pared del fondo.**

La dimensión característica aumentando seis centímetros al diámetro es:

$$L_c = 0.332 \text{ m} / 4 = 0.083$$

$$Gr = (9.81 \text{ m/s}^2) (0.00125 \text{ }^\circ\text{K}^{-1})(10 \text{ }^\circ\text{K}) (0.083 \text{ m})^3 / (82.29 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^2) = 1.815 \times 10^4 \quad 6.11a$$

$$Ra = (1.81 \times 10^4) (0.689) = 1.25 \times 10^4 \quad 6.12a$$

Tomando los datos de la Tabla XI:  $Nu = 0.59 Ra^{1/4}$

$$Nu = (0.59) (1.25 \times 10^4)^{1/4} = 6.239$$

T. XI

$$h = (6.239) (0.05779 \text{ W/m}^2\text{K}) / (0.083 \text{ m}) = 4.19 \text{ W/m}^2\text{K}$$

6.13a

### 8.2.1.1.2.2- Tundish.

Como de costumbre se tienen dos zonas:

- **Paredes laterales.**

La dimensión característica aumentando tres centímetros en la altura es:

$$L_c = 0.13 \text{ m}$$

$$Gr = (9.81 \text{ m/s}^2) (0.00125 \text{ }^\circ\text{K}^{-1})(10 \text{ }^\circ\text{K}) (0.13 \text{ m})^3 / (82.29 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^2) = 3.988 \times 10^4 \quad 6.11a$$

$$Ra = (3.988 \times 10^4) (0.689) = 2.74 \times 10^4 \quad 6.12a$$

Tomando los datos de la Tabla XI:  $Nu = 0.59 Ra^{1/4}$

$$Nu = (0.59) (2.74 \times 10^4)^{1/4} = 7.596$$

T. XI

$$h = (7.596) (0.05779 \text{ W/m}^2\text{K}) / (0.13 \text{ m}) = 3.37 \text{ W/m}^2\text{K}$$

6.13a

- **Pared del fondo.**

La dimensión característica aumentando tres centímetros en ambos lados es:

$$L_r = (0.436 \times 0.177 \text{ m}^2)(0.436 + 0.177 \text{ m}) = 0.0473 \text{ m}$$

$$Gr = (9.81 \text{ m/s}^2)(0.00125 \text{ }^\circ\text{K}^{-1})(10 \text{ }^\circ\text{K})(0.0473 \text{ m})^3 / (82.29 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^2) = 1.92 \times 10^3 \quad 6.11a$$

$$Ra = (1.92 \times 10^3)(0.689) = 1.32 \times 10^3 \quad 6.12a$$

Tomando los datos de la Tabla XI:  $Nu = 0.59 Ra^{1/4}$

$$Nu = (0.59)(1.32 \times 10^3)^{1/4} = 3.25 \quad T. XI$$

$$h = (3.25)(0.05779 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{K}) / (0.0473 \text{ m}) = 3.97 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{K} \quad 6.13a$$

### 8.2.1.2.- FLUJO DE CALOR EN LA SUPERFICIE.

La otra interacción del metal se lleva a cabo en su superficie lo cual es de dos formas: (a) Convección en la cual el número de Prandtl del aire es de 0.689 a una temperatura de 700°K y (b) Radiación en la cual es de mayor interés el valor de la emisividad del metal que se tomará de 0.11 parecido al del aluminio sin oxidar [59]. A continuación se presenta el flujo de calor unitario para cada caso

#### 8.2.1.2.1.- Cuchara.

Considere un gradiente de temperatura de 75°K

##### • Convección.

Considere que la superficie del metal es una placa plana horizontal con la cara caliente hacia arriba y también que el fluido circundante es aire a una temperatura de 525°K y con un número de Prandtl de  $82.29 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^2$  (Tabla del Apéndice B.10) y su conductividad térmica es de  $0.05779 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{K}$  (Tabla del Apéndice B.11)

$$Gr = (9.81 \text{ m/s}^2)(0.00125 \text{ }^\circ\text{K}^{-1})(75 \text{ }^\circ\text{K})(0.06975 \text{ m})^3 / (82.29 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^2) = 4.6 \times 10^4 \quad 6.11d$$

$$Ra = (4.6 \times 10^4)(0.689) = 2.87 \times 10^4 \quad 6.12b$$

Tomando los datos de la Tabla XI:  $Nu = 0.54 Ra^{1/4}$

$$Nu = (0.54)(2.87 \times 10^4)^{1/4} = 7.03 \quad T. XI$$

$$h = (7.03)(0.05779 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{K}) / (0.06975 \text{ m}) = 5.623 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{K} \quad 6.13d$$

$$\dot{Q} = (5.623 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{K})(0.064 \text{ m}^2)(75 \text{ }^\circ\text{K}) = 26.99 \text{ W} \quad 6.8a$$

• **Radiación.**

El flujo de calor se obtiene directamente por medio de la fórmula

$$Q = (0.11) (5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4) (0.064 \text{ m}^2)(75 \text{ }^\circ\text{C})^4 = 0.01263 \text{ W} \quad 6.15b$$

**8.2.1.2.2.- Tundish.**

Considere un gradiente de temperatura de 50°C

**Convección.**

Se toman las mismas consideraciones que para la cuchara, sólo que se tiene diferente longitud característica.

$$Gr = (9.81 \text{ m/s}^2) (0.00125 \text{ }^\circ\text{K}^1) (50 \text{ }^\circ\text{C}) (0.0892 \text{ m})^3 / (82.29 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})^2 = 9.66 \times 10^4 \quad 6.11d$$

$$Ra = (9.66 \times 10^4) (0.689) = 6.65 \times 10^4 \quad 6.12b$$

Tomando los datos de la Tabla XI  $Nu = 0.54 Ra^{1/4}$

$$Nu = (0.54) (6.65 \times 10^4)^{1/4} = 8.673 \quad T. XI$$

$$h = (8.673) (0.05779 \text{ W/m}^2\text{K}) / (0.0892 \text{ m}) = 5.619 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad 6.13d$$

El flujo de calor vendrá dado por

$$Q = (5.619 \text{ W/m}^2\text{K})(0.04427 \text{ m}^2) (50^\circ\text{C}) = 12.43 \text{ W} \quad 6.8a$$

• **Radiación.**

El flujo de calor se obtiene directamente por medio de la fórmula

$$Q = (0.11) (5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4) (0.04427 \text{ m}^2)(50^\circ\text{C})^4 = 0.001725 \text{ W} \quad 6.15b$$

**8.2.1.3.- ESPESORES DE LOS AISLAMIENTOS.**

La siguiente acción a realizar será optimizar el espesor óptimo de las paredes consiguiendo con ello ahorro de energía y reducción de pérdidas de calor en base a los gradientes de temperatura propuestos. El primer material de aislamiento en los recipientes es simultáneamente el revestimiento. Al respecto se escoge el Alkoton 800. De este material se espera un desempeño bueno por lo siguiente, casi no sufre dilatación a los 600°C lo cual lo hace inmune a cualquier generación de esfuerzos, y por si fuera poco tiene una porosidad aparente de 20.0, parecida a aquella de los refractarios vaciados de magnesita que se usan en los hornos de refinamiento de acero que es 17.5

a 1000°C, en cuyo caso debe existir un deterioro mínimo [72]. Además, se puede secar a una temperatura de 150°C y por consiguiente en el mismo recinto del sistema de calefacción. Pese a sus características tan valiosas de alta densificación esto hace que tenga conductividad térmica alta y por ello es necesario colocar una capa de material más aislante. El material que se escoge al respecto es el RM 22 LW (Aislakon) constituido de alta alúmina expansionada y tiene la ventaja de que para su operación basta secarlo a una temperatura de 105°C. Los datos otorgados por los fabricantes se presentan en el Apéndice B.1. y en los Planos Seis y Cinco se aprecia un detalle de la forma propuesta.

• **Revestimiento.**

Considérese el espesor de revestimiento óptimo tomando en cuenta el coeficiente convectivo del metal.

$$r_{c,m} = (70 \text{ W/m}^2\text{K}) / (73.1 \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{K}) = 0.00095 \text{ m} \approx 0.9 \text{ mm} \quad 6.27a$$

• **Aislamiento.**

Entonces, el radio crítico viene dado como:

$$r_{c,m} = (0.2771 \text{ W/m}^2\text{K}) / (3.89 \text{ W/m}^2\text{K}) = 0.0711 \text{ m} = 7.1 \text{ cm} \quad 6.27b$$

Ya que el aislamiento es poroso será útil saber si puede resistir la carga a la que esta sujeta. Como sabemos la carga es el revestimiento y el metal fundido (se tomará para la cuchara por tener mayor altura.)

$$P_1 = (\rho g H)_{\text{revest}} = (5400 \text{ kg/m}^3) \times (9.81 \text{ m/s}^2) (0.2 \text{ m}) = 10.59 \text{ KPa} \quad 5.31b$$

$$P_2 = (\rho g H)_{\text{metal}} = (5400 \text{ kg/m}^3) \times (9.81 \text{ m/s}^2) (0.2 \text{ m}) = 10.59 \text{ KPa} \quad 5.31c$$

Sumando ambas presiones se tiene  $20 \times 10^3$  Pascales que equivalen a 0.2 Kilogramos por centímetro cuadrado, lo cual es irrisorio al respecto si se comparan los valores de la Tabla del Apéndice A.1.

### 8.2.1.4.- FLUJO DE CALOR A TRAVES DE LAS PAREDES.

Para llevar a cabo esto se toma una analogía de un circuito eléctrico y uno térmico en el cual las resistencias colocadas en el circuito son térmicas siguiendo la analogía con la ley de ohm  $V = RI$  se hace  $Q = (R)(\Delta T)$  (denotadas por las fórmulas 6.6a y b). Las medidas para desarrollar los cálculos se muestran en la Tabla del Apéndice B.1. y adicionalmente será necesario determinar el área que ocupa cada pared lo cual se resume en el Apéndice B.2). Como de costumbre esto se hace para ambos recipientes.

#### 8.2.1.4.1.- Cuchara.



Se dividirán los cálculos en dos secciones, paredes laterales y fondo:

• **Paredes laterales.**

$$R_{CL} = \frac{1}{897 \times 10^3 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}} + \frac{1}{128 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}} + \frac{2\pi(0.077 \text{ m})L \left( \frac{0.1444 \text{ m}}{0.1344 \text{ m}} \right)}{2\pi(0.077 \text{ m})L \left( \frac{0.1644 \text{ m}}{0.1444 \text{ m}} \right)} + \frac{1}{1928 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}} \quad 6.6a$$

$$1/R_{CL} = 0.0000132 + 0.0356 + 0.22655 + 0.2777 = 0.5399 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

$$R_{CL} = 1.852 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

El flujo de calor unitario con un gradiente de temperatura de 75°C y el área lateral es de 0.675 m<sup>2</sup> según la **Tabla XVI** queda como sigue.

$$Q_{\text{cuchara}} = (1.852 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K})(75^\circ\text{C})(0.064 \text{ m}^2) = 8.889 \text{ [W]}$$

• **Superficie del fondo.**

$$R_{CF} = \frac{1}{85.41 \times 10^3 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}} + \frac{1}{128 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}} + \frac{0.01 \text{ m}}{0.277 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}} + \frac{0.02 \text{ m}}{16.57 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}} \quad 6.6b$$

$$1/R_{CF} = 0.00001413 + 0.0078 + 0.0722 + 0.2386 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} = 0.3186 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

$$R_{CF} = 3.1379 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

El flujo de calor unitario con un gradiente de temperatura de 75°C y el área lateral es de 0.675 m<sup>2</sup> según la **Tabla XVI** queda como sigue.

$$Q_{\text{cuchara}} = (3.1379 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K})(75^\circ\text{C})(0.064 \text{ m}^2) = 15.06 \text{ [W]}$$

**8.2.1.4.2.- Tundish.**

En este caso se llevara a cabo para las paredes laterales y el fondo.

• **Paredes laterales.**

$$R_{TL} = \frac{1}{132 \times 10^3 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}} + \frac{1}{128 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}} + \frac{0.01 \text{ m}}{0.277 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}} + \frac{1}{4.36 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}} \quad 6.6c$$

$$1/R_{TL} = 0.00001275 + 0.0078 + 0.0722 + 0.2967 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} = 0.3767 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

$$R_{Ti} = 2.654 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

Ejemplo: Se tiene un gradiente de temperatura en las paredes de 100°C y el área lateral es de 0.076 m<sup>2</sup> para las paredes grandes y de 0.025 m<sup>2</sup> para las paredes chicas según el Apéndice B.2. Determine el flujo de calor total para una pared en cada caso.

$$Q = (R_{Ti})(\Delta T)(A) = (2.654 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C})(100 \text{ °C})(0.025 \text{ m}^2) = 6.635 \text{ W [Pared chica]}$$

$$Q = (R_{Ti})(\Delta T)(A) = (2.654 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C})(100 \text{ °C})(0.076 \text{ m}^2) = 20.17 \text{ W [Pared grande]}$$

- Superficie del fondo.

$$R_{TF} = \frac{1}{130.8 \times 10^3 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}} + \frac{1}{128 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}} + \frac{0.01 \text{ m}}{0.277 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}} + \frac{0.02 \text{ m}}{4.36 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}} \quad 6.6d$$

$$1/R_{Ti} = 0.00001358 + 0.00078 + 0.0722 + 0.2967 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} = 0.2973 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

$$R_{Tcf} = 3.37 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

Ejemplo: Se tiene un gradiente de temperatura en las paredes de 100°C y el área lateral es de 0.675 m<sup>2</sup> según la Tabla XVI. Determine el flujo de calor total

$$Q = (R_{Ti})(\Delta T) = (3.37 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C})(100 \text{ °C})(0.0442 \text{ m}^2) = 14.895 \text{ W}$$

### 8.2.1.5.- EXAMEN DE ESTADO TRANSITORIO DEL METAL.

A partir que el metal se aloja en los contenedores empieza a perder calor desde el centro hacia afuera según lo visto en el Subcapítulo 6.1.2.1.2. Por ello es que a continuación se hace una estimación de la temperatura en la superficie y en las paredes en estado transitorio. En la Fig. 49, se muestra esta situación junto con las variables que intervienen. Cabe aclarar que la temperatura que se estima del metal es de "bulto" o en otras palabras representa a tomo el cuerpo. Así mismo, supóngase que el centro del metal se encuentra a 600 °C. Seguido pasamos a realizar los cálculos para ambos recipientes, tomando como ejemplo un tiempo de residencia de 588 segundos (9 minutos 48 segundos) y que las paredes están compuestas únicamente de Alkotón 800. La primera labor consistirá en determinar la masa de los materiales, lo cual se muestra en la Tabla del Apéndice B.2

#### 8.2.1.5.1.- Cuchara.

La solución de una expresión que muestre el perfil de temperaturas requiere la determinación de los siguientes coeficientes como ya se vio,

$$1 \quad \frac{(654 \times 10^3)(0.0468)}{(24)(0.382)(1000)} + \frac{(654 \times 10^3)(0.0468)}{(6.24)(0.88)(1000)} + \frac{(17.23)(0.0952)}{(6.24)(0.88)(1000)} \quad 6.20a1$$

$$C_1 = 0.373 + 0.623 + 0.0000675 = 0.99606 \text{ [s}^{-1}\text{]}$$

$$C_2 = (0.373)(0.0000675) = 0.002517 \times 10^{-3} \text{ [s}^{-1}\text{]} \quad 6.20b2$$

$$m_1 = \frac{-8.912 + \left\{ (8.912)^2 - 4(2.662 \times 10^{-3}) \right\}^{1/2}}{2} \quad 6.22a1$$

$$m_1 = -2.9872 \times 10^{-4}$$

$$m_2 = \frac{-8.912 - \left\{ (8.912)^2 - 4(2.662 \times 10^{-3}) \right\}^{1/2}}{2} \quad 6.22b2$$

$$m_2 = -8.9117$$

$$A = \frac{-8.9117}{-8.9117 + 2.9872 \times 10^{-4}} = 100003 \quad 6.23a1$$

$$B = \frac{-2.9872 \times 10^{-4}}{-8.9117 + 2.9872 \times 10^{-4}} = 3.35211 \times 10^{-5} \quad 6.23b1$$

$$\frac{T_a - T_\infty}{T_i - T_\infty} = (1.00) \left( e^{-2.9872 \times 10^{-4} (t)} + 3.352 \times 10^{-5} e^{-8.9117 (t)} \right) \quad 6.24a$$

Ejemplo: Sea  $\Delta T = 575^\circ\text{C}$ ,  $T_\infty = 25^\circ\text{C}$ . Aplicando la ecuación anterior:

$$\frac{T_a - 25^\circ\text{C}}{475^\circ\text{C}} = (1.00) \left( e^{-2.9872 \times 10^{-4} (150)} + 3.352 \times 10^{-5} e^{-8.9117 (150)} \right) = 0.98517$$

Despejando,

$$T_a = (0.98517)(575) + 25^\circ\text{C} = 591.476^\circ\text{C}$$

En la **Tabla XXII (a)** del **Apéndice B.3** se muestran los resultados obtenidos del comportamiento de la temperatura de bulbo en función del tiempo en la cuchara.

8.2.1.5.2.- *Tundish.*

Siguiendo los mismos pasos que antes:

$$C_1 = \frac{(210 \times 10^3)(1508 \times 10^{-2})}{(24)(0.382)(1000)} + \frac{(210 \times 10^3)(1508 \times 10^{-2})}{(45264)(0.88)(1000)} + \frac{(45758)(9757 \times 10^{-2})}{(45264)(0.88)(1000)} \quad 6.20a2$$

$$C_1 = 0.12513 + 0.000288 + 0.000089 = 0.1255 \text{ [s}^{-1}\text{]}$$

$$c2 = (0.12513)(0.000089) = 0.00001113 \text{ [s}^{-1}\text{]} \quad 6.20b2$$

$$m_1 = \frac{-1.1412 + \left[ (1.1412)^2 - 4(0.0387 \times 10^{-3}) \right]^{1/2}}{2} \quad 6.22a2$$

$$m_1 = -2.9872 \times 10^{-4}$$

$$m_2 = \frac{-1.1412 - 1.14113}{2} \quad 6.22b2$$

$$m_2 = -8.9117$$

$$A = \frac{-1.14166}{-1.14166 + 0.055744 \times 10^{-4}} = 0.99995 \quad 6.23a2$$

$$B = \frac{-0.5544 \times 10^{-4}}{-1.14166 + 0.5544 \times 10^{-4}} = 3.35211 \times 10^{-5} \quad 6.23b2$$

$$\frac{T_a - T_\infty}{T_i - T_\infty} = (0.999951) \left( e^{-0.55744 \times 10^{-4} (t)} + 0.55744 \times 10^{-5} e^{-1.14166 (t)} \right)$$

Ejemplo: Sea  $\Delta T = 95^\circ\text{C}$ ,  $T_m = 500^\circ\text{C}$ .

$$\frac{T_a - 500^\circ\text{C}}{95^\circ\text{C}} = (0.999951) \left( e^{0.5574 \times 10^{-4} (50)} + 0.972452 \right)$$

$$T_a = (0.972452)(95) + 500^\circ\text{C} = 592.383^\circ\text{C}$$

## **8.2.2.- COEFICIENTES DE CONVECCION EN LAS PAREDES DE LA CABINA.**

En este punto se empiezan a relacionar todos los elementos del sistema dosificador es por ello que se recomienda dar un vistazo a todos los componentes del sistema en los Planos Dos y Tres, en los cuales vienen detalladas la forma y material de las cabinas de ambos recipientes, en la descripción de las paredes de la cabina es

- **Cuchara.-** Se propone colocar una cabina de forma de prisma octagonal la cual se puede formar mediante paredes que se van uniendo, lo cual se consigue usando tablonces de fibra ceramica Este material se escoge puesto que brinda la posibilidad de obtener grandes gradientes de temperatura en sus paredes con un minimo de calor acumulado y ademas son muy faciles de acoplar. Observe que la caja de conexiones electricas debe estar estrictamente protegida y alejada lo mas posible de cualquier contacto con el metal y es deseable que se coloque un letrero con la leyenda "Precaucion, conexiones electricas" Dentro de los tablonces se deben hacer surcos (Debido a que el material al ser muy poroso permite que se hagan ranuras rapándolo) dentro de los cuales se alojen los elementos de calefaccion, mismos que deberan aportar la carga termica de precalentamiento de los recipientes Asi mismo es deseable que la temperatura exterior de las mismas sea lo mas baja posible con la finalidad de evitar quemaduras y desperdicio de calor, razon por la cual se debe jugar comunmente con ambos factores La fibra ceramica tiene gran capacidad de aislamiento a altas temperaturas pero acumula bastante calor, por lo cual se decido colocar un material con mayor capacidad de aislamiento en el exterior para lo cual se escogio la fibra o lana mineral, que tambien se expende en tablonces de diversos espesores Asi, resultado conveniente hacer un arreglo de pared compuesta en el cual la fibra ceramica alojara a las resistencias de calefaccion y la fibra mineral en el exterior El espesor escogido para el primer material fue de una pulgada y en el caso de la lana mineral fue necesario obtener el espesor optimo del revestimiento para el cual la temperatura en el exterior sea lo suficientemente fria Esto se debe a cabo proponiendo medidas su espesor y evaluando cada una de ellas mediante modelos matematicos Para ello se debera hacer la analogia electrica usada en el subcapitulo 6.1.2.1.1.2 De esta serie de ensayos-errores se obtuvo que el mejor espesor para conseguir lo pretendido es dos pulgadas (5.08 centimetros)
- **Tundish.-** Se propone colocar una cabina de forma de paralelepipedo la cual se puede formar de la misma forma y materiales escogidos para la cuchara, tanto para las resistencias como para los tablonces En el Plano Tres Se presenta la alternativa al respecto Primeramente se determina el coeficiente convectivo de transferencia de calor en el exterior e interior de la cabina

Antes de pasar a los calculos cabe hacer la aclaracion de que la lana mineral tiene una gran afinidad a la absorcion de agua Es por ello que es necesario colocar una cubierta de laminas de aluminio, este detalle se muestra especificamente en el Plano Dos lo cual tiene gran trascendencia en la colada continua en donde existe gran cantidad de vapor

producto en la zona de enfriamiento. El desarrollo de los cálculos se hará en forma simultánea para ambos recipientes y en dos partes para mejor comprensión. Primeramente se determina el coeficiente convectivo de transferencia de calor en el interior de la cabina. Para llevar a cabo esto supóngase que la temperatura de los elementos de calefacción es de 900°C.

### 8.2.2.1.- Paredes interiores.

La dimensión característica es precisamente  $\delta = 0.03$  m y también será necesaria la longitud menor del tablon, o sea 0.30 m para la cuchara y de 0.15 m para el tundish (Ver Plano 4). Así mismo consultando el Apéndice B.11 se encuentra que el aire a 1000 °K tiene viscosidad de  $117.8 \times 10^{-6}$  m/s<sup>2</sup>. Primeramente se determina el coeficiente de linealidad,

$$\beta = 1 / (712.5 \text{ °K}) = 0.001403 \text{ °K}^{-1}$$

Posteriormente se calculan los números de Grashof el cual resulta ser el mismo para ambos casos.

$$Gr = (9.81 \text{ m/s}^2)(0.0014 \text{ °K}^{-1})(900-525\text{°C}) (0.03)^3 / (117.8 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2)^2 = 8.7 \times 10^7 \quad 6.11e$$

#### • Pared de la cabina de la cuchara

$$Nu = 0.210(8.7064 \times 10^7)^{0.425}(0.3/0.03)^{0.125} = 1.7825$$

$$h = (1.7825) (0.13/0.03) = 7.724 \text{ W/m}^2\text{°K} \quad 6.13d$$

#### • Pared de la cabina del tundish.

$$Nu = 0.210(8.7 \times 10^7)^{0.425}(0.15/0.03)^{0.125} = 1.7825$$

$$h = (1.9519) (0.13/0.03) = 8.45 \text{ W/m}^2\text{°K} \quad 6.13e$$

### 8.2.2.2.- Paredes exteriores.

Para llevar a cabo los cálculos supóngase que se tiene una temperatura en la pared exterior de 60°C. Así mismo, el número de Prandtl es de 0.722 y una viscosidad de  $7.49 \times 10^{-6}$  m/s<sup>2</sup>. El coeficiente de linealidad viene dado por,

$$\beta = 1 / (50 \text{ °K}) = 0.02 \text{ °K}^{-1}$$

#### • Pared de la cabina de la cuchara.

$$Gr = (9.81 \text{ m/s}^2)(0.02 \text{ °K}^{-1})(60 - 25\text{°C}) (0.3)^3 / (7.49 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2)^2 = 3.304 \times 10^9 \quad 6.11f$$

$$Ra = (3\ 304 \times 10^9)(0\ 722) = 2.386 \times 10^9$$

6 12f

Según la Tabla XI.

$$Nu = (0\ 1) (2\ 386 \times 10^9)^{1/4} = 200\ 44$$

T.XI

$$h = (200\ 44) (0\ 045\ \text{W/m}^2) / (0\ 3\ \text{m}) = 30.06\ \text{W/m}^2 \cdot \text{K}$$

6.13f

• Pared de la cabina del tundish.

$$Gr = (9\ 81\ \text{m/s}^2)(0\ 02\ \text{K}^{-1})(60 - 25^\circ\text{C})(0\ 15)^3 / (7.49 \times 10^{-6}\ \text{m/s}^2)^2 = 4.1312 \times 10^8$$

6 11g

$$Ra = (4.1312 \times 10^8)(0\ 722) = 2\ 982 \times 10^8$$

6 12g

Según la Tabla XI.

$$Nu = (0\ 1) (2\ 982 \times 10^8)^{1/3} = 66.81$$

$$h = (66.81) (0\ 045\ \text{W/m}^2) / (0\ 15\ \text{m}) = 20.042\ \text{W/m}^2 \cdot \text{K}$$

6.13g

### 8.2.2.3.- Espesor adecuado de aislamiento.

Como se trato en el Subcapitulo 6.13. la finalidad de cualquier arreglo de paredes de aislamiento térmico es brindar la posibilidad de obtener la menor temperatura en el extremo de la superficie usando el menor espesor posible. Hemos dicho que se tiene un tablón de fibra ceramica de una pulgada el cual se considerará que opera a 600°C y en el exterior debe ir aislamiento de fibra mineral que se considera opera a 350°C. Los cálculos tendientes a la optimización del aislamiento térmico son iterativos, dado que el espesor de cada capa de aislamiento y temperatura exterior dependen de la resistencia térmica como se explica con el desarrollo de los calculos. Considere que "x" representa el espesor de el aislamiento en cuestion

• Cuchara.

Las resistencia térmica vienen dada por

$$1/R = 1/7\ 724 + 0\ 0254/0\ 130 + x/0\ 090 + 1/30\ 06\ [\text{m}^2 \cdot \text{K/W}]$$

6.6e

$$1/R = 0.128 + 0.1953 + 11.11x + 0.0332\ [\text{m}^2 \cdot \text{K/W}] = 11.11x + 0.3565$$

6.6e1

El flujo de calor a través del arreglo de capas superpuestas varia según el espesor del aislamiento.

$$q = (900 - 60^\circ\text{C})(1/11.11x + 0.3565) \text{ [W/m}^2\text{K]} \Rightarrow$$

	= 1315.18 [W/m <sup>2</sup> ] $\Rightarrow$ (1 Pulg)
	= 912.163 [W/m <sup>2</sup> ] $\Rightarrow$ (2 Pulg)
	= 698.206 [W/m <sup>2</sup> ] $\Rightarrow$ (3 Pulg)
	= 565.55 [W/m <sup>2</sup> ] (4 Pulg)

El perfil de temperaturas para cada caso queda.

$T_i = T_{\text{inter}} - q/R_{s1} = 900 - q(0.128) =$	$\Rightarrow$ = 729 °C $\Rightarrow$ (1 pulg) = 782 °C $\Rightarrow$ (2 Pulg) = 810.6 °C $\Rightarrow$ (3 Pulg) = 827.61 °C $\Rightarrow$ (4 Pulg)
$T_{s1} = T_i - q/R_1 = T_i - q(0.130) =$	$\Rightarrow$ = 558.0 °C $\Rightarrow$ (1 pulg) = 663.4 °C $\Rightarrow$ (2 Pulg) = 719.8 °C $\Rightarrow$ (3 Pulg) = 754.1 °C $\Rightarrow$ (4 Pulg)
$T_{s2} = T_i - q/R_2 = T_i - q(11.11x) =$	$\Rightarrow$ = 186.9 °C $\Rightarrow$ (1 pulg) = 148.6 °C $\Rightarrow$ (2 Pulg) = 128.7 °C $\Rightarrow$ (3 Pulg) = 115.7 °C $\Rightarrow$ (4 Pulg)

Según lo determinado anteriormente se elige un espesor del aislamiento exterior de la cabina de tres pulgadas puesto que para cuatro pulgadas la disminución de temperatura exterior no es notoria. Así mismo, al determinar el espesor también se tiene el flujo de calor unitario y por lo tanto se requiere el flujo de calor total. Primeramente para las paredes laterales.

$$Q_{CAL} = (698.2 \text{ [W/m}^2\text{]})(0.0605 \text{ m}^2) = 42.24 \text{ W}$$

y luego para las pared del fondo

$$Q_{CAL} = (698.2 \text{ [W/m}^2\text{]})(0.3025 \text{ m}^2) = 211.2 \text{ W}$$

• Tundish

Las resistencias térmicas vienen dadas por

$$1/R = 1/8.45 + 0.0254/0.130 + x/0.090 + 1/20.04 \text{ [m}^2\text{K/W]} \quad 6.6f$$

$$1/R = 0.118 + 0.1953 + 11.11x + 0.049 \text{ [m}^2\text{K/W]} = 11.11x + 0.3623 \quad 6.6f1$$

Como se notara estos valores no difieren mucho de aquellos desarrollados para la cuchara por tal motivo se elige el mismo espesor para este caso (tres pulgadas). Como antes únicamente falta determinar el flujo de calor total, empecemos por las paredes laterales chicas.



$$Q_{\text{TCAL1}} = (698.2 \text{ [W/m}^2\text{)})(0.0285\text{m}^2) = 19.9 \text{ W}$$

Para las paredes anchas,

$$Q_{\text{TCAL2}} = (698.2 \text{ [W/m}^2\text{)})(0.048 \text{ m}^2) = 33.51 \text{ W}$$

y por último, para la pared del fondo:

$$Q_{\text{TCAL3}} = (698.2 \text{ [W/m}^2\text{)})(0.0608\text{m}^2) = 42.45 \text{ W}$$

### **8.2.3.- BALANCE DE ENERGIA.**

Antes de desarrollar la contabilización de las pérdidas de calor es necesario determinar los coeficientes de forma en las paredes de la cabina presentados en el subcapítulo 6.1.2.1.1.2., lo cual se llevo a cabo en la **Tabla XVI** en la cual se simplifica la realización e interpretación de los cálculos.

Posteriormente se determina el flujo de calor total para cada una de las paredes que al igual que en el caso anterior se ordenaron en la **Tabla XVII** haciendo una sumatoria de todas las interacciones de transferencia de calor. Esto servirá como punto de partida para determinar la potencia de los elementos de calefacción.

### **8.2.3.- CARACTERISTICAS DE LOS ELEMENTOS DE CALEFACCION Y DISTRIBUCION.**

La temperatura en el exterior de los recipientes servirá como punto de partida para la determinación de la cámara de calefacción, la cual tiene el propósito de aportar toda la energía que pierde el metal fundido y al mismo tiempo evitar que este escape hacia el exterior. En este caso, las resistencias irradian su calor desde la cabina de calefacción hacia el recipiente. Lo más importante al respecto será mencionar que el espacio entre los recipientes y dicha cabina es de 3 cm y que considero usar fibra ceramica de color blanco mate dado esta cualidad lo hace lo buen reflejante del calor. Asi mismo se determino que este material tiene una emisividad de 0.18 que es igual a la alumina con un tamaño de grano de 10 $\mu$ m.

Los elementos de calefacción o resistencias embobinadas se escogen en base a la recomendaciones dadas por los fabricantes las cuales se resumen en el **Apéndice B.6.** de las cuales se destaca el calibre adecuado según la cantidad de calor que se requiera para calafatear el recinto en cuestión para lo cual se adoptan los criterios de que la distancia desde los elementos de calefacción hasta el lugar el cual va ha recibir la carga de calor afecta muy poco siempre y cuando se tenga una distancia pequeña así como también que bajo tales condiciones las resistencias operarán por debajo de su temperatura máxima se operación.

Lugar	Variables Area: [mXm] Longitud [m]	Paredes	Orillas	Esquinas
		$S_w = A/L$ [m]	$S_o = 0.54L_o$ [m]	$S_e = 0.15\lambda X$ [m]
<b>CUCHARA</b>				
Paredes laterales	$A_{PL} = 0.45 \times 0.3$ = 0.136 $L = 0.1016m$ $L_o = 0.3025$ $\lambda X = 0.1016$	$S_{PL} = 0.136/0.10$ = 0.1336	$S_o = 0.54 \times 0.3025$ = 0.163	$S_e = (0.15)(0.1016)$ = 0.0152
Total: $\sum S$	$= 7(0.1336) + 14(0.163) + (14)(0.0152) = 3.43$			
	$A_{PP} = 2(0.30)(0.5)$ = 0.56 $L_o = 0.3025$ $\lambda X = 0.1016$	$S_{PP} = 0.56/0.3025$ = 1.85	$S_o = 0.54 \times 0.3025$ = 0.163	$S_e = (0.15)(0.1016)$ = 0.0152
Total: $\sum S$	$= 2(1.85) + 14(0.163) + 14(0.0152) = 6.195$			
<b>TUNDISH</b>				
Paredes laterales	$A_{PL1} = 0.19 \times 0.3$ = 0.057 $A_{PL2} = 0.39 \times 0.3$ = 0.117 $L_1 = 0.19$ $L_2 = 0.39m$ $\lambda X = 0.1016$	$S_{PL1} = 0.057/0.19$ = 0.3 $S_{PL2} = 0.117/0.39$ = 0.3	$S_{o1} = 0.54 \times 0.19$ = 0.103 $S_{o2} = 0.54 \times 0.39$ = 0.2106	$S_e = (0.15)(0.1016)$ = 0.0152
Total: $\sum S$	$= 2(0.3) + 2(0.3) + 8(0.103) + 8(0.2106) + 8(0.0152) = 3.8304$			
	$A_{PP} = 2(0.39)(0.19)$ = 0.0741	$S_{PP} = 0.117/0.039$ = 0.3	$S_{o1} = 0.54 \times 0.19$ = 0.103 $S_{o2} = 0.54 \times 0.39$ = 0.2106	$S_e = (0.15)(0.1016)$ = 0.0152
Total: $\sum S$	$= 2(0.3) + 8(0.103) + 8(0.2106) + 8(0.0152) = 3.2304$			

Tabla XV. Determinación de los factores para determinar el flujo de calor a través de las paredes.

De entre una gran variedad de materiales de cromo-niquel se escogió el comunmente llamado kantel [Ni-Cr (80-20)] cuya temperatura máxima de trabajo es de 1200°C. Así mismo se usará un voltaje de 220 Volts dado que puede dar mayores corrientes a menor costo que cuando se usa 127 volts. Partiremos de considerar la resistividad a 578°C:  $\rho = 1.08$  [ $\Omega \cdot m/mm$ ]. El único inconveniente es que se deben proteger de cualquier contacto con vapores de zinc. De tal manera de simplificar la ejecución de los cálculos estos se resumieron en la **Tabla XVII** de forma ordenada tal y como se muestran en el Subcapítulo 6.2. lo cual se puede resumir en los siguientes puntos:

1 - Determinar la carga unitaria de calefacción: Esto ya se llevo a cabo previamente en la **Tabla XVI**. Sin embargo, dado que la cantidad de calefacción es diferente para cada zona y se considera que el uso de un circuito trifásico es más conveniente para el

aprovechamiento de la energía, bajo tales condiciones este último se encontraría desequilibrado, por lo tanto se procedió a tomar la carga térmica mayor e igualar las otras restantes, así como también se trató de tomar de un 15 a un 25% mayor de potencia por criterios de seguridad

LUGAR	Cuchara	Numero de paredes	de Tundish	Número de paredes	de Cantidad Parcial
<b>Potencia perdida en los recipientes</b>					
Paredes laterales	$Q_{CL} = 89$	$X8 = 712$	$Q_{T11P} = 663$	$X2 = 133$	$X2 = 41$
			$Q_{T11A} = 2017$		
TotalXfactor =	$(712)(343) = 2442W$		TotalXFactor =	$(174)(2383) = 4146W$	
Pared del fondo	$Q_{CF} = 216$	$X1 = 216$	$Q_{T1} = 216$	$X1 = 216$	
TotalX Factor =	$(216)(6195) = 13381W$		TotalXFactor =	$(216)(323) = 698W$	
<b>Potencia perdida en la cabina</b>					
Paredes laterales	$Q_{CAL} = 424$	$X8 = 3392$	$Q_{CAT11} = 199$	$X2 = 398$	
			$Q_{CAT12} = 335$	$X2 = 670$	
TotalXfactor =	$(3392)(343) = 11634W$		TotalXFactor =	$(174)(6195) = 1078$	
Pared del fondo	$Q_{CAF} = 2112$	$X2 = 4224$	$Q_{T1} = 425$	$X2 = 850$	
TotalX Factor =	$(216)(38304) = 82736$		TotalXFactor =	$(216)(32304) = 6977$	
Potencia irradiada en la superficie		$Q_{TM} = 001$		$Q_{CH} = 001$	

Tabla XVI. Determinación de la potencia por zona que deben disipar los elementos de calefacción.

2 - Determinar el tipo de conexión y distribución de cada una de las fases del sistema trifásico. Para ello se escogió un sistema de alimentación estrella y uno delta para la conexión de las resistencias, con lo que se asegura que en cualquier caso eventual de la pérdida de cualquiera de las fases de calefacción la pérdida de la capacidad de calefacción no será más allá del 32%. Las formas de conexión y distribución adoptados se pueden revisar en el Plano doce

3 - Elegir el calibre recomendado en función de la carga térmica a aportar (Apéndice B.6) y seguido. Determinar las características eléctricas de cada una de las fases, tales como Corriente (ecuaciones 6 29 1 6 32) y resistencia

LUGAR	Carga termica Watts	VOLTAJE	I = Q/V Amperes	R = V/I ohms	$I_{\text{max}} = \sqrt{3} \Sigma I_{\text{af}}$
<b>CUCHARA</b>					
1 FASE	1408	220	6.4	34.375	
2 FASE	1408	220	6.4	34.375	
3 FASE	1408	220	6.4	34.375	
<b>TUNDISH</b>					
1 FASE	500	220	2.27	96.92	
2 FASE	500	220	2.27	96.92	11.795
3 FASE	500	220	2.27	96.92	

Tabla. XVIII. Condiciones de operación de los conductores y calefactores

RECIPIENTE	Lugar	Cantidad	Longitud Electiva	Calibre recomen- dado	Longitud del conductor	Avance (mm/Vuelta)
<b>CUCHARA</b>						
1 FASE	PAREDES LATERALES	4 PAREDES	1.21	16 (1.024 mm)	41.415	9.7
2 FASE	PAREDES LATERALES	4 PAREDES	1.21	16 (1.024 mm)	41.415	8.4
3 FASE	FONDO	1 PARED	1.03	16 (1.024 mm)	41.415	9.7
<b>TUNDISH</b>						
1 FASE	PARED LATERAL GRANDE	2 PAREDES				9.2
2 FASE	PARED LATERAL GRANDE	2 PAREDES	2.63	23 (0.574 mm)	23.02	9.2
3 FASE	PAREDES LATERALES CHICAS Y FONDO	3 PAREDES	1.51	23 (0.574 mm)	23.02	4.28

Tabla XIX. Condiciones de distribución y embobinado de los calefactores

4 - Elegir el calibre recomendado para el conductor de alimentación el cual cabe destacar que debe tener la menor tanto para el lado de alimentación como el de calefacción. Una vez que se tiene la resistencia del calefactor se procede a determinar la resistencia por unidad de longitud dada en el Apéndice mencionado. Después mediante una simple regla de tres se obtiene la longitud real del conductor.

5 - Determinar la cantidad de espacio disponible para alojar las resistencias o en otras palabras, el desarrollo que forman los surcos proyectados para el alojamiento de

resistencias. Los tabloneros destinados para este fin se muestran en los planos 4 y 5 cabe destacarse el hecho de que el desarrollo se midió directamente en la computadora

6 - Determinar el avance de los calefactores para embobinado. Se tomará el criterio de obtener el mayor avance posible de tal manera que se evite la posibilidad de que dos espiras se junten y hagan cortocircuito.

Dicho método se resume en la **Tabla VXIII** para determinar primeramente las características de operación y despues en la **Tabla XVIX** determinando la distribución de los calefactores y sus características de embobinado

### **8.2.5. PROTECCIONES, CONTROLES Y ALIMENTACION**

Dado que las resistencias eléctricas están desnudas y generan altas cantidades de calor y temperatura los sistema de conexión para su alimentación no son comunes, por ello es que tales elementos deben ser alimentados mediante un conductor que resista altas temperaturas, que evite cualquier quemadura al contacto (con la finalidad de evitar posibles incendios) y lo mas importante que tenga baja resistencia. Esto se consigue utilizando conductores revestidos de diferentes aislamientos termicos según sea la temperatura de operación a la que se destinen. Los materiales recomendados como aislantes en este caso son el asbesto (hasta 550°C) y la fibra mineral o cerámica (de 550 a 900°C). Con ello se salva cualquier posibilidad de quemadura pero falta satisfacer una baja resistencia, lo que a su vez depende del calibre del conductor y de la resistividad del material. Para ello se recomienda alto (0/3 AWG) y un material con la mitad de resistividad que el Kantal (80Ni-20Cr), que es el Copel (55Cu-45Ni) el cual resiste hasta una temperatura de 610°C y puede unirse a los elementos calefactores retorciendo las puntas de ambos. En la última columna de la **Tabla XVIII** se coloco la longitud de los conductores de alimentación en base a la ecuacion 6.34a. Los valores de resistividad de el Copel se encuentran en el **Apéndice B.6**

El cable de alimentación debera estar alojado en un tubo conduit el cual debera ser escogido para operar a una temperatura de 90°C como maximo. Asi mismo, se debera procurar que la longitud de los conductores de alimentacion sea lo menor posible para evitar una caída de voltaje demasiado grande que pueda reducir sensiblemente la potencia de alimentacion en los elementos de calefaccion. Para determinar la caída de voltaje se muestra en la **Tabla** del apéndice mencionado la resistencia de dicho conductor por cada pie (3.28 metros) de longitud. Tambien debera vigilarse que estos se mantengan alejados de cualquier cantidad de humedad y si la caja de conexiones se aloja cerca de la máquina de colada continua debera elegirse totalmente sellada para evitar la entrada de vapor de agua. En serie con los conductores de alimentación deberán conectarse los fusibles para evitar cortocircuitos, los cuales se seleccionan en función de la corriente nominal y voltaje que tiene el conductor. El diagrama electrico se presenta en el **Plano Doce**.

El sistema de control de temperatura es el único elemento que falta, el cual se colocó a grandes rasgos en el diagrama del Plano Doce. Como alternativa se propone la adquisición de una caja de control que automáticamente realice el control de la temperatura mandando una señal a un contactor trifásico. Este modo de control tiene la ventaja de que la indicación de la temperatura límite se lleva a cabo de manera muy sencilla, pero tiene la desventaja de que solo acepta la entrada de un transductor. Respecto a este último elemento, se propone la colocación de un termopar en ambos recipientes mediante los cuales se monitorea la temperatura en el espacio existente entre la cabina y el recipiente así como también la colocación de un pirómetro con forro de cerámica, el cual tiene la posibilidad de sumergirse ligeramente en el metal fundido brindando la posibilidad de obtener una medida muy aproximada. Cabe hacer la aclaración que los transductores (termopares y pirómetros) deben ser compatibles con la caja de control mencionada, para lo cual existen dos variedades "Tipo K" y Tipo "J". Además, tales elementos constan de dos conductores que dan lugar a la generación de un potencial eléctrico. Dado que la caja de control mide la resistencia del conductor del termopar es importante determinar la longitud de cualquiera de los conductores del termopar (que es igual en cada uno de ellos).

## **APARTADO QUINTO ESPECIFICACION DE LA SOLUCION**

*Ya que se tiene la solución-satisfactor del problema la siguiente tarea es detallarla de tal manera que sirva como punto de partida para la construcción, que vendría a ser la última etapa del diseño, lo cual se llevará a cabo a través de dibujos y especificaciones e instrucciones. Desgraciadamente, en la construcción siempre se presentan factores que no se tomaron en cuenta inevitablemente, por ello es que esta sección se tomara de forma preliminar y no definitiva. También se necesita impartir información a las personas encargadas de aprobar la inversión del proyecto, esto requiere de cierta presentación que haga resaltar lo que interesa al grupo y elimine los detalles técnicos que en realidad no son de su incumbencia.*

### **CAPITULO IX SOLUCION DETALLADA**

Este capítulo tiene como finalidad definir las necesidades reales del problema en función de los resultados de la evaluación hecha previamente hasta arrojar una estimación aproximada del costo del sistema. El plan para desarrollar esto es:

- A) Fabricación de la chapa.
- B) Instalación y selección de refractarios
- C) Instalación de la cabina de calefacción
- E) Recomendaciones de operación
- D) Presupuestos
- E) Planos de fabricación (Se encuentran al final del texto)

#### **9.1.- FABRICACION DE LA CHAPA.**

La primera operación para crear un recipiente metálico es hacer la chapa lo más plana posible y al mismo tiempo, tensarla lo suficiente para que se mantenga en su plano sin ninguna deformación. Tal aplanado permite que se lleve a cabo un aplanado preciso. Además, solo se deberá llevar a cabo de manera elemental ya que las irregularidades desaparecen con el curvado en el transcurso de la fabricación. Las deformaciones de las chapas pueden deberse a defectos de fabricación, manipulación o transporte [58]

Al enderezar una chapa es necesario tratar de obtener una tensión, es decir un reparto de granos, lo más homogéneo posible. Para ello se procede primeramente a identificar los defectos de la chapa. Posteriormente se dan golpes con un martillo en áreas estratégicas que eliminan combaduras, ampollas o alabeo. Ya que la chapa está totalmente plana se procede a realizar el trazo y a cizallarla para pasar a una máquina dobladora y sus características dependen de el espesor y medidas de la chapa [58]. En el **Plano Ocho** se muestra el desarrollo de los recipientes.

## **9.2.- INSTALACION Y SELECCION DE REFRACTARIOS.**

Las longitudes de tales elementos deben ir acordes con las medidas y localización y de los recipientes. Siendo este último aspecto determinado en forma interactiva haciendo el **Plano Uno**. Con lo cual se estimó sus medidas aproximadas. Tales medidas sirven como punto de partida para la fabricación de los accesorios, pero antes de pasar a esta etapa se especifican los materiales a utilizar.

### **9.2.1.- SELECCION DE MATERIALES.**

Otro aspecto importante fue determinar el espesor de los tubos o buzas sumergidas de tal forma que soporten el choque térmico ampliamente. Esta dificultad fue salvada cuando se visitó a diversos fabricantes de refractarios los cuales expenden materiales llamados "superrefractarios" lo cual tiene particular importancia al respecto puesto que son materiales que no requieren precalentamiento para soportar enormes esfuerzos por contracciones y expansiones súbitas. Aspecto que está mayormente justificado cuando son materiales usados en la industria del aluminio (los de Allugard) y en la colada continua (los de grafito) donde se presentan condiciones de abrasión y mayor temperatura que la manejada aquí. Por todo ello se propuso arbitrariamente su espesor dejándolo en consideración de la aprobación de los fabricantes con el propósito de ver la posibilidad de la aplicación de alguno de los moldes que ellos tienen desarrollados. Bajo estas consideraciones a continuación se trata cada uno de los accesorios.

#### **9.2.1.1 Tubos sumergidos.**

El material escogido para tales elementos (tanto en el tundish como en la cuchara) fue el Allugard. De este se tienen dos variedades que se escogen según el método usado para conformar la pieza. 70HS en el caso de que se desee fabricarlo extruido o bien el H&B en caso de que se desee hacer la pieza colada. Cabe aclarar de que el primer método tiene la ventaja de que brinda una mayor densificación así como la posibilidad de obtener espesores menores. Además, ambos materiales no son mojados por las escorias de aluminio y sus composiciones se presentan en la Tabla del Apéndice C 1. Como ya se



dijo su localización se encuentra en el plano Uno y sus medidas detalladas se presentan en el Plano Seis y Siete

#### **9.2.1.2.- Boquillas.**

Como ya se apuntaba para este elemento se desea obtener excepcional densificación y alta resistencia a la abrasión, para ello se escogió el Criterion 98 el cual tiene muy alta resistencia al esfuerzo. También es deseable que esta se desarrolle en forma prensada y sus medidas se encuentran el Plano 7. Cabe aclarar que la forma de la parte inferior obedece a la necesidad de acoplarla con el tubo, así como la parte superior la cual se debe acoplar con la lanza de obstrucción de flujo. En el Plano Seis y Siete se presentan sus medidas detalladas. Por último, cabe destacarse que la boquilla y el conducto sumergido pueden fabricarse en una sola pieza formando una "buza" según observaciones de los fabricantes.

#### **9.2.1.3.- Rodillo-tapón.**

El primer aspecto en consideración fue escoger un material que sea más plástico (que se deforme más fácilmente) que el de la boquilla con la finalidad de evitar una deformación que haga que ambos se queden pegados. Como material se escogen dos alternativas según el método de fabricación usado para conformar la pieza: el primero de ellos es el Trough-Guard 101P el cual tiene aproximadamente 73% de alúmina y 15% de carburo de silicio. Este tiene alta resistencia a la abrasión, al choque térmico y al ataque de escoria, el cual se presta para ser extruido. La otra posibilidad es usar un material colable, llamado Onix 25VC compuesto de alta alúmina y carburo de silicio, con alta resistencia a los esfuerzos, choque térmico y abrasión, así como al ataque de escorias. Su aplicación típica es precisamente como rodillo para obstrucción. En el "Detalle de Inserto rodillo" del Plano Seis se muestra como el rodillo en su parte superior tiene un vástago el cual se une al travesaño de levantamiento mediante la rosca de un birlo que tiene en la parte superior.

#### **9.2.1.4.- Dique y flotador.**

El último elemento a considerar es el dique el cual tiene sección transversal de 2.5X2.5 centímetros, este elemento está sometido a abrasión constante por lo cual se propone hacerlo de Criterion 85, mismo material que para la boquilla. El flotador debe ser ligero y no deberá afectar las características del metal fundido, pero se deja a criterio de los fabricantes dada la infinidad de posibilidades que se presentan en cuanto a su forma y materiales utilizados. Adicionalmente, se puede implementar otro método práctico para vigilar el nivel en que se encuentra el líquido en los recipientes.

### **9.2.2. FABRICACION.**

Se divide la información en dos partes: revestimientos y accesorios.

### **9.2.2.1.- Revestimientos.**

Recuérdese que las capas de revestimiento son tres las cuales se irán citando a medida que se desarrolla el proceso (Vea paso a paso la Fig. 63) Una vez que se tienen los recipientes se cuele el revestimiento (Alkotón 800 distribuido por Barromex S A De C V [cortesía] ) colocando en la parte interior un recipiente de madera de tal manera que las paredes queden preparadas Posteriormente se coloca un cono de madera torneado de la forma aproximada de la boquilla y se vierte un poco de colado en el fondo Una vez que se tienen las paredes del revestimiento espera a que frague y seque mediante una pistola de axido-acetileno, posteriormente introduzca el recipiente en una caja circular y vierta el aislamiento

### **9.2.2.2.- Accesorios.**

La boquilla y la punta de la válvula de rodillo se pueden hacer con refractarios colables El conducto largo se puede hacer por medio de extrusión o bien con moldes de madera La elección del método propuesto depende de la cantidad de compactación pero en ambos el colado brinda la posibilidad de hacer una sola pieza junto con el arreglo desarrollado anteriormente Cabe hacer notar que el método propuesto se puede adaptar igualmente a la fabricación del tundish, solo que en los pasos 2 y 8 se pueden hacer cajones de madera.

## **9.3.- INSTALACION DE LA CABINA.**

La primera labor será hacer los surcos a los tablones de aislamiento en los que van a ir alojados los resistores de calefacción lo cual se puede conseguir raspando dicho material. Seguido se procede a hacer los orificios de las entradas de los conductores previendo la colocación de los aisladores eléctricos (cerámica que protege la juntura del resistor con el conductor) Posteriormente coloque las paredes de calefacción (Fibra cerámica) y la pared exterior correspondiente en forma superpuesta (fibra mineral) con la finalidad de hacer los orificios para la salida/entrada de las resistencias embobinadas Después coloque los resistores previamente embobinados en las ranuras de los tablones Dicho tablón debe ser colocado en su marco (arreglo de perfil "L" soldado con perfil tubular cuadrado) De los elementos que faltan la superficie del fondo se coloca de forma muy sencilla y la tapa se puede fijar haciéndole unos barrenos que entren como guías en algún En vista de ello, el siguiente paso sera hacer los orificios en la tapa (para entrada de la lanza de obstrucción y transductores) y la colocación de pernos soldados a la estructura para el fácil levantamiento y colocación de la tapa

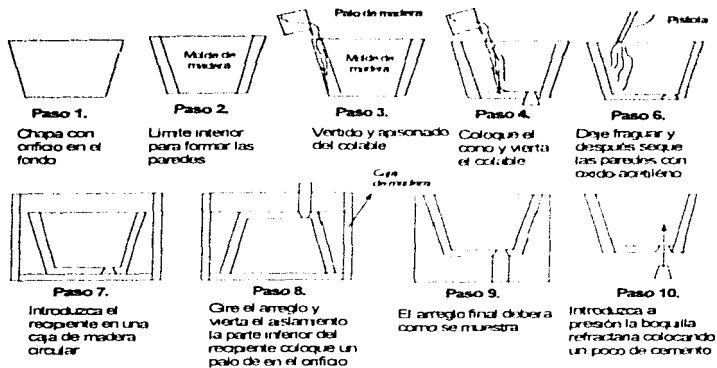


Fig. 63. Pasos para hacer el recipiente dosificador.

La colocación totalmente perpendicular de una de las paredes de la cabina es importante puesto que hay que ir soportado el tubo guía para el mecanismo de accionamiento de la válvula por lo cual podría ser útil idear algún método para ello, el cual puede estar soldado a el marco que soporta la cabina

Una vez que los soportes del tubo se encuentran fijos a este por medio de soldadura según el detalle del **Plano uno** y posteriormente estos se fijan a la estructura o pared donde van a ir soportados, verificando la perpendicularidad mediante una escuadra o bien o un micrómetro de carátula lo cual es importante para garantizar el taponamiento de la válvula correctamente

En este punto introduzca el recipiente dentro de su cabina situándolo en el lugar exacto con la finalidad de que la válvula de obstrucción quede asentada perfectamente en la boquilla O bien se puede proceder moviendo el recipiente una vez colocada la válvula por enmedio de ensayo-error lo cual será el siguiente paso No obstante, se a colocado un orificio largo con la finalidad de que las tuercas que sujetan el birlo del vástago puedan moverse lateralmente. El detalle se muestra en el **Plano Seis**

Una vez que se tiene el tubo introduzca dentro de este por la parte de abajo la varilla deslizante la cual deberá estar acoplada con el mecanismo de cuatro barras y al mismo tiempo introduzca el buje seguidor. Una vez llevado a cabo esto coloque el muñón y después la varilla de soporte de la válvula de obstrucción la cual deberá estar acoplada con este último elemento.

Igualmente será muy útil hacer más de un recipiente metálico con la finalidad de prever la preparación de cualquiera de ellos en lo que otro en buen estado se encuentra funcionando. También deberá prevenirse el acoplamiento con la estructura que sostiene a cada uno.

### **9.3.2.- COLOCACION DE CONDUCTORES.**

La aleación níquel-cromo se suelda más fácilmente que la aleación cromo-aluminio-hierro. Hay que tener en cuenta el hecho de que las aleaciones empleadas para la fabricación de conductores de calentamiento existe el peligro de que se formen gruesos cristales en las proximidades de la junta soldada, por lo cual hay que evitar que estas partes se calienten excesivamente, protegiéndolas de manera apropiada a fin de evitar que se rompa la estructura cristalina. En general, una soldadura de este tipo permite realizar una unión fácil y segura entre la sección del conductor de calentamiento y la del conductor de alimentación, que suele ser de dos a cuatro veces mayor. Cuando se trata de conductores de calentamiento delgados es suficiente empalmarlos por torsión.

## **9.4.- RECOMENDACIONES DE OPERACION.**

**1ro.** Vacie el metal fundido dentro de la cuchara de forma tal que no se provoquen salpicaduras que dañen la cámara o elementos de calefacción y procurando que se cree la menor turbulencia posible dentro de él. Antes verifique que las condiciones del revestimiento, temperatura de la cámara de calefacción y refractarios sea buena, así como también que la barra falsa se encuentre en posición correcta. Espere un tiempo aproximado de 1 minuto a que el líquido se calme. Ya que la cuchara tiene el doble de volumen del tundish vacíela hasta la mitad.

**2do.** Llevado a cabo lo anterior espere un momento a que el líquido contenido en el tundish se calme.

**3ro.** Abra al mismo tiempo las válvulas de ambos recipientes cuidando en primera instancia de que el nivel óptimo del tundish no sea sobrepasado y procurando controlar el nivel mediante la obstrucción en las válvulas de ambos elementos.

## 9.5.- PRESUPUESTO.

El presupuesto dado a continuación se basa en las listas unitarias dadas en los planos que se muestran más adelante. Para llevarla a cabo se considero el uso de un 30% más de material o bien según la presentación en que se encuentre el producto, el requerimiento propuesto será mayor a aquél que se necesita. Las direcciones de los proveedores se muestran al final.

Concepto	Prospecto	Características Particulares	Precio unitario	Cantidad	TOTAL + IVA
Tablón de fibra cerámica	Refractarios Mexicanos S A	Tablones de medida estandar	Cortesía m <sup>2</sup>		
Tablón de fibra mineral	Refractarios Mexicanos S A	Tablones de medida estandar	Cortesía m <sup>2</sup>		
Allugard	Refractarios Mexicanos, S A	Pequeña Cantidad	Cortesía Kg		
Criterion	Refractarios Mexicanos S A	Pequeña Cantidad	Cortesía Kg		
Aislakon	Barromex S A de C V	Saco de 50 Kg c/u	Cortesía Kg		
Altokon 800	Barromex, S A De C V	Saco de 50 kg c/u	Cortesía Kg		
Lamina de aluminio		No especificado*	m <sup>2</sup>		
Perfil tubular de 1 1/2"		No especificado*	m		
Angulo de 1 1/2" por 1/2"		No especificado*	m		
Conductor para alta temperatura	Articulos Eléctricos S A de C V	Calibre Pequeño No especificado*	m		
Resistencia para alta temperatura	Articulos Eléctricos S A de C V	Calibre 16	m		
Resistencia para alta temperatura	Articulos Eléctricos S A de C V	Calibre 23	m		

Concepto	Prospecto	Características Particulares	Precio Unitario	Cantidad	TOTAL + IVA
Caja de control de temperatura	**	No especificado*	Unidad		
Termopar para cabina	**	No especificado*	m		
Termopar para liquido fundido	**	No especificado*	m		
Interruptor de cuchillas	Con portafusibles y caja	No especificado*	Unidad		
Fusibles	**	No especificado*	Unidad		
Contactador	**	No especificado*	Unidad		
Botón interruptor con luz	**	No especificado*	Unidad		
Lamina	Calibre 18				

**Tabla XX. Presupuesto.**

**NOTAS:**

\* Los locales se encuentran en la Calle de Victoria, en el centro de la Ciudad de México.

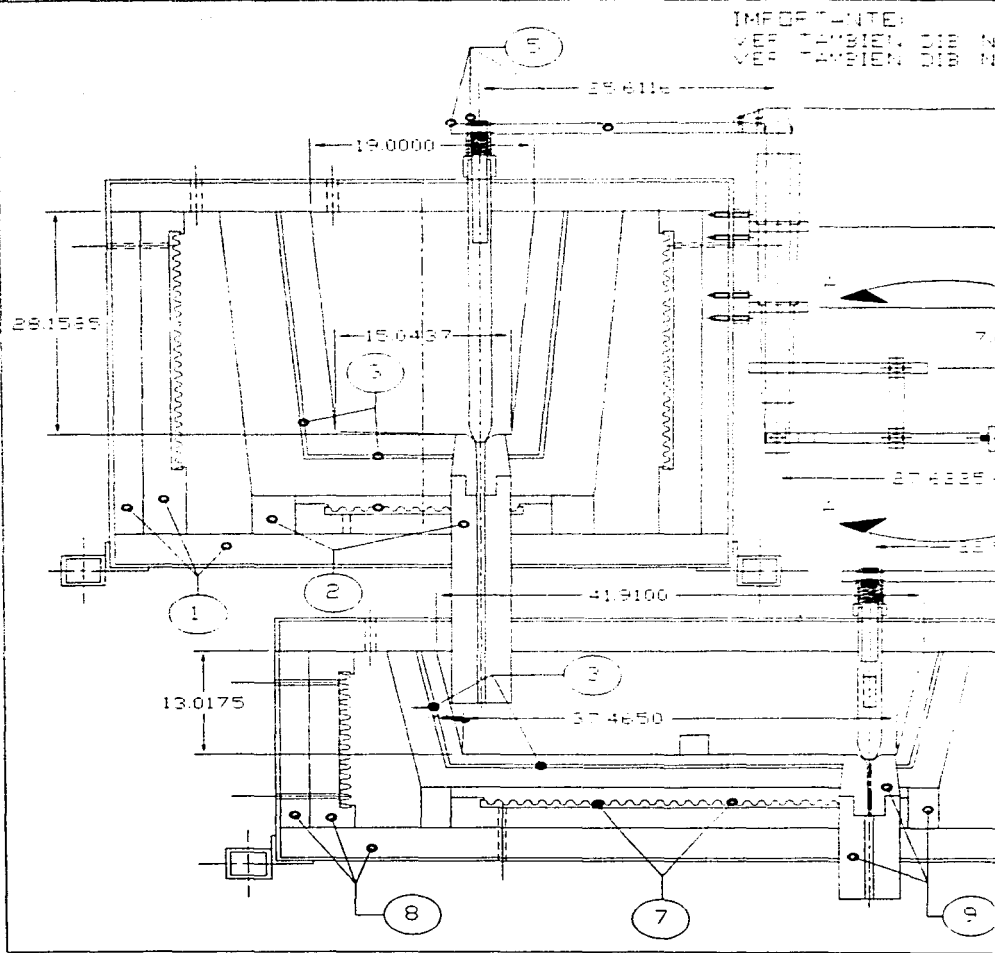
\*\* No especificado hasta llevar a cabo la construcción

1.- Fabricantes de Refractarios S A de C V

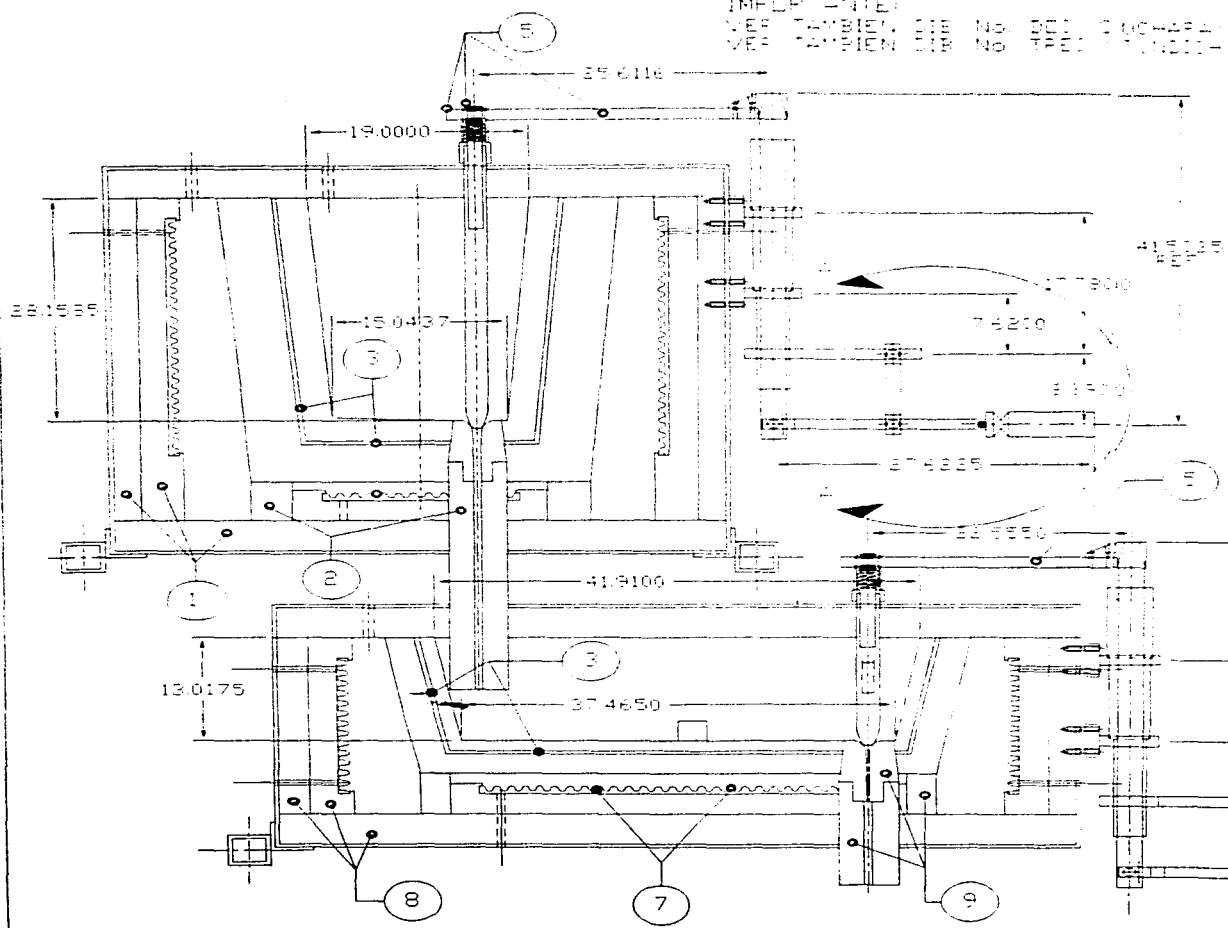
2 - Barronex S A de C V

3.- Artículos eléctricos S A. de C V. Victoria 95-D, Col. Centro. Méx. D. F.

IMPORTANTE  
COM O LUGAR DO  
NOME DO PROJETO



IMPORTANTE:  
 VER TAMBIEN DIB No 4001  
 VER TAMBIEN DIB No 4002

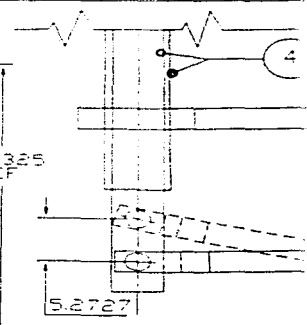


LISTA DE COMPONENTES P/CUCHARA  
 VER TAMBIEN DIB No

No REF	No PLANO	TITULO
1	CUATRO	ALICATIMIENTOS P/CUCHARA
2	SEIS	REFRACTARIOS Y ACCESORIOS
3	DOCHO	DESARROLLO DE LAMINA P...
4	DOCHO	CONEXIONES Y CONTROL...
5	DIEZ	SOPORTE P/PIEZA TUBUL...
6	ONCE	PARTES P/MECANISMO
7	DOCHO	CONEXIONES Y CONTROL...

LISTA DE COMPONENTES PARA  
 VER TAMBIEN DIB No

No REF	No PLANO	TITULO
8	UNO	ALICATIMIENTOS P/TUBO...
9	DIEZ	REFRACTARIOS Y ACCESORIOS
3	DOCHO	DESARROLLO DE RECIPIE...
4	NUEVE	PIEZA TUBULAR P/MECAN...
6	DIEZ	SOPORTE P/PIEZA TUBUL...
1	ONCE	PARTES P/MECANISMO
7	DOCHO	CONEXIONES Y CONTROL...

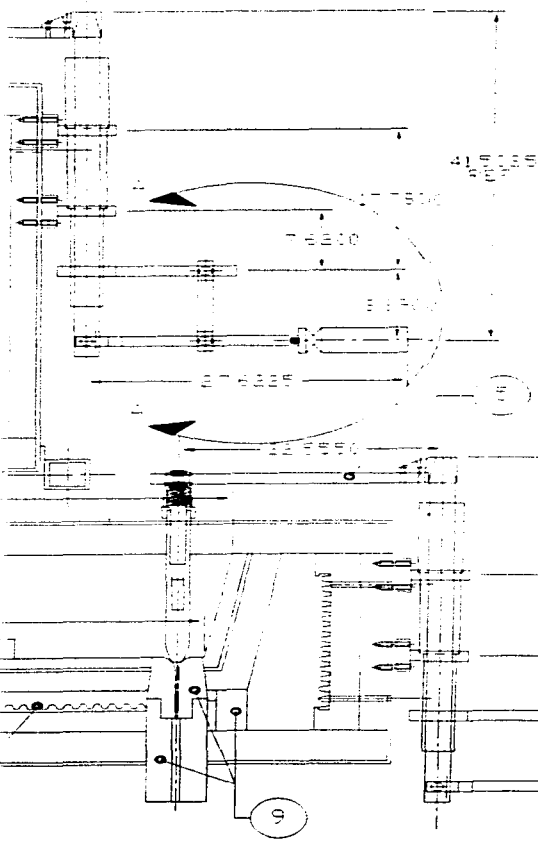


DETAL:  
 'FUNCI  
 ESCAL-



IMPORTANTE.

VER TAMBIEN DIB NO 001 TUBERIAS  
 VER TAMBIEN DIB NO 002 TRONCALONES

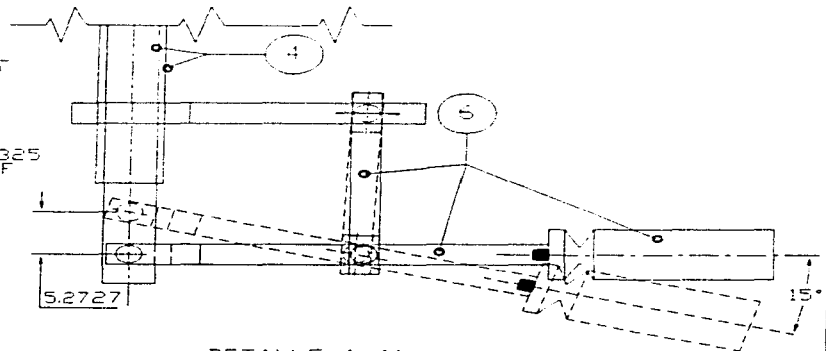


**LISTA DE COMPONENTES P/COCHARA**  
**VER TAMBIEN DIB No 2**

No. REF.	No. PLANO	TITULO
1	CUATRO	AISLAMIENTOS P/COCHARA
2	SEIS	REFRACTARIOS Y ACCESORIOS P/COCHARA
3	OCHO	DESARROLLO DE LAMINA P/RECIPIENTES
4	DOCE	CONEXIONES Y CONTROLES P/CALEFACCION
5	DIEZ	SOPORTE P/PIEZA TUBULAR
6	ONCE	PARTES P/MECANISMO
7	DOCE	CONEXIONES Y CONTROL P/CALEFACCION

**LISTA DE COMPONENTES PARA TUNDISH**  
**VER TAMBIEN DIB No 3**

No. REF.	No. PLANO	TITULO
8	CINCO	AISLAMIENTOS P/TUNDISH
9	SIETE	REFRACTARIOS Y ACCESORIOS P/TUNDISH
3	OCHO	DESARROLLO DE RECIPIENTES
4	NOVE	PIEZA TUBULAR P/MECANISMO
5	DIEZ	SOPORTE P/PIEZA TUBULAR
6	ONCE	PARTES P/MECANISMO
7	DOCE	CONEXIONES Y CONTROL P/CALEFACCION



DETALLE A-A'  
 "FUNCIONAMIENTO DE MECANISMO"  
 ESCALA 2:1

ENEF. APALON

ENCABRE  
 GENERAL

DIBO: EDUARDO C. GARCIA  
 REVISO: MC DANIEL ALONSO A.  
 ASISTO: MC DANIEL ALONSO A.  
 ACO: CH  
 10/06/89

Módulo

ENCOMEN

Nº

A. H. HERRERA

Módulo 2



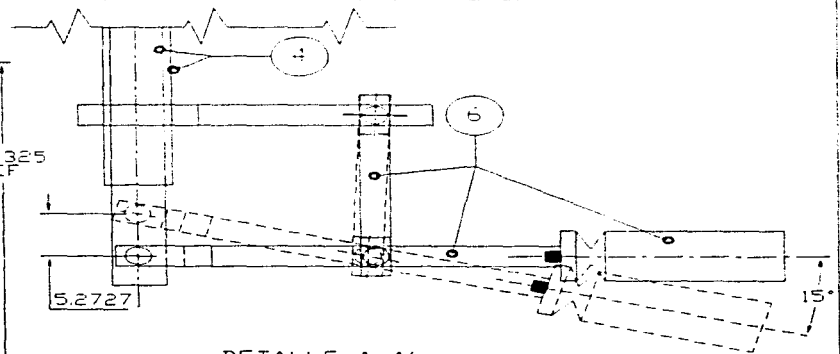
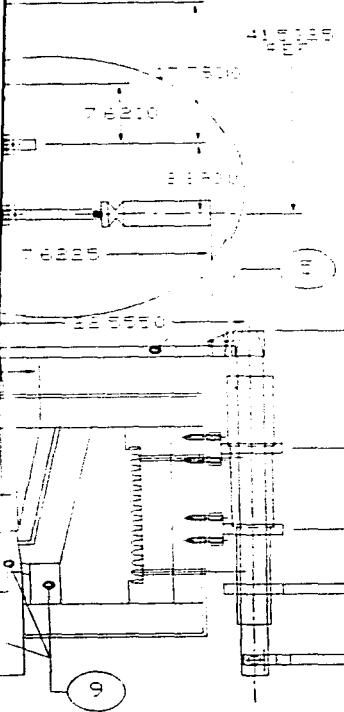
100 NO. 400  
 100 NO. 400

LISTA DE COMPONENTES P/BUCHARA  
 VER TAMBIEN DIB. NO. 3

No. REF.	No. PLANO	TITULO
1	CUATRO	AISLAMIENTOS P/BUCHARA
2	SEIS	REFRACTARIOS Y ACCESORIOS P/BUCHARA
3	DOCHO	DESARROLLO DE LAMINA P/RECIPIENTES
4	DOCE	CONEXIONES Y CONTROLES P/CALEFACCION
5	DIEZ	SOPORTE P/PIEZA TUBULAR
6	ONCE	PARTES P/MECANISMO
7	DOCE	CONEXIONES Y CONTROL P/CALEFACCION

LISTA DE COMPONENTES PARA TUNDISH  
 VER TAMBIEN DIB. NO. 3

No. REF.	No. PLANO	TITULO
8	CINCO	AISLAMIENTOS P/TUNDISH
9	SIETE	REFRACTARIOS Y ACCESORIOS P/TUNDISH
10	DOCHO	DESARROLLO DE RECIPIENTES
11	NUEVE	PIEZA TUBULAR P/MECANISMO
12	DIEZ	SOPORTE P/PIEZA TUBULAR
13	ONCE	PARTES P/MECANISMO
14	DOCE	CONEXIONES Y CONTROL P/CALEFACCION



DETALLE A-A  
 "FUNCIONAMIENTO DE MECANISMO"  
 ESCALA 2:1

ENC. APAGEN

ENCABEL. GENERAL

UNIDAD

ENCABEL. A BARRA A

BARRA

ENCABEL. AL BARRA A

MOT. EXC. UN. UNIDAD

UN. UNIDAD

UN. UNIDAD

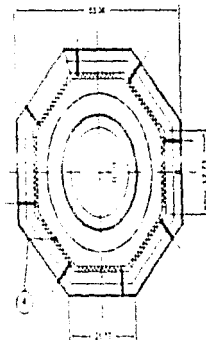
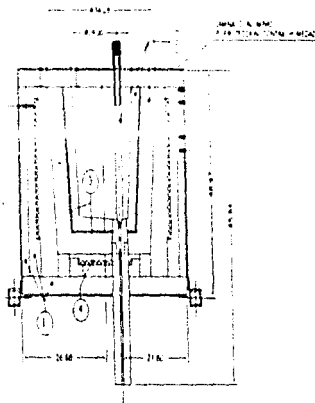
UN. UNIDAD

UN. UNIDAD

LISTA DE MATERIALES

N.º PARTE / N.º PARTE / UNIDAD

1	APUNTA	ALUMINIO 6061
2	100	PERFORADOR ALUMINIO 6061
3	200	SEMPRE DE ALUMINIO
4	201	CONEXION CON TUBO ALUMINIO



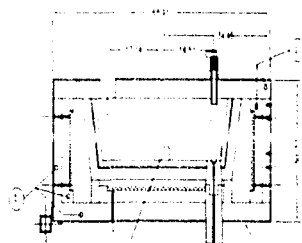
DETALLE DE  
INSTALACION

• VISTA DE PLANTA

MATERIA	LAMINA DE ACERO 304	EINER APAGON	
N.º DE PARTE	100	100	100
PROYECTO	MC DANIEL ALDANA A	COSTA DECISIONAL	
PROYECTO	APUNTA	CUCHARA	
PROYECTO	MC DANIEL ALDANA A	N.º DE PARTE	INVENTARIO
PROYECTO	100	100	100
PROYECTO	100	100	100



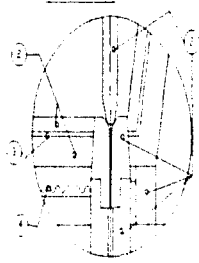
LISTA DE MATERIALES	
1.	ALAMBRE DE ALAMBRE
2.	REFRACTARIO CALADO A TUNEL
3.	DE PARED Y PUNTO
4.	ALAMBRE DE ALAMBRE



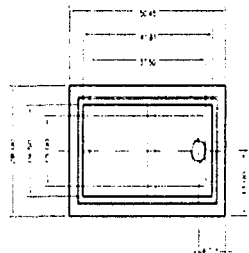
SEAL DE ORDEN Y  
ALAMBRE EL TIEMPO  
DE PRESENCIA

LANCHA DE ALAMBRE  
POR ELLEN CONTRA  
ALAMBRE

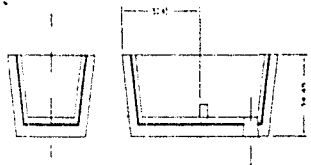
DETALLE DE  
INSTALACION



DETALLE DE  
REFRACTARIO

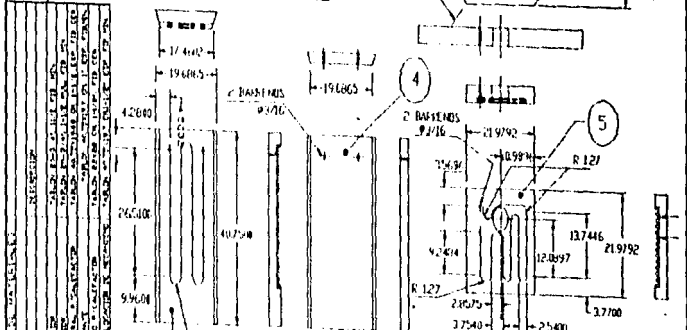
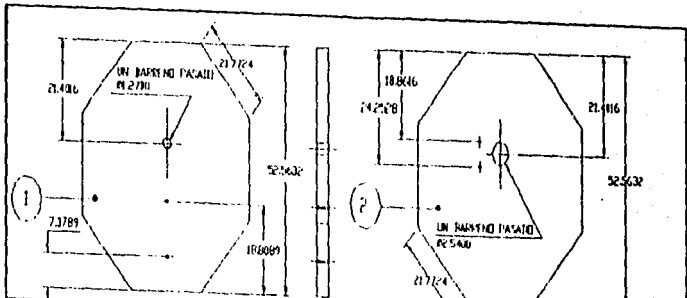


VISTA DE PLANTA



MATERIA	LANCHA DE ALAMBRE D.B.D	ESPACIO CASERA	ENEF APARON
N.º DE TUNEL	M.º 100	M.º CANAL ALDAMA A	1740
TUNEL	M.º 100	M.º CANAL ALDAMA A	1750
TIPO DE TUNEL	M.º 100	M.º CANAL ALDAMA A	1750
TIPO DE TUNEL	M.º 100	M.º CANAL ALDAMA A	1750
TIPO DE TUNEL	M.º 100	M.º CANAL ALDAMA A	1750
TIPO DE TUNEL	M.º 100	M.º CANAL ALDAMA A	1750





1	...
2	...
3	...
4	...
5	...

PROYECTO	...
FECHA	...
ELABORADO	...
REVISADO	...
APROBADO	...
OTRO	...
...	...

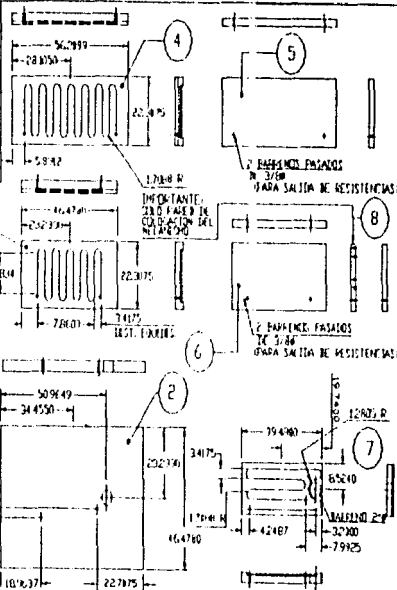
E.N.E.P. ARAGON	
ASLAMIENOS DE CUCHARA	
...	...
...	...
...	...
...	...
...	...



LISTA DE MATERIALES

Nº	QTY	DESCRIPCIÓN	REQUISITOS
1	1	SALIDA EPDM 100 x 100 x 100 FIBRA	TIPO 200000
2	1	PARED DE EPDM 100 x 100 x 100 FIBRA	TIPO 200000
3	1	SALIDA EPDM 100 x 100 x 100 FIBRA	TIPO 200000
4	1	SALIDA EPDM 100 x 100 x 100 FIBRA	TIPO 200000
5	1	SALIDA EPDM 100 x 100 x 100 FIBRA	TIPO 200000
6	1	SALIDA EPDM 100 x 100 x 100 FIBRA	TIPO 200000
7	1	SALIDA EPDM 100 x 100 x 100 FIBRA	TIPO 200000
8	1	SALIDA EPDM 100 x 100 x 100 FIBRA	TIPO 200000

ABREVIATURAS:  
 FIB MIN = FIBRA MINERAL  
 FIB CER = FIBRA CERÁMICA



¡IMPORTANTE!  
 230 PÁG. 2 DE  
 COLECCIÓN DEL  
 N.º 2-67-90

¡IMPORTANTE!  
 LAS PAREDES SE PUEDEN  
 UNIR CON GRAPAS O BIEN CON  
 ADHESIVO  
 UNA VEZ HECHO ESTO  
 TALABRE

PROYECTO: A31 36 42 1990	ESC: B E. BARRIO C. CASI NAL	E.N.E.P. ARAGON	
N.º DE PROYECTO	0-70	1988	
N.º DE DISEÑO	N.º BARRIO ALBARRA A	AISLAMIENTOS DE TUNDISH	
PROYECTO	N.º BARRIO ALBARRA A		
PROYECTO	EX. 6-70	0-10 PÁG.	0-10 PÁG.
TR. 0-10	0-10	0-10 PÁG.	0-10 PÁG.
	0-10	0-10 PÁG.	0-10 PÁG.
	0-10	0-10 PÁG.	0-10 PÁG.





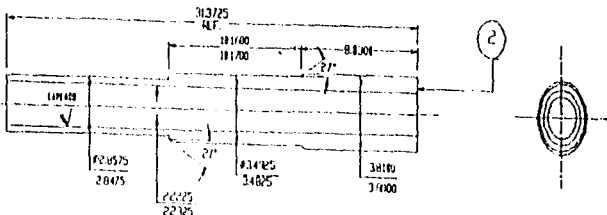
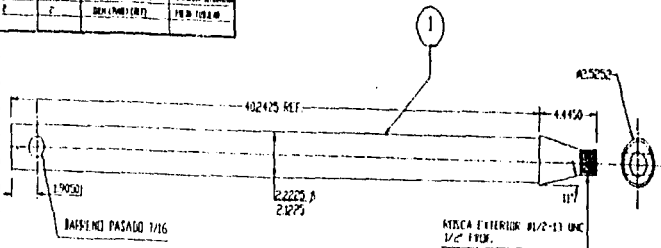






LISTA DE MATERIALES

NO. PARTE	CANTIDAD	MARCA	REQUISITOS
1	2	VARILLA DE ALUMINIO	VARILLA SEGUIDORA
2	2	PIEZA TUBULAR	PIEZA TUBULAR



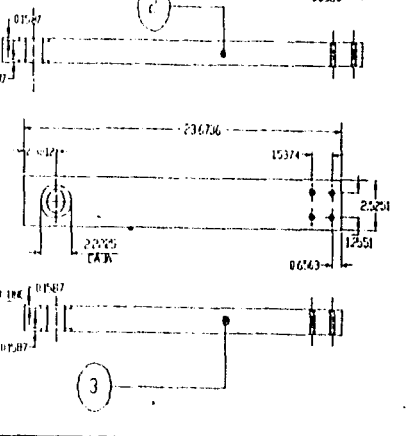
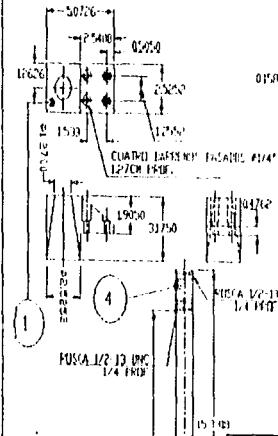
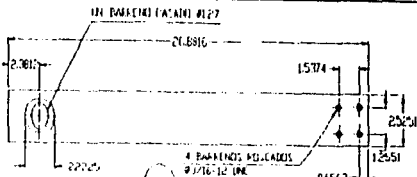
N.º DE DISEÑO: 402425 TUB. 20	TITULO: E. N. P. C. ARAGON	E. N. P. ARAGON	
N.º DE PIEZAS: 2 C/U	DISEÑADO: M. C. DANIEL ALBARRAN A.	0723 VARILLA SEGUIDORA Y PIEZA TUBULAR	
N.º DE TUBOS: 2	REVISADO: M. C. DANIEL ALBARRAN A.	N.º DE FOLIOS: 1	DOWEL: SI
N.º DE PIEZAS: 2	APROBADO: CH. ARAGON	N.º DE EJES: 1	N.º DE BORNES: 1
N.º DE HOJAS: 2	N.º DE HOJAS: 2	N.º DE HOJAS: 2	N.º DE HOJAS: 2





LISTA DE MATERIALES

N.º PARTE	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	UNIDAD
1	1	ALBA PLAC	UNDA PLAC
2	1	ALBA LAMP. PAR. 12V. 15W.	UNDA LAMP. PAR.
3	1	ALBA LAMP. PAR. 12V. 15W.	UNDA LAMP. PAR.
4	2	ALBA LAMP.	UNDA LAMP.



TITULO: <b>EN BARRIDO</b> NO. DE DISEÑO: FECHA: HOJA: DE:	DISEÑADO: <b>EDUARDO C. CÁRDENAS</b> DIBUJADO: <b>MR. DANIEL ALBARRÁN</b> REVISADO: <b>MR. DANIEL ALBARRÁN</b> ESCALA: OBSERVACIONES: N.º DE:	EMPRESA: <b>E.N.E.P. ARAGÓN</b> TÍTULO: <b>TRAVESANO E                  INSERTO DE METAL</b> N.º DE PROYECTO: N.º DE HOJA: DE:
---	---	--



1. SISTEMA DE REGULACION

LINEA DE CONTROL	LINEA DE REGULACION	LINEA DE SERVIDOR	LINEA DE ALIMENTACION	LINEA DE ALIMENTACION
1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25
26	27	28	29	30
31	32	33	34	35
36	37	38	39	40
41	42	43	44	45
46	47	48	49	50
51	52	53	54	55
56	57	58	59	60
61	62	63	64	65
66	67	68	69	70
71	72	73	74	75
76	77	78	79	80
81	82	83	84	85
86	87	88	89	90
91	92	93	94	95
96	97	98	99	100

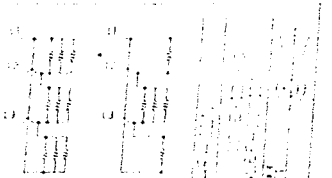
2. SISTEMA DE REGULACION

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25
26	27	28	29	30
31	32	33	34	35
36	37	38	39	40
41	42	43	44	45
46	47	48	49	50
51	52	53	54	55
56	57	58	59	60
61	62	63	64	65
66	67	68	69	70
71	72	73	74	75
76	77	78	79	80
81	82	83	84	85
86	87	88	89	90
91	92	93	94	95
96	97	98	99	100

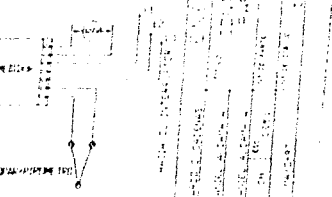
3. SISTEMA DE REGULACION

4. SISTEMA DE REGULACION

LINEA DE CONTROL	LINEA DE REGULACION	LINEA DE SERVIDOR	LINEA DE ALIMENTACION	LINEA DE ALIMENTACION
1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25
26	27	28	29	30
31	32	33	34	35
36	37	38	39	40
41	42	43	44	45
46	47	48	49	50
51	52	53	54	55
56	57	58	59	60
61	62	63	64	65
66	67	68	69	70
71	72	73	74	75
76	77	78	79	80
81	82	83	84	85
86	87	88	89	90
91	92	93	94	95
96	97	98	99	100



5. SISTEMA DE REGULACION



6. SISTEMA DE REGULACION





## APENDICE B

### TABLAS Y GRAFICAS PARA DETERMINACION DEL SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA.

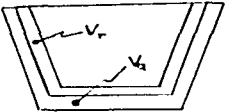
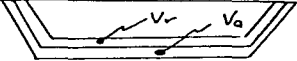
NOMBRE	Altokon 800	HN light Weight	Aislakon	Micacrete TM
Referencia	[73]	[75]	[75]	[75]
Distribuidor	Biomex	Indresco	Biomex	Indresco
Tipo de aislante	Concreto, liga hidraulica	Concreto	Concreto	Concreto
Temperatura recomendada [°C]	1800 (max)	870	980	1280
Porosidad aparente %	23			
Absorción [%]	7.7			
Cambio lineal [%]	0.0	-0.0025	-0.0015	-0.007
Modulo de ruptura [kg/cm <sup>2</sup> ]	140	8.4 (min)	14.0 (min)	6.0 (min)
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	3,100	400	800	883
Conductividad termica [W/m*K]	1.280 (800°C)	0.1862 (650 °C)	0.2775 (850 °C)	0.2412 (850 °C)
Calor especifico [kJ/kg*K]	1.122	0.88 (arcilla) [39]	0.88 (arcilla)	0.88 (arcilla)
Presentación	Sacos de 50 [kg]			
Temperatura de secado [°C]	-----	105	105	105
Temperatura de cocimiento [°C]	Pendiente	Pendiente	Pendiente	Pendiente

#### Apendice B.1. Refractarios propuestos por los fabricantes [73].

Cant.	Localización	Cálculos [mXm]	Area total [m <sup>2</sup> ]
1	Pared lateral cuchara	$2\pi RH = 2\pi(0.1395)(0.077)$	0.0675
1	Fondo de la cuchara	$\pi R^2 = \pi(0.1395)^2$	0.064
2	Paredes lateral chicas	$2Ha = (2)(0.11)(0.1165)$	0.025
2	Paredes lateral grandes	$2HL = (2)(0.1)(0.38)$	0.076
1	Fondo del tundish	$La = (0.1165)(0.38)$	0.04427

#### Apendice B.2. Areas que ocupa cada pared de los contenedores.



CUCHARA	ESQUEMA
$V = (R_2 + r_2 + R_r)$ $V_{m_{a-a}} = (3,14)(0,23)[(0,185)^2 + (0,1608)^2 + (0,18)(0,18)]$ $= 21,6243 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ $V_{m_{r-r}} = (3,14)(0,21)[(0,185)^2 + (0,1408)^2 + (0,185)(0,14)]$ $= 15,446 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ $V_m = 8,844 \times 10^{-3} \text{ (Dato conocido)}$ $V_r = V_m + r - V_m = 15,446 \times 10^{-3} - 8,844 \times 10^{-3}$ $= 6,602 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ $V_a = V_{m_{a-a}} - V_{m_{r-r}} = 21,62 \times 10^{-3} - 15,446 \times 10^{-3}$ $= 6,178 \times 10^{-3}$	
<p>TUNDISH</p> $V = \frac{H}{6} [L(2a + a') + L'(2a' + a)]$ $V_{m_{a-a}} = \frac{(0,13)[(0,44)[2(0,18) + 0,17] + (0,43)[2(0,17) + 0,181]]}{6}$ $= 10,1 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ $V_{m_{r-r}} = \frac{(0,11)[(0,42)[2(0,16) + 0,15] + (0,41)[2(0,15) + 0,16]]}{6}$ $= 7,2398 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ $V_m = 4,422 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ $V_r = V_{m_{r-r}} - V_m = 7,24 \times 10^{-3} - 4,42 \times 10^{-3}$ $= 2,8 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ $V_a = V_{m_{a-a}} - V_{m_{r-r}} = 10,1 \times 10^{-3} - 7,23 \times 10^{-3}$ $= 2,8 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ <p>Respecto a las paredes angostas se considera que tienen la del volumen ocupado por las paredes anchas.</p>	

Apendice B.3. Determinación del volumen y masa que ocupan los elementos. Se tomaron dimensiones medias.

WATTS	128 VOLTS			240 VOLTS		
	OHMS	CALIBRE		OHMS	MIN	CALIBRE
		MIN	MAX			
50	312 0	27	31	1,152 0	29	34
100	156 0	28	30	576 0	29	33
150	104 0	26	30	384 0	29	33
200	78 0	25	29	288 0	28	32
250	62 0	25	29	230 0	28	32
300	52 0	24	28	192 0	27	31
400	39 0	22	26	144 0	25	29
500	31 0	20	24	115 0	23	27
600	26 0	19	23	96 0	22	26
700	22 0	18	22	82 0	21	25
800	19 0	18	22	72 0	21	25
900	17 0	17	21	64 0	20	24
1000	15 0	16	20	57 0	19	23
1100	14 0	16	20	52 0	19	23
1200	13 0	15	19	48 0	18	22
1300	12 0	14	18	44 3	17	21
1400	11 16	13	17	41 14	16	20
1500	10 41	12		38 40	15	19
1600	9 76	12		36 0	15	19
1700	9 19	12		33 68	15	19
1800	8 68	11		32 0	14	18
1900	8 22	11		30 31	14	18
2000	7 81	10		28 80	13	17
2500	6 25	9		23 04	12	16
3000	5 20	8		19 20	11	15
4000	3 9	8		14 4	09	13
5000	3 12	5		11 52	08	11

**Apéndice B.4 Determinación de calibres y resistencia requeridos según la carga térmica a aportar para un alambre de cromo**

Temperatura °C	Cromo A 80 Ni-20 Cr	Copel 55 Cu
20	0	
93	1.6	
204	3.7	
315	5.4	
427	6.8	
538	7.0	
649	6.4	
760	6.2	
871	6.4	
982	7.2	
1093	7.8	

Despreciable desde 28°C hasta 900°C

**Apéndice B.5. Factor por aumento de temperatura en la resistencia.**

Medida del alambre AWG	Diámetro nominal (in)	Cromel A 80 Ni-20 Cr	Copel 85 Cu-45 Ni
30	0.410	0.00367	0.00175
29	0.395	0.00465	0.00221
19	0.325	0.00915	0.00278
1	0.289	0.00778	0.00362
2	0.274	0.00777	0.00442
3	0.259	0.01239	0.00761
4	0.244	0.01432	0.00781
5	0.182	0.01452	0.00888
6	0.182	0.0246	0.01120
7	0.144	0.0014	0.01418
8	0.128	0.0037	0.01764
9	0.114	0.0100	0.0220
10	0.102	0.0025	0.283
11	0.0945	0.0785	0.0366
12	0.107	0.0501	0.0448
13	0.136	0.1265	0.0797
14	0.171	0.1588	0.0718
15	0.218	0.200	0.0833
16	0.279	0.250	0.1100
17	0.346	0.321	0.142
18	0.435	0.406	0.1838
19	0.540	0.502	0.227
20	0.684	0.635	0.287
21	0.862	0.800	0.362
22	1.09	1.017	0.466
23	1.37	1.272	0.576
24	1.73	1.636	0.728
25	2.19	2.03	0.918
26	2.77	2.57	1.163
27	3.47	3.23	1.468
28	4.41	4.04	1.852
29	5.49	5.09	2.30
30	7.00	6.50	2.94
31	8.84	8.21	3.71
32	10.9	10.16	4.59
33	13.9	12.60	5.83
34	17.6	16.37	7.41
35	22.3	20.7	9.38
36	28.0	26.0	11.70
37	34.6	32.1	14.52
38	43.8	40.9	18.38
39	57.2	53.1	24.0
40	72.9	67.6	30.6

Apéndice. B.6. Resistencia de alambres de cromel y de Copel, después tome en cuenta el coeficiente de temperatura presentado en el Apéndice B.5.

**Sistema físico**

**Esquema**

**Factor de forma**

**Restricciones**

Pared plana



1

Flujo de calor unidimensional

Conducción a través del filo de la sección de dos paredes —temperaturas uniformes en la superficie interior y exterior



0.54L

La dimensión interna debe ser mayor que (1/5)Δx

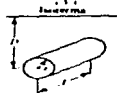
Conducción a través de la esquina de la sección de tres paredes homogéneas —temperaturas uniformes en la superficie interior y exterior



0.154x

Δx = L  
L es la longitud de la pared

Cilindro hueco de radio r ubicado dentro de un medio seminfinito cuya superficie es isoterma



$$\frac{2\pi L}{\cosh^{-1}(D/r)}$$

$$\frac{2\pi L}{\ln(2D/r)}$$

L > r

L > r

D > 1/2

Conducción entre dos cilindros huecos aislados térmicamente en un medio infinito

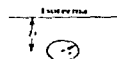


$$\frac{2\pi L}{\ln(L/r_1) + \ln(L/r_2)}$$

L > r

L > D

Esfera hueca de radio r ubicada dentro de un medio seminfinito cuya superficie es isoterma



$$\frac{4\pi r^2}{1 + r/2D}$$

L > r

L > D

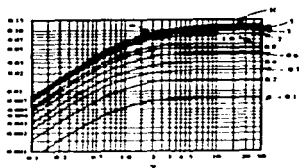
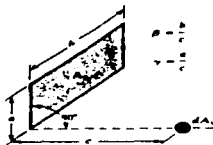
Cilindro hueco de radio r ubicado dentro de un medio seminfinito como se muestra



$$\frac{2\pi L}{\ln(2L/r)}$$

L > 2r

**Apendice B.7. Factores de forma por conducción [59].**



**Apendice B.8. Gráfica para obtener el coeficiente de forma de una esfera que irradia su calor a una superficie según la distancia y las medidas de la pared en cuestión [59].**

*Montaje de los elementos calentadores por grupos con 1, 2 o 3 escalones de potencia*

Conexión	Desconexión parcial	Montaje		en paralelo	desconexión parcial	en serie
		en paralelo	en serie			
Triángulo	Montaje en triángulo	en triángulo	en V	en triángulo	Montaje en V	en estrella
Patrella	Desconexión parcial	en estrella	en serie	en estrella	Montaje desconexión parcial	en serie
Doble triángulo	Desconexión parcial	en paralelo	en serie	en doble triángulo	Montaje en doble estrella	en serie
Doble estrella	Desconexión parcial	en paralelo	en serie	en doble estrella	Montaje en triángulo	en estrella

**Apendice B.9. Diferentes conexiones y escalonamientos para abastecer y controlar la temperatura cuando se usan resistencias eléctricas como medio de calentamiento[65].**

T. K	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	$c_p$ J/kg K	$\mu$ kg/m·s	$\alpha$ m <sup>2</sup> /s	$\lambda$ W/m K	$\gamma$ m <sup>2</sup> /s	Pr
<b>Aire</b>							
107	2 8010	1 0969	0 0624	1 923	0 009346	0 2301	0 770
150	2 8078	1 0067	1 0983	4 343	0 013738	0 05718	0 783
200	1 7886	1 0061	1 2399	7 490	0 018098	0 10168	0 798
250	1 4138	1 0061	1 486	9 48	0 02227	0 15181	0 777
300	1 1774	1 0067	1 863	16 96	0 03624	0 29198	0 798
350	0 9980	1 0067	2 078	20 76	0 03003	0 3983	0 807
400	0 8628	1 0167	2 396	28 80	0 02365	0 3780	0 808
450	0 7833	1 0207	2 496	38 86	0 03707	0 4233	0 883
500	0 7048	1 0291	2 871	57 80	0 04038	0 3866	0 880
550	0 6423	1 0287	3 848	84 34	0 04390	0 8338	0 880
600	0 5878	1 0631	3 018	81 34	0 04838	0 7513	0 880
650	0 5480	1 0828	3 177	88 81	0 04952	0 8878	0 882
700	0 5030	1 0733	3 232	98 24	0 05330	0 9632	0 884
750	0 4708	1 0856	3 481	73 81	0 05498	1 0774	0 886
800	0 4406	1 0978	3 825	82 29	0 05779	1 1631	0 888
850	0 4189	1 1085	3 783	80 74	0 06028	1 2087	0 887
900	0 3928	1 1212	3 899	89 1	0 06276	1 4271	0 886
950	0 3718	1 122	4 027	118 2	0 06522	1 3510	0 889
1000	0 3528	1 181	4 157	117 8	0 06712	1 4778	0 702
1100	0 3204	1 160	4 48	118 9	0 0722	1 066	0 704
1200	0 2967	1 178	6 88	139 1	0 0782	2 231	0 707
1300	0 2707	1 187	4 89	182 1	0 0837	2 181	0 708
1400	0 2518	1 214	5 17	205 3	0 0891	2 420	0 708
1500	0 2358	1 230	5 40	229 1	0 0948	3 282	0 708
1600	0 2211	1 248	5 83	284 3	0 1001	3 678	0 708
1700	0 2082	1 267	5 83	280 3	0 105	3 777	0 708
1800	0 1970	1 287	6 07	308 1	0 111	4 279	0 704
1900	0 1868	1 308	6 39	328 8	0 117	4 811	0 706
2000	0 1782	1 338	6 80	388 0	0 124	8 240	0 702
2100	0 1682	1 373	6 73	399 8	0 131	5 718	0 700
2200	0 1602	1 419	6 83	432 8	0 138	6 230	0 707
2300	0 1538	1 482	7 14	464 0	0 148	6 340	0 710
2400	0 1488	1 676	7 33	504 0	0 161	7 020	0 718
2500	0 1456	1 688	7 87	543 8	0 175	7 441	0 730

Apendice B.10. Valores de propiedades del aire a presión ambiente [59].

Material	K [Btu/ft <sup>2</sup> ·ft <sup>2</sup> ·°F]				C <sub>p</sub> [Btu/lb <sub>m</sub> ·°F]	ρ [lbm/ft <sup>3</sup> ]	α [ft <sup>2</sup> /hr]
	32°F 0°C	212°F 100°C	572°F 300°C	662°F 350°C			
Aluminio	117	119	130	159	0.209	169	3.33
Cobre	254	218	212	207	0.091	558	4.42
Oro	180	170			0.030	1,933	4.08
Acero	31.8	30.9			0.104	481	0.70
Plomo	23.1	19	18		0.030	705	0.56
Magnesio	91	92			0.232	134	3.00
Molibdeno	72	68	64	62	0.092	609	1.80
Niquel	54	49	37		0.108	548	0.82
Plata	241	240			0.046	606	6.57
Estaño	36	34			0.054	458	1.54
Zinc	65.1	63	58		0.091	449	1.60
Unidades SI	W/m <sup>2</sup> ·K				J/kg·K	kg/m <sup>3</sup>	m <sup>2</sup> /s
Para conversión multiplique el valor tabulado por	1.728577				4.184X10 <sup>-4</sup>	1.68X10 <sup>-3</sup>	2.54X10 <sup>-1</sup>

Apéndice B.11. valores de propiedades de los metales puros principales [69].

Material	Tablon de fibra Ceramica con aglutinante		Tablon de fibra mineral
Combustibilidad	No combustible		Es combustible con algunos aglutinantes
Coefficiente de expansión	Sintra contracción		Sintra contracción
Punto de ignición	No combustible		No combustible
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	160 a 254		128 a 208
Calor específico [kJ/kg·°K]**	1.84X10 <sup>3</sup>		1.54X10 <sup>3</sup>
Resistencia [kPa]	213 (después de 24 horas de servicio (Ruptura)		172 (flexión)
Temperatura límite de servicio [°C]	1200		33.5 a 10% de deformación
Resistencia al choque térmico	Buena		Buena
Resistencia a la vibración	Buena		Regular
Absorción de agua % por volumen	(4) a (42)		10 - a 101
Transmisión de vapor de agua	Muy alta		Muy alta
Condiciones de conductividad térmica [W/m·°K]	Temperatura [°F]		
	100		
	200	0.074	0.054
	300	0.074	0.072
	400	0.040	0.091
	500	0.109	
	600	0.122	
	700	0.130	
	800		
	900		
	1000		

\*\* Valor obtenido en [59]

Apéndice B.12. valores de propiedades de los aislamientos usados en la cabina [68].

## APENDICE C DATOS PARA ANALISIS HIDRAULICO.

### C.1. RECIPIENTES.

En esta sección se muestran los resultados de los cálculos llevados a cabo para determinar la medida de los recipientes. En el caso de la cuchara se escoge el recipiente número 2 debido a que tiene el mayor tiempo de vaciado y tiene pequeño rango de fluctuación al en la descarga del líquido como lo demuestra la Tabla C.11.

Recipiente número	H/1 [cm]	5°		7°		Tiempo de vaciado [s]	
		R	r	R	r	Boquilla curva	Boquilla cónica
1	15	14.08	12.87	14.6	12.77	13.10	19.47
2	20	12.72	10.98	15.51	13.06	17.65	20.17
3	25	11.7	9.5	15.17	12.10	16.79	19.2
4	30	10.96	8.35	11.47	7.78	9.2	10.5
5	35	10.46	7.74	11.02	6.74	8.27	6.74

Tabla C11. Datos de diversos recipientes para la cuchara. Dimensiones en [cm]. El volumen utilizado en los cálculos se obtuvo en la ecuación 5.1b.

Para el tundish o artesa se escoge el recipiente número 2 ya que presenta el mayor tiempo de descarga lo cual es muy importante para la separación de escorias según lo demuestra la Tabla C12.

Recip. num.	Criterios		Medidas [cm]					Z	T <sub>v</sub> [Seg] Boquilla curva	T <sub>v</sub> [Seg] Boquilla cónica
	R <sub>v</sub>	α	H	L <sub>v</sub>	L	a	a			
1	2	5	10	29.0	29.1	15.4	14.6	0.5	7.77	8.89
2	2	5	15	23.9	29.6	11.6	12.9	0.5	6.63	7.57
3	2	5	20	19.7	21.4	10.6	9.85	0.5	5.98	6.83
4	2	7	10	37.0	38.2	12.3	11.1	0.3	8.00	9.14
5	2	7	15	32.1	33.9	8.2	8.0	0.25	5.95	6.79

Tabla C12. Medidas de la artesa o tundish mediante los cálculos desarrollados.



## C.2. PROTOTIPO PROPUESTO.

Los estudios de modelos hidrodinámicos en la Industria Siderúrgica han tenido enorme importancia en la visualización de los chorros de metal fundido lo cual se ha dado esencialmente para el acero, no así para las aleaciones de aluminio cuya información disponible es muy escasa Debido a ello se carecía de valores que pudieran ser aplicados al caso específico del zinalco encontrándose los valores mostrados en la Tabla C21 Así los tres fluidos involucrados son el acero, agua y zinalco Comparando tales valores se ve que los valores del zinalco son mucho mas parecidos a los del agua que aquellos correspondientes al acero De esto se deduce facilmente que el agua puede representar eficazmente el comportamiento de los chorros de zinalco fundido

Parámetro	Agua (20[°C])	Acero (1600 [°C])	Zinalco (600 [°C])
Densidad [Kg/m <sup>3</sup> ]	1,000	7,014	5,400
Viscosidad cinemática (10 <sup>-6</sup> X [	1,006	87,0	0,333
Tensión superficial (10 <sup>-3</sup> X [N/m]	130,5	1,788 0	750 0

Tabla. C21. Datos de los fluidos involucrados en los modelos hidrodinámicos más importantes para cumplir con los criterios de justificación [55, 27,50].

Tales datos arrojaron los cálculos desarrollados en el Subcapitulo 8 1 4 en el cual se justifico la similitud hidrodinámica del prototipo y un modelo propuesto cuyos resultados se muestran a continuación de tal manera que se pueda hacer una estimación del comportamiento de nuestro sistema en cuestión

El modelo propuesto por S K Sinha, K M Godiwalla y C S Sivaramakrishnan es un tundish con dos strands (orificios de salida), (Fig. 64) del cual se considero unicamente la mitad del tundish para hacer la evaluación de comportamiento, ya que ambas porciones se comporta idénticamente Las dimensiones del arreglo se muestran en la Tabla C22. Como fluido se uso agua mezclada con álcali y el nivel del tundish se mantuvo constante En la parte media del recipiente se coloco un conducto de alimentación que lo abastecía de agua desde un contenedor de 50 litros Las paredes del tundish se hicieron de fibra de vidrio así como los obstáculos, a los cuales se les puso en diversas posiciones con la finalidad de evaluar su eficacia en cuanto a los siguientes aspectos

**Nota importante:** Con la finalidad de interpretar las posiciones de la inyección de liquido, nivel de liquido, colocación o presencia de diques o vertederos, etc vea cuidadosamente la simbología presentada en la Tabla C23, puesto que tales valores se usan en las Tablas C24 y C25.

- Se ha mencionado que la principal finalidad del tundish es aumentar el tiempo de permanencia del fluido antes de ser alimentado al molde, así una de las formas de mejorar este aspecto es colocar obstáculos tales como diques y vertederos que

prolongan la distancia que recorren los campos de líneas de flujo, lo cual se llevó a cabo fácilmente con ayuda de un cronometro que registró el tiempo de recorrido de las líneas de flujo, desde que salían del orificio del recipiente de alimentación hasta que llegaban a el orificio de salida. Esto se consiguió mediante la inyección de tinta a chorro constante en puntos estratégicos, formando líneas de flujo que son fáciles de visualizar. De tales observaciones se hicieron dibujos. En la Tabla C25 se muestran los resultados de tiempo de residencia para dos casos: alimentación desde el contenedor con tubo arriba del nivel de liquido del tundish (condición OEN) y con tubo sumergido (debajo del nivel, o condición SEN).

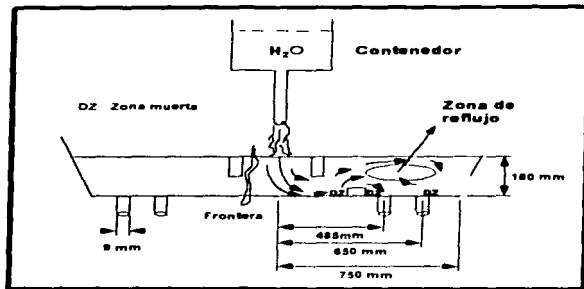


Fig. 64. Modelo hidrodinámico experimentado por S. K. Sinha y colaboradores.

- No obstante que la colocación de obstáculos es benéfica en la flotación de inclusiones provoca ciertos problemas menores tales como la creación de zonas muertas o zonas de reflujo que como ya se mencionó pueden llegar a tapan el orificio de descarga de los recipientes o bien generan desgaste en los refractarios según sea dicho por lo que los fabrican. Las variables utilizadas para la colocación de estos elementos se muestran en la Tabla C23 con las cuales se construyeron arreglos y sus resultados se registraron en la Tabla C25.
- Determinar la homogeneidad del liquido contenido en el recipiente, lo cual garantizara una temperatura aceptable en todas las zonas del liquido contenido. Para ello se inyectaba ácido a profundidades y localizaciones diferentes evaluando la cantidad de

dilución de esta sustancia en el agua tratada. Es decir, a mayor concentración de ácido en zonas específicas menor homogeneidad del líquido y viceversa. Esta medición se llevo a cabo determinando el Ph en base a un indicador para después hacer una evaluación por medio de un cromatografo. En la Tabla C24 se muestran los resultados de concentración.

Características	Medidas
Longitud	150 cm
Altura hidrostática	18 cm
Altura del tundish	20 cm
Capacidad Contén	55 Lt.
Orificio de salida	0 9 cm
Distancia del orificio de salida al chorro de salida	65 cm
Altura del vertedero	7 cm
Altura del dique	5 cm

**Tabla C22. Características del modelo propuesto por S. K. Sinha y colaboradores.**

De los eventos mostrados se encontró que la buza sumergida presenta mejores características de flujo dado que da lugar a mayor homogeneidad, evita la presencia de vórtices, agitación y turbulencia (verifique las columnas izquierda y derecha de la Tabla. C25) Así mismo se elige colocar únicamente un dique puesto que los vertederos tienen poca influencia en el tiempo de residencia del flujo.

En cuanto a la homogeneidad del flujo de las corrientes de líquido se escoge las medidas del experimento 5-30, A140 puesto que en este caso la concentración se efectuó en un corto tiempo (50 segundos) [Tabla C24 siendo prácticamente nula la diferencia de concentración entre el fondo y la superficie (denotado por una baja concentración de ácido en todas las zonas de flujo). Cabe destacar que para este evento se encontro un tiempo de trayectoria de las líneas de flujo de 30 segundos aproximadamente para una altura hidrostática de 12 centímetros, lo cual es uno de los valores más altos que se presentan con tales características.

Lista de símbolos	Significado o localización
Al <sub>0</sub> , Al <sub>20</sub> , Al <sub>40</sub> .	Inyección de ácido a 20, 10 y 0 cm desde la salida del contenedor, respectivamente.
B, S C <sub>41</sub> , C <sub>15</sub>	Localizaciones en el fondo y la superficie del tundish. Concentración en el fondo del tundish o en el fondo y superficie, respectivamente.
DI <sub>0</sub> , DI <sub>20</sub> , DI <sub>40</sub> .	Inyección de tinta cerca del orificio de salida, a 20 y 40 cm respectivamente
h <sub>D</sub> , d <sub>D</sub> , h <sub>w</sub> , D <sub>w</sub> .	Secuencia de configuración del tundish. Altura del dique - Distancia del dique - Altura del vertedero - Distancia del vertedero. Medidos desde la salida del contenedor respectivamente.
L <sub>12</sub> , L <sub>18</sub>	En ausencia de dique y vertedero.
NDNW	Caida de chorro del contenedor abierta.
OEN	Caida de chorro del contenedor sumergida.
SEN	Con dique y sin vertedero
WDNW	Con dique y vertedero.

Tabla C23. Variables usadas en el modelo hidrodinámico de S. K. Sinha y colaboradores.

A) Condición OEN (gr/N x 10 <sup>3</sup> )			Tiempo, s								
No.	Cond.	Localización	0	10	20	30	60	100	180	200	300
NDNW											
1	L <sub>12</sub>	B	11.22	28.84		27.80	10224	18167	50.73		
	Al <sub>10</sub>	S	11.22	83.1		1.2302	141.25	16469	27.1		
2	ALD	B	2.75	3.24		1100	1250	709	147	8.7	12.4
3	ALD	B	2.57	6.31		3.491	32366	10942	230		
NDWV											
4	ALD	B	4.70	10		12	18107	83117	9	7.1	
5	ALD	B	31.62	104		7.957	497.73	11024			
6	ALD	B	87.1	18020		2.9984	34873	22091	7413		
WDMW											
5-20-10, L <sub>12</sub>											
7	AL <sub>10</sub>	B	1.69	5.13	1.89	3.31	12.58		13.5	12	
	AL <sub>10</sub>	S	1.81	5.13	1.91	3.55	6.12	12.3	15.5	16	
8	AL <sub>10</sub>	B	2.65	2.82	2.83	2.83	16.9	28.84	24	24	18.2
	AL <sub>10</sub>	S	2.61	3.56	3.89	4.89	15.84	31.82	29.3	27	
9	AL <sub>10</sub>	B	6.3	6.02	5.95	20.89	724.4	1622	29.29	691	
	AL <sub>10</sub>	S	6.31	6.41	6.45	6.52	45.7	25.11	17.8	199	
WDMW											
5-40, L <sub>12</sub>											
10	AL <sub>10</sub>	B	7.04	7.08		7.19	10.0	7.08	10.5	33	
	AL <sub>10</sub>	S	7.04	5.89		11.22	40.7	47.96	30.8	35.5	
11	AL <sub>10</sub>	B	4.08	4.57		4.89	8.01	0.89	0.14	0.48	
	AL <sub>10</sub>	S	4.89	3.89		3.56	4.79	12.8	5.4	0.04	
12	AL <sub>10</sub>	B	2.24	29.8		3.831	1.999	8.28	1.737	67.6	
	AL <sub>10</sub>	S	2.24	2.51		2.58	3.47	52.48	83.1	94.0	
B) Condición SEN (gr/N x 10 <sup>3</sup> )			Tiempo, s								
No.	Cond.	Localización	0	10	20	30	60	100	200		
NDNW											
1	L <sub>12</sub>	B	2.34	2.34	2.45	2.57	2.61	2.61	2.61	2.61	
	AL <sub>10</sub>	S	2.34	3.18	2.65			2.75	2.62	2.57	
NDWV											
L <sub>12</sub>											
2	AL <sub>10</sub>	B	2.54	2.57		5.01	12.02	22.61	23.5		
	AL <sub>10</sub>	S	2.24	6.10		10	28.3	25.7			
3	AL <sub>10</sub>	B	13.18			12.89	169.9		120.2	20.0	
	AL <sub>10</sub>	S	13.18			28.92	154.6		160		
4	AL <sub>10</sub>	B	3.22	724.4		141.2	100		110.2	70.8	
	AL <sub>10</sub>	S	3.72	10		39.3	91.2		16.5		
WDMW											
5-40, L <sub>12</sub>											
5	AL <sub>10</sub>	B	2.19	3.72	3.02	4.9	15.39	16.5	19.56		
	AL <sub>10</sub>	S	2.19	7.59	7.59	21.38	16.5	20.98	15.84		
6	AL <sub>10</sub>	B	5.5	6.12		6.12	6.12	6.12	6.12	6.12	
	AL <sub>10</sub>	S	5.5	10.89	10.89	24.12	6.12	6.12	6.12	6.12	
7	AL <sub>10</sub>	B	14.12	15.85	15.85	4.72	170.4	161.81	85.12		
	AL <sub>10</sub>	S	14.12	34.07	34.07	14.12	141.81	161.81	75.81		
WDMW											
5-40 7-10, L <sub>12</sub>											
8	AL <sub>10</sub>	B	19.07	19.07	19.1	17.31	49.28	164.73			
	AL <sub>10</sub>	S	19.07	114.81	109.2	188.4	62.71	164.73	164.73		
11	ALD	B	5.04	2.61	2.61	2.61	2.61	2.61	2.61	2.61	
	ALD	S	5.04	2.61	2.61	2.61	2.61	2.61	2.61	2.61	

Tabla C24. Concentración del ácido como función del tiempo transcurrido bajo las condiciones SEN y OEN.

A) Condición OEN			B) Condición SEN		
Configuración del Tundish	Observaciones	Notas	Configuración del Tundish	Observaciones	Notas
<b>NDNW</b>			<b>NDNW</b>		
L <sub>18</sub> Al <sub>0</sub> , Al <sub>2</sub> , Al <sub>40</sub> C <sub>8</sub>	El pico de concentración se presenta más rápidamente en Al <sub>40</sub> , después Al <sub>20</sub> y por último Al <sub>0</sub> .	Flujo de corriente y aumenta el tiempo de residencia después de 40 seg.	L <sub>18</sub> Al <sub>0</sub> , Al <sub>20</sub> , Al <sub>40</sub>	El pico de concentración obtenido se presenta más rápidamente en Al <sub>40</sub> y Al <sub>60</sub> (60 s) que para Al <sub>0</sub> (100 s), así mismo, se presentó dilución gradual en todos los casos debido a la entrada de agua sin diluir.	El Flujo para Al <sub>20</sub> y Al <sub>40</sub> es idéntico en ambos y el tiempo de residencia es mayor que para Al <sub>0</sub> .
Al <sub>0</sub> C <sub>85</sub>	Los cambios de concentración en el fondo y la superficie presentan comportamiento idéntico; el pico de concentración en la superficie sigue presentándose más rápido (60 s después de la inyección de ácido) que para el fondo (40 s).	Turbulencia en OEN y flujo complejo.	Al <sub>40</sub> C <sub>85</sub>	Mayor concentración en el fondo que en la superficie; sin embargo, la diferencia disminuye con el tiempo llegando a su valor pico a los 50 s, luego disminuye gradualmente hasta el mínimo a los 100 s.	Los elementos flujo requieren más tiempo para alcanzar la superficie debido a el
L <sub>12</sub>	Pico de concentración a los 60 s en la superficie y de 40 s en el fondo.	Como arriba	L <sub>15</sub> Al <sub>0</sub> C <sub>8</sub>	Mayor concentración en el fondo que en la superficie. Máxima diferencia a los 100 s.	Los elementos de flujo alcanzan la superficie lentamente, se presenta poco tiempo de residencia y gran zona muerta.
<b>WDNW</b>			<b>WDNW</b>		
5-40 L <sub>12</sub> Al <sub>20</sub> C <sub>8</sub>	Amplia diferencia de concentración entre la superficie y el fondo (pico de concentración de 100 y 60 s respectivamente) permaneciendo invariable hasta los 200 s.	Poco tiempo de residencia	L <sub>18</sub> 5-30 Al <sub>0</sub> C <sub>8</sub>	Concentración en el fondo y la superficie aumenta gradual y similarmente hasta los 100 s.	Tiempo de residencia y mezcla mejorados.
Al <sub>40</sub> C <sub>85</sub>	Como arriba, excepto que el pico de concentración se presenta a los 10 s en la superficie y a los 150 s en el fondo.	Como arriba	L <sub>12</sub> Al <sub>20</sub> C <sub>8</sub>	Como arriba, excepto que el pico de concentración se presenta a los 100 s.	Buen tiempo de residencia.
			Al <sub>40</sub> C <sub>8</sub>	Máxima diferencia de concentración entre fondo y superficie a los 20 s.	Buen tiempo de residencia y mezclado.
			5-40 Al <sub>20</sub> C <sub>8</sub>	No se presenta diferencia entre la concentración de la superficie y el fondo, máxima concentración a los 50 s y posterior dilución.	Buen tiempo de residencia puesto que el dique se encuentra más cerca del orificio.
			5-30 L <sub>15</sub> Al <sub>40</sub> C <sub>8</sub>	Como arriba.	Como arriba.
<b>WDWW</b>			<b>WDWW</b>		
L <sub>18</sub> 5-40-7-10	Mayor concentración en la superficie que en el fondo y la diferencia de concentración entre estas dos zonas permanece constante hasta los 60 s después de haber hecho la inyección	Los elementos del fluido alcanzan la superficie lentamente; se presenta poco			

A) Condición OEN			B) Condición SEN		
Configuración del Tundish	Observaciones	Notas	Configuración del Tundish	Observaciones	Notas
NDNW			NDNW		
L <sub>18</sub> Al <sub>0</sub> , Al <sub>20</sub> , Al <sub>40</sub> Ca	El pico de concentración se presenta más rápidamente en Al <sub>40</sub> , después Al <sub>20</sub> y por último Al <sub>0</sub> .	Flujo de corriente y aumenta el tiempo de residencia después de 40 seg.	L <sub>18</sub> Al <sub>0</sub> , Al <sub>20</sub> , Al <sub>40</sub>	El pico de concentración obtenido se presenta más rápidamente en Al <sub>40</sub> y Al <sub>20</sub> (60 s) que para Al <sub>0</sub> (100 s), así mismo, se presentó dilución gradual en todos los casos debido a la entrada de agua sin diluir.	El Flujo para Al <sub>20</sub> y Al <sub>40</sub> es idéntico en ambos y el tiempo de residencia es mayor que para Al <sub>0</sub> .
Al <sub>0</sub> Ca <sub>5</sub>	Los cambios de concentración en el fondo y la superficie presentan comportamiento idéntico; el pico de concentración en la superficie sigue presentándose más rápido (60 s después de la inyección de ácido) que para el fondo (40 s).	Turbulencia en OEN y flujo complejo.	Al <sub>40</sub> Ca <sub>5</sub>	Mayor concentración en el fondo que en la superficie; sin embargo, la diferencia disminuye con el tiempo llegando a su valor pico a los 50 s, luego disminuye gradualmente hasta el mínimo a los 100 s.	Los elementos flujo requieren más tiempo para alcanzar la superficie debido a el
L <sub>12</sub>	Pico de concentración a los 60 s en la superficie y de 40 s en el fondo.	Como arriba	L <sub>15</sub> Al <sub>0</sub> Ca	Mayor concentración en el fondo que en la superficie. Máxima diferencia a los 100 s.	Los elementos de flujo alcanzan la superficie lentamente, se presenta poco tiempo de residencia y gran zona muerta.
WDNW			WDNW		
5-40 L <sub>12</sub> Al <sub>20</sub> Ca	Amplia diferencia de concentración entre la superficie y el fondo (pico de concentración de 100 y 60 s respectivamente) permaneciendo invariable hasta los 200 s.	Poco tiempo de residencia	L <sub>18</sub> 5-30 Al <sub>0</sub> Ca	Concentración en el fondo y la superficie aumenta gradual y similarmente hasta los 100 s.	Tiempo de residencia y mezcla mejorados.
Al <sub>40</sub> Ca <sub>5</sub>	Como arriba, excepto que el pico de concentración se presenta a los 10 s en la superficie y a los 150 s en el fondo.	Como arriba	L <sub>12</sub> Al <sub>20</sub> Ca	Como arriba, excepto que el pico de concentración se presenta a los 100 s.	Buen tiempo de residencia.
			Al <sub>40</sub> Ca	Máxima diferencia de concentración entre fondo y superficie a los 20 s.	Buen tiempo de residencia y mezclado.
			5-40 Al <sub>20</sub> Ca	No se presenta diferencia entre la concentración de la superficie y el fondo, máxima concentración a los 50 s y posterior dilución	Buen tiempo de residencia puesto que el dique se encuentra más cerca del orificio
			5-30 L <sub>15</sub> Al <sub>40</sub> Ca	Como arriba.	Como arriba
WDWW			WDWW		
L <sub>18</sub> 5-40-7-10	Mayor concentración en la superficie que en el fondo y la diferencia de concentración entre estas dos zonas permanece constante hasta los 60 s después de haber hecho la inyección, después de lo cual permanece con el mismo comportamiento que para Al <sub>0</sub> .	Los elementos del fluido alcanzan la superficie lentamente; se presenta poco tiempo de residencia y mayor circulación.			
Al <sub>20</sub>	Comportamiento contrario a Al <sub>0</sub>	Como arriba.			
L <sub>18</sub> 5-20-7-10 Al <sub>0</sub> Ca <sub>5</sub>	No se presenta diferencia significativa entre el fondo y la superficie.				
5-40-7-20 L <sub>12</sub> Al <sub>0</sub> Ca <sub>5</sub>	Amplia diferencia entre la concentración del fondo y de la superficie.				
L <sub>12</sub> Al <sub>20</sub> Ca <sub>5</sub>	Diferencia de concentración consistente entre la superficie y el fondo. Pico a los 100 s.	Mezclado pobre.			

Tabla C25. Concentración del ácido como función del tiempo transcurrido bajo las condiciones SEN y OEN.

	presentándose más rápido (60 s después de la inyección de ácido) que para el fondo (40 s).			gradualmente hasta el mínimo a los 100 s.	
L <sub>12</sub>	Pico de concentración a los 80 s en la superficie y de 40 s en el fondo.	Como arriba	L <sub>15</sub> A <sub>0</sub> C <sub>8</sub>	Mayor concentración en el fondo que en la superficie. Máxima diferencia a los 100 s.	Los elementos de flujo alcanzan la superficie lentamente, se presenta poco tiempo de residencia y gran zona muerta.
<b>WDNW</b>			<b>WDNW</b>		
5-40 L <sub>12</sub> A <sub>20</sub> C <sub>8</sub>	Amplia diferencia de concentración entre la superficie y el fondo (pico de concentración de 100 y 60 s respectivamente) permaneciendo invariable hasta los 200 s.	Poco tiempo de residencia	L <sub>18</sub> 5-30 A <sub>0</sub> C <sub>8</sub>	Concentración en el fondo y la superficie aumenta gradual y similarmente hasta los 100 s.	Tiempo de residencia y mezcla mejorados.
A <sub>40</sub> C <sub>8</sub>	Como arriba, excepto que el pico de concentración se presenta a los 10 s en la superficie y a los 150 s en el fondo.	Como arriba	L <sub>12</sub> A <sub>20</sub> C <sub>8</sub>	Como arriba, excepto que el pico de concentración se presenta a los 100 s.	Buen tiempo de residencia.
			A <sub>40</sub> C <sub>8</sub>	Máxima diferencia de concentración entre fondo y superficie a los 20 s.	Buen tiempo de residencia y mezclado.
			5-40 A <sub>20</sub> C <sub>8</sub>	No se presenta diferencia entre la concentración de la superficie y el fondo, máxima concentración a los 50 s y posterior dilución.	Buen tiempo de residencia puesto que el dique se encuentra más cerca del orificio.
			5-30 L <sub>15</sub> A <sub>40</sub> C <sub>8</sub>	Como arriba.	Como arriba.
<b>WDNW</b>					
L <sub>18</sub> 5-40-7-10	Mayor concentración en la superficie que en el fondo y la diferencia de concentración entre estas dos zonas permanece constante hasta los 60 s después de haber hecho la inyección, después de lo cual permanece con el mismo comportamiento que para A <sub>20</sub> .	Los elementos del fluido alcanzan la superficie lentamente; se presenta poco tiempo de residencia y mayor circulación.			
A <sub>20</sub>	Comportamiento contrario a A <sub>0</sub>	Como arriba.			
L <sub>18</sub> 5-20-7-10 A <sub>0</sub> C <sub>8</sub>	No se presenta diferencia significativa entre el fondo y la superficie.				
5-40-7-20 L <sub>12</sub> A <sub>0</sub> C <sub>8</sub>	Amplia diferencia entre la concentración del fondo y de la superficie.				
L <sub>12</sub> A <sub>20</sub> C <sub>8</sub>	Diferencia de concentración consistente entre la superficie y el fondo. Pico a los 100 s.	Mezclado pobre.			

Tabla C25. Concentración del ácido como función del tiempo transcurrido bajo las condiciones SEN y OEN.



			$C_8$	fondo y superficie a los 20 s.	Buen tiempo de residencia y mezclado.
			5-40 $A_{20}$ $C_8$	No se presenta diferencia entre la concentración de la superficie y el fondo, máxima concentración a los 50 s y posterior dilución.	Buen tiempo de residencia puesto que el dique se encuentra más cerca del orificio.
			5-30 $L_{15}$ $A_{20}$ $C_8$	Como arriba.	Como arriba.

WDDWW

$L_{15}$ 5-40-7-10	Mayor concentración en la superficie que en el fondo y la diferencia de concentración entre estas dos zonas permanece constante hasta los 60 s después de haber hecho la inyección, después de lo cual permanece con el mismo comportamiento que para $A_0$ .	Los elementos del fluido alcanzan la superficie lentamente; se presenta poco tiempo de residencia y mayor circulación.	
$A_{20}$	Comportamiento contrario a $A_0$ .	Como arriba.	
$L_{18}$ 5-20-7-10 $A_0$ $C_{85}$	No se presenta diferencia significativa entre el fondo y la superficie.		
5-40-7-20 $L_{12}$ $A_0$ $C_{85}$	Amplia diferencia entre la concentración del fondo y de la superficie.		
$L_{12}$ $A_{20}$ $C_{85}$	Diferencia de concentración consistente entre la superficie y el fondo. Pico a los 100 s.	Mezclado pobre.	

Tabla C25. Concentración del ácido como función del tiempo transcurrido bajo las condiciones SEN y OEN.

# CAPITULO X

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este documento se ha desarrollado la aplicacion de la Ingenieria mecanica-electrica a un proyecto de colada continua mediante lo cual contribuyo a aumentar los conocimientos y criterios a la solucion de un problema concreto

El tema es de relevancia e importancia estrategica para el desarrollo de Mexico ya que representa una gran reduccion de los costos de producción y aumento de la calidad. Esto se ve aun mas favorecido con una aleacion relativamente nueva, el Zinalco el cual ha demostrado tener innumerables ventajas como el ahorro de energia calorifica y la minimizacion de pasos posteriores a la colada continua, sin embargo, su baja tension superficial requiere poner mucho cuidado en el manejo de los refractarios y paradójicamente, su baja tendencia a perder energia calorifica (que lo hace benefico en el sistema dosificador) es una desventaja en la velocidad de enfriamiento en el molde y por consiguiente la velocidad de producción. Tal situación es un reto para desarrollar pruebas de enfriamiento que aumenten la velocidad de la colada sin alterar o perjudicar tanto la operacion como las operaciones posteriores comunes. Si se logra obtener productos de Zinalco a altas velocidades de produccion las consecuencias serian de amplio beneficio para Mexico puesto que tales productos estarian preparados para tener un procedimiento secundario tal como extrusion, inyeccion o laminación, lo cual significaria una entrada sustanciosa de divisas y el buen aprovechamiento del zinc. Como vision a futuro se podria experimentar con piezas de seccion mediana y grande de productos de Zinalco lo cual ampliaria aun mas el mercado del zinalco.

Mediante el acoplamiento del sistema dosificador con el molde se han logrado relacionar todos los elementos de la máquina de colada semicontinua para conseguir la continuidad en la operacion. Por lo cual se espera la menor cantidad de interrupciones o estrangulaciones en el flujo lo cual disminuye sensiblemente la cantidad de perdidas de calor junto con una eficiente separacion de la escoria lo cual se comprobo a traves de un experimento que resulto tener similitud con el sistema real, con lo cual se consigo optimizar el sistema.

La velocidad de extraccion escogida es de 6 milímetros segundo lo cual coincide con el rango de velocidades del sistema propuesto por Antonio Cortes Martinez en su tesis titulada "Sistema de traccion para una colada semicontinua", desarrolla paralelamente a la presente.

La cabina de calefaccion de la cuchara en cuanto a su forma no ha sido probada ya que al aumentar el numero de aristas y orillas aumentan las perdidas de calor, sin embargo, se espera que su forma octagonal favoreciera la mejor distribucion de calor hacia el recipiente.

Como seguimiento a través del desarrollo del proyecto se advierte que falta por determinar el centro de carga y la longitud de los conductores de alimentación así como sus protecciones eléctricas y longitud de los termopares. De igual manera determinar el espesor óptimo de los accesorios de tal manera que puedan precalentarse con la menor cantidad de calor y tengan buena resistencia mecánica, ello debido a que se requieren hacer estudios más profundos, por tal motivo se insta a optimizar este aspecto en estudios posteriores.

Como conclusión general puede afirmarse que los defectos de calidad que tienen su origen en el incorrecto diseño de un sistema dosificador son la mala separación, o generación de inclusiones no metálicas, así como también la relación con las etapas adicionales del sistema, es decir sistema de arrastre y enfriamiento. La eficiencia del sistema en su conjunto se podrá evaluar como la disminución de defectos en el producto obtenido, tales como generación o presencia de inclusiones no metálicas, existencia de porosidades, rotura o formación de pliegues o esfuerzos residuales, segregación y percances en la operación.

# INDICE

MATERIA	Pág.
<b>INTRODUCCION</b>	<b>1</b>
<b>APARTADO PRIMERO. "SURGIMIENTO DE LA NECESIDAD"</b>	<b>3</b>
1.1. JUSTIFICACION DEL PROBLEMA..	3
1 1 1 Ambito mundial de la Colada Continua y de los productos no ferrosos	3
1 1 2 Mercado nacional de los productos de aluminio	4
1 1 2 1 Produccion Nacional e infraestructura	4
1 1 2 2 Importaciones	7
1.2. FORMULACION DEL PROBLEMA.	7
<b>APARTADO SEGUNDO. "ANALISIS DEL PROBLEMA".</b>	<b>8</b>
<b>CAPITULO I. LA COLADA CONTINUA DE LOS METALES NO FERROSOS.</b>	<b>9</b>
1.1. HISTORIA DE LA COLADA CONTINUA.	9
1.2. EVOLUCION DE LA COLADA CONTINUA.	10
1 2 1 Aumento de la calidad	11
1 2 2 Aumentar la versatilidad de la Colada Continua	11
1.3. LIMITACIONES Y VENTAJAS DE LA COLADA CONTINUA.	11
1 3 1 Punto de vista operacional	12
1 3 1 1 Metodo de colada en molde permanente	13
1 3 1 2 Metodo de Colada Continua	13
1 3 2 Punto de vista metalurgico	14
1 3 2 1 Metodo de colada por moldes	14
1 3 2 2 Metodo de Colada Continua	14
1.4. CONCEPTO PRINCIPAL DE LA COLADA CONTINUA.	15
1.5. METODOS DE COLADA CONTINUA PARA METALES NO FERROSOS DE BAJO PUNTO DE FUSION.	17
1 5 1 Tipos de maquinas de Colada Continua Directa	17
1 5 1 1 Colada Continua Vertical	18
1 5 1 2 Colada Semicontinua	19
1 5 1 3 Colada Continua Curva	20
1 5 1 4 Colada Continua Horizontal	21
1 5 2 Metodos de colado continuo en molde movil	22
1 5 2 1 Maquinas de colar de banda flexible sin fin	22
1 5 2 2 Maquinas de bandas articuladas y de cintas lisas sin fin	26
1 5 2 3 Maquinas de Colada Continua entre rodillos	27

<b>MATERIA</b>		<b>PAG.</b>
<b>CAPITULO II.</b>	<b>FUNCIONES PRINCIPALES DEL SISTEMA DOSIFICADOR</b>	<b>31</b>
<b>2.1.</b>	<b>LIMPIEZA Y SEPARACION DE INCLUSIONES NO METALICAS.</b>	<b>31</b>
2 1 1	Desgasificación	32
2 1 2	Separación de materias extrañas	32
2 1 2 1	Fuentes de humedad	32
2 1 2 2	Origen de la matena prima	32
2 1 2 3	Ataque del metal fundido a los materiales en contacto durante la operación	33
2 1 2 4	Suciedad de los recipientes	33
2 1 2 5	Filtrado y elección de fundentes	34
<b>2.2.</b>	<b>ADICION DE COMPONENTES ALEANTES</b>	<b>35</b>
<b>2.3.</b>	<b>CONTROL DE TEMPERATURA DEL FLUJO CONTINUO.</b>	<b>36</b>
2 3 1	Control de calidad del producto obtenido	36
2 3 2	Operación de la Colada Continua	36
<b>2.4.</b>	<b>TAPONAMIENTO U OBSTRUCCION DE LA BOQUILLA DE DRENADO.</b>	<b>36</b>
2 4 1	Tamaño de las partículas de alumina	38
2 4 2	Operación de la Colada Continua	38
2 4 3	Flujo turbulento a través de la boquilla	41
<b>2.5.</b>	<b>MANTENER EL NIVEL Y VELOCIDAD CONSTANTES EN LA ALIMENTACION DEL MOLDE.</b>	<b>41</b>
2 5 1	Restricción del flujo mediante válvulas	43
2 5 1 1	Válvula de lanza	44
2 5 1 2	Válvula deslizante	44
2 5 1 3	Válvula de giro	45
2 5 2	Variación de la extracción de los rodillos	45
2 5 3	Variación de las condiciones de oscilación en el molde	46
<b>2.6.</b>	<b>CHORRO DE ALIMENTACION EN EL MOLDE.</b>	<b>47</b>
2 6 1	Evitar la oxidación del chorro de metal desahuyente	47
2 6 2	Evitar que el chorro tenga contacto con la escoria	47
2 6 3	Favorecer la turbulencia en el molde	48
2 6 4	Favorecer la difusividad entre componentes, así como homogeneizar la temperatura del líquido contenido	49
2 6 5	Favorecer la flotación de escorias	50
<b>2.7.</b>	<b>DOSIFICACION Y SEGURIDAD.</b>	<b>50</b>
<b>CAPITULO III.</b>	<b>LAS ALEACIONES MAS USADAS EN MEXICO</b>	<b>51</b>
<b>3.1.</b>	<b>EL COMPORTAMIENTO DEL ALUMINIO EN LA COLADA CONTINUA.</b>	<b>51</b>
3 1 1	Comportamiento en el sistema dosificador	52
3 1 1 1	Tendencia a la formación de inclusiones no metálicas	52
3 1 1 2	Control de temperatura del metal líquido	52
3 1 1 3	Control de nivel y velocidad de alimentación	52
3 1 2	Comportamiento en pruebas experimentales	54

<b>MATERIA</b>	<b>PAG.</b>
<b>3.2. COMPORTAMIENTO DEL ZINCO EN LA COLADA CONTINUA.</b>	<b>55</b>
3 2 1 Comportamiento en el sistema dosificador	57
3 2 1 1 Tendencia a la formacion de inclusiones	57
3 2 1 2 Manera de llevar a cabo la fusión	58
3 2 2 Comportamiento en pruebas experimentales	59
3 2 2 1 Prueba uno	59
3 2 2 2 Prueba dos	60
3 2 2 3 Prueba tres	62
3 2 2 4 Prueba cuatro	62
<b>CAPITULO IV. LOS REFRACTARIOS EN EL SISTEMA DOSIFICADOR</b>	<b>64</b>
<b>4.1. REFRACTARIOS PARA NO FERROSOS.</b>	<b>64</b>
4 1 1 Clasificación	65
4 1 1 1 Comportamiento químico	65
4 1 1 2 Presentación física	65
<b>4.1.2. CARACTERISTICAS DE REFRACTARIOS PARA NO FERROSOS.</b>	<b>67</b>
4 1 2 1 Familia de la sílice	67
4 1 2 2 Familia de la arcilla	68
4 1 2 3 Familia de la alta alumina	69
4 1 2 4 Familia de la magnésita	70
4 1 2 5 Familia del cromo	71
4 1 2 6 Familia del carbono	71
4 1 2 7 Familia del carburo	72
<b>4.2. PROCESO DE FABRICACION DE UNA PIEZA REFRACTARIA</b>	<b>73</b>
<b>4.3. COMPORTAMIENTO EN EL SISTEMA DOSIFICADOR</b>	<b>74</b>
4 3 1 Recipientes del sistema	74
4 3 1 1 Detenido	75
4 3 2 Accesorios	76
4 3 2 1 Características de operación	77
4 3 2 2 Características de material	78
<b>APARTADO TERCERO "GENERACION DE ALTERNATIVAS DE SOLUCION".</b>	<b>80</b>
<b>CAPITULO V. DETERMINACION DE LOS RECIPIENTES</b>	<b>82</b>
<b>5.1. CARACTERISTICAS DE FORMA Y MAGNITUD</b>	<b>82</b>
5 1 1 Volumen en bulto del metal fundido	82
5 1 2 Determinación de las medidas de los recipientes	84
5 1 2 1 Cuchara	85
5 1 2 2 Artesa	87
<b>5.2. CARACTERISTICAS DE FLUJO</b>	<b>89</b>

<b>MATERIA</b>		<b>PAG.</b>
<b>5.3.</b>	<b>MODELOS EXPERIMENTALES.</b>	<b>93</b>
5 3 1	Justificación	93
5 3 2	Aplicación	95
5 3 2 1	Formación de vórtices	95
5 3 2 2	Separación de inclusiones no metálicas	97
5 3 3	Elementos para proponer un modelo	99
<b>5.4.</b>	<b>DETERMINACION DE CHAPA Y LAS CARACTERISTICAS PARA SU DESARROLLO.</b>	<b>101</b>
5 4 1	Materia y espesor de la chapa	101
5 4 1 1	Víola cónica	101
5 4 1 2	Artesa	102
<b>CAPITULO VI.</b>	<b>CONTROL DE TEMPERATURA EN EL SISTEMA DOSIFICADOR.</b>	<b>105</b>
<b>6.1.</b>	<b>AISLAMIENTO TERMICO</b>	<b>106</b>
6 1 1	Consideraciones para elegir el material	106
6 1 2	Determinación de la carga térmica a aportar	106
6 1 2 1	Régimen permanente	107
6 1 2 2	Régimen transitorio	114
6 1 3	Espesor del aislamiento térmico necesario	117
<b>6.2.</b>	<b>ELEMENTOS DE APORTACION DE CALOR</b>	<b>118</b>
6 2 1	Características principales de las resistencias eléctricas	119
6 2 1 1	Temperatura de trabajo	119
6 2 1 2	Duración	119
6 2 1 3	Comportamiento químico	120
6 2 1 4	Presentación comercial	120
6 2 2	Determinación de los elementos de calentamiento	120
6 2 3	Conexión de resistencias	122
6 2 3 1	Conexión en serie	122
6 2 3 2	Conexión en paralelo	122
6 2 3 3	Conexión en sistema trifásico	123
<b>6 3</b>	<b>INTEGRACION DEL SISTEMA.</b>	<b>125</b>
<b>CAPITULO VI.</b>	<b>DETERMINACION DE REFRACTARIOS.</b>	<b>129</b>
<b>7.1.</b>	<b>AISLAMIENTO TERMICO</b>	<b>129</b>
<b>7.2.</b>	<b>ACCESORIOS</b>	<b>130</b>
7 2 1.	Fabricación de accesorios	131
7 2 1 1	Prensado	131
7 2 1 2	Apisonado	133
7 2 1 3	Extrusión	135
7 2 2	Análisis de comportamiento	135
7 2 2 1	Análisis de los efectos provocados por temperatura	136
7 2 2 2	Análisis de enfriamiento	141

<b>MATERIA</b>		<b>PAG.</b>
7.2.3	Características del mecanismo de accionamiento de la válvula	143
7.2.3.1	métodos de accionamiento de la válvula	143
7.2.3	Correlación entre la buza sumergida y las características del molde	143
<b>APARTADO CUARTO: "EVALUACION Y DESICION".</b>		<b>80</b>
<b>CAPITULO VIII. EVALUACIÓN DE LAS SOLUCIONES.</b>		<b>148</b>
<b>8.1.</b>	<b>AISLAMIENTO TERMICO</b>	<b>148</b>
8.1.1.	Medidas de los recipientes	148
8.1.1.1	Cuchara	149
8.1.1.2	Tundish	149
8.1.2	Características de descarga	150
8.1.3	Condiciones de operación	152
8.1.4	Modelo propuesto	154
8.1.5	Espesor de la chapa y desarrollo de los recipientes	155
<b>8.2.</b>	<b>DESARROLLO DEL SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA.</b>	<b>157</b>
8.2.1	Interacciones de calor en los recipientes	158
8.2.1.1	Coefficientes de convección en las paredes	158
8.2.1.2	Flujo de calor en la superficie	162
8.2.1.3	Espesor de los aislamientos	164
8.2.1.4	Flujo de calor a través de las paredes	165
8.2.1.5	Examen en estado transitorio del metal fundido	166
8.2.2	Coefficientes de convección en las paredes de la cabina	158
8.2.2.1	Paredes interiores	170
8.2.2.2	Paredes exteriores	170
8.2.2.3	Espesor adecuado del aislamiento	171
8.2.3	Balanza de energía	173
8.2.4	Características de los elementos de calefacción y distribución	173
8.2.5	Protecciones, controles y alimentación	177
<b>APARTADO QUINTO: "ESPECIFICACION DE LA SOLUCION".</b>		<b>179</b>
<b>CAPITULO IX. SOLUCION DETALLADA.</b>		<b>179</b>
<b>9.1.</b>	<b>FABRICACION DE LA CHAPA-</b>	<b>179</b>
<b>9.2.</b>	<b>INSTALACION Y SELECCION DE REFRACTARIOS.</b>	<b>180</b>
9.2.1	Selección de materiales	180
9.2.1.1	Tubos sumergidos	180
9.2.1.2	Boquillas	181
9.2.1.3	Rodillo-tapón	181
9.2.1.4	Dique y flotador	181
9.2.2	Fabricación	181
9.2.2.1	Revestimientos	182
9.2.2.2	Accesorios	182



<b>MATERIA</b>		<b>PAG.</b>
<b>9.3.</b>	<b>INSTALACION DE LA CABINA</b>	<b>182</b>
<b>9.4.</b>	<b>RECOMENDACIONES DE OPERACION</b>	<b>184</b>
<b>9.5.</b>	<b>PRÉSUPUESTO.</b>	<b>185</b>
<b>9.6.</b>	<b>PLANOS.</b>	<b>187</b>
Plano 1	Ensamble general	188
Plano 2	Vista seccional de la cuchara	189
Plano 3	Vista seccional del tundish	190
Plano 4	Aislamientos de la cuchara	191
Plano 6	Accesorios y revestimientos de la cuchara	192
Plano 7	Accesorios para tundish y revestimientos	193
Plano 8	Desarrollo de recipientes	194
Plano 9	Vanilla seguidora y pieza tubular	195
Plano 10	Soporte para pieza tubular	196
Plano 11	Travesaño e inserto de metal	197
Plano 12	Control y conexiones para calefacción	198
<b>APENDICES</b>		
<b>APENDICE A.</b>	<b>TABLAS Y GRAFICAS PARA DETERMINAR LOS RECIPIENTES.</b>	<b>199</b>
<b>APENDICE B.</b>	<b>TABLAS Y GRAFICAS PARA DETERMINAR EL CONTROL DE TEMPERATURA.</b>	<b>200</b>
<b>APENDICE C.</b>	<b>DATOS PARA ANALISIS HIDRAULICO.</b>	<b>209</b>
<b>CAPITULO X.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.</b>	<b>217</b>
<b>INDICE.</b>		<b>219</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.</b>		<b>225</b>

## BIBLIOGRAFIA

- 1 - "Los aceros en chapas delgadas", Jean Pierre Birat *Mundo científico*, Vol 12, 1992  
Pág 309.
- 2 - "El aluminio en Latinoamérica Torres villaseñor Gabriel. Análisis del estado de la industria del aluminio y sus recursos tecnológicos en Latinoamérica", O E A, México, 1981, Pág 208-255
- 3 - Apuntes de la materia de diseño de maquinas Huitrón Marquez Ismael ENEP Aragón, 1995
- 4 - Fabricación del hierro, acero y fundiciones (Vol II) Apraiz Jose Barreiros Ed Urmo, España, 1984 Pág 679-705.
- 5 - Enciclopedia del aluminio Pierre Barrand y Robert Gadeau Ed Urmo, España, 1a Ed, 1968 Pág 13-21, 202-255
- 6 - Continuous casting of Non-ferrous metals and alloys H D Merchant y D E Tyler, Ed Minerals, Metals, and Materials Society, USA 1a ed, 1989 Págs 2, 3 y 91
- 7 - Metals Handbook (Vol 15) Ed ASM International 9a ed, 1988
- 8 - "Reviews of some of the latest equipment and instalations around the world" R C Bland *Metallurgia*, No 7, 1981
- 9 - "Effect of some of varying ladle stream temperature on the melt flow and heat tranfer in continuous casting of tundishes" Sanjib Chakraborty & Yoseshwar Sahay, *ISIJ* No 9, 1991, Pág 960
- 10 - "Mathematical modeling of inclusion transport and removal in continuous casting" Asish Komar Sinha & Yoeshwar Sahai *ISIJ international* Vol 33, No 5 Pág 556-566
- 11 - "Full automatic casting control system at Chiba No. 3 continuous casting Kawasaki Steel Corp "(abstracto) *ISIJ*, Vol 21, No 10, 1981 Pág [B-277]
- 12 - "Effect of fluid flow characteristics on nozzle blockage in aluminium killed steels" F G Wilson & M J Heeson *Ironmaking and steelmaking*, Vol 22 No 12, 1982 Pág
- 13 - "A new electrode-type mold level sensor for continuous casting machine" Hiroshi Imada y Yoshitaka Nikimura, *ISIJ*, Vol 22, No 12, 1982
- 14.- "Mechanical Vibration and noise analysis in a continuous casting machine", Takashi Mitsuhiro, *ISIJ*, Vol 22, No 11

- 15.- " Los diferentes procedimientos de vaciado y colada del bronce en barras sólidas y huecas". Felix Aranj. Moldeo y fundición, Año 9, No. 53, 1987.
- 16.- La colada continua del acero. Dr. Ing. Jobst Thomas Wasmuht. Instituto Latinoamericano del hierro y el acero, Chile. 1a. ed, 1976.
- 17.- Continuous casting of steel. H. E. Allen, & Watts y R. Hadden. Ed. TMS, U.K., 1977.
- 18.- Solidification and casting of metals. F. Weinberg. ed. TMS, U. K., 1979.  
"Continuous casting of aluminium" International Metals Reviews". Vol 21. No. 9, 1976.
- 19.- Continuous Casting of aluminium" International Metals Reviews, Vol 21. No. 9, 1976.
- 20.- " Two dimensional model for twin continuous casting ", T Saito, H Hojo Metalurgical Transactions. Vol. 20B, No. 3, 1989. Pág.
- 21.- Manual del aluminio. W. Fugnagel, Ed. Reverte, España, 2a. ed, 1972.
- 22.- Técnicas de Metalurgia experimental. A. U. Seybolt. Ed. Limusa-Wiley, México. 1a. Ed, 1989. Pág. 114-121, 192-194.
- 23.- "Propiedades mecánicas de las aleaciones Zn-Al-Cu obtenidas por colada semicontinua" (Tesis). Rene Hugo Espinoza Melendrez. UNAM, 1989. Pág 38 - 112.
- 24.- "Mechanical properties of solidifying shells of alluminium". Metalurgical Transactions of AFS. Vol. 101, 1993 (Anual). Pág 680.
- 25.- "Defectos superficiales de colada semicontinua de barras de aluminio de sección pequeña" (Tesis). Daniel Uribe Hernandez, UNAM, 1984. Pág 27-77
- 26 - Recent Desing developments of vertical continuous casting of the Bohler Kapfenberg plant". R. Baker Ironmaking and steelmaking. Vol 8. No 5, 1981. Pág 222-223.
- 27 - "Aspectos operacionales de la colada continua y su influencia en la obstrucción de las boquillas de distribuidores". (Tesis) Gerardo Cerecedo Diego UNAM, 1989. Pág 24-49, 73-76
- 28 - "Vortex formation during drainage of metallurgical vessels". P. Hammerschmid, L. Weber, M. Dubke & K. Schwerdtfeger. Ironmaking and steelmaking" Vol. 11, N°. 6, 1984. Pag. 332-336.

- 29.- "Fenomena occurring during drainage of metallurgical and development of surface waves". M. Dubke y K. Schwerotfeger. Ironmaking and steelmaking. Vol 17, nº. 3, 1990. Pág. 184-191.
- 30.- "The main issues of continuous casting". I. M. Halliday. Journal of Metals No 9, 1965. Pág. 184-191
- 31.- Continuous casting refractories for improved and quality performance". N. A. Mc Pherson, S. J. Lee, G. J. Roberts y J. Purdie. Ironmaking and steelmaking. Vol 17, No. 1, 1990.
- 32.- Enciclopedia Kirk de ingeniería química (Vol VI). Ed. UTHEA. 18a ed. España 3a. Ed., 1978. Pág. 639-670
- 33.- Cerámica industrial (Vol. II). Felix Singer. Ed. Urmo, España. 1a. ed. 1971
- 34.- Siderurgia (Vol I) F. Aranguren, A. mallol. Ed. Dossat, España. 1a. ed. 1971. Pág. 217-233.
- 35.- "El desarrollo y desenvolvimiento de refractarios secos en hornos de inducción eléctricos y otras aplicaciones". Moldeo y fundición, México. año 8, No. 44, abril 1986. Pág. 37 y 38.
- 36.- Manual de refractories. De American Foundrymen's society Inc. E. U., 1989. Pág. 3 - 15.
- 37.- Manual Marks del ingeniero mecánico. (Vol. I), Ed. Mc Graw Hill, México 1a ed. 1984. Pág.
- 38.- Cerámica industrial (Vol. III). Felix Singer, Sonja singer. Ed. Urmo, España, 1a. ed. 1971. Pág. 200-251.
- 39.- Refractarios Northon Ed. Urmo, España. 1a. ed. 1970
- 40.- Diccionario de materiales y procesos de ingeniería (vol II), Ed. Labor. España, 1a ed. 1988.
- 41.- Modern ceramic engineering. David W. Richeson, Ed. Marcel Denker Inc. 1a ed. 1982. Pág.
- 42.- Introducción a la técnica cerámica. Paul Rado. Ed. Omega, España. 1a ed. 1988.
- 43.- Curso práctico de la cerámica (Vol. I y IV). Jorge Fernández Chiti. Ed. Condorhuasi, Chile, 6a. ed. 1990.

- 44 - "El zinalco y la fundición". Zinalco y fundición Año 9, vol 51, jun 1987  
Thorpe's dictionary of applied chemistry (vol 10), de Logman's green Co LTD. 4a ed.,  
1955 Pag
- 45 - "Diseño de máquinas de colada continua para aleaciones de Zn- Al- Cu" Doctor  
Gabriel torres Villaseñor, Ing Arturo Hernandez Vazquez VI encuentro de investigación  
metalurgica Instituto tecnológico de Saltillo Nov 21-23, 1984
- 46 - Zinc Handbook Frank Porter Ed Marcel decker Inc, 1991, USA  
Pag 39-43, 497- 501.
- 47 - "Diseño de máquinas de Colada Continua para aleaciones de Al-Zn-Cu" VI  
encuentro de investigación metalurgica Instituto tecnológico de Saltillo Nov 21-23,  
1984 Doctor Gabriel Torres Villaseñor, J Montemayor Aldrete Pag 74-98
- 48 - Microestructura y propiedades mecánicas de la aleación zn-22% peso, Al-2% peso  
Cu obtenida por colada semicontinua" J Hinojosa Torres, J Montemayor Aldrete y G  
Torres Villaseñor Revista mexicana de fisica No 1, 1991 Pág
- 49 - "Microestructuras obtenidas por colada semicontinua de zinalco" (Tesis) David  
castañeda rosas UNAM, 1993 Pag 18-42
- 50 - Fundamentos de flujo de fluidos en procesamiento de metales Juan Szekely Ed  
Limusa, mexico, 1a ed, 1989 Pag 41, 44 - 47, 277
- 51 - Open Hearth procedings Ed The metallurgical society of AIME, USA Vol 57, 1977  
Pag 116-121.
- 52 - Powder Metallurgy equipment manual 1a ed 1968 USA Pág
- 53 - Development of high zircon castable por high temperature steel teeming ladles  
(abstracto) Hisaki Kato, Maaki Nishi & Shigetard Uchida, ISIJ Vol 23, No 3
- 54 - Refractories for iron and steelmaking J H Chesters Ed TMS, 1974 Pág 287-352.
- 55.- Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas Claudio Mataix Ed Harla, México, 2a.  
ed., 1982. Pags 13-30, 95, 125-127, 190-186
- 56.- Transport phenomena in Metallurgy G. H Gerger & D R Poirier, Ed Addison  
Wesley Co, USA 1a., ed, 1973, Pág. 117 -137
- 57.- Manual de recipientes sujetos a presión Eugene F Megyesy Ed Limusa, México,  
1a ed, 1990, Pág. 20-26, 142-185.

- 58 - "Effect of chemical composition of mold powder of submerged nozzles for Continuous Casting of steel" Yukihiko Nakamura, Teichi Ando y colaboradores ISIJ Vol 26, No 12 Diciembre de 1986 Pag [1052-1058]
- 59 - *Transferencia de calor* B. V. Karlekar, R. M. Desmond Ed Interamericana, México 2a Ed. 1986
- 60 - *Ingeniería de los procesos de colada continua* VII Curso Internacional de Siderurgia Morelia, Michoacan Mexico, Noviembre de 1995
- 61.- *The effect of tundis on the fluid flow and mixing a modeling study* Metallurgical Transactions B Vol 18B No 1 Marzo de 1987
- 62 - *Removal of No metallic inclusions from Aluminum-killed steels through ceramic filters* Yoshio Nuri, Kazusige Umezawa, Teturo Ohashi Transactions ISIJ Vol 20, No 6
- 63 - *The role of natural convection in tundish control in Continuous Casting* J Sekely and J H Chen Journal of metals Abril de 1982 Vol 34 No 4, Revista mensual
- 64 - "Mathematical modelling transport phenomena in Continuous Casting tundishes, part. 1. "Transient effects during ladle transfer operations" S Chakraborty & colaboradores Ironmaking and Steelmaking, 1992 Vol. 19, No 6 Pág 479-480
- 65 - *Electrotermia industrial* Instituto de electrotermia de Eshen 1a ed. 1972 Ed URMO, España Pag 31-122
- 66 - *Manual practico de electricidad para ingenieros (Vol. II)* Donald G Fink, H Wayne Beaty Ed Reverte, 1a ed. 1984 España Pag 22-2 hasta la 22-58
- 67 - *Mecánica de materiales* Gere Timoshenko 2da ed Ed Interamericana México 1984 Pag
- 68 - *Calderería técnica (T I)* Nicolas Larburn Arrizabalaga Ed Paraninfo 1a Ed 1979 España Pags 90-95
- 69 - *Tecnología de la calderería (T I)* Ch Lobjois Ed CEAC, 1a ed, 1980 Pag
- 70 - *Nueva enciclopedia autodidáctica Quillet (Vol II)* Ed Cumbre Mexico, 1a ed, 1990
- 71.- *Cerámica fina* Norton, Ed Labor, España, 1968 1a ed
- 72.- *Magnesite refractories toslag line of steel teeming ladle* ISIJ (abstracto), Pag [B-92]
- 73.- *Folleto de refractarios Barronex: "Alkoton 800: Como economizar combustible refractarios aislantes"*, Ian Knizek

- 74.- Hojas de características de aislantes de Refractarios Mexicanos S. A de C V.
- 75.- Folletos de Allugard, Carburundum y aislamientos de fibra cerámica, cortesía de Refractarios Mexicanos
- 76.- "Fluid Flow characterisation in twin strand continuous casting tundish water model". S. K. Sinha, y colaboradores. Ironmaking and steelmaking, 1993 Vol 20, No 6. Pág 485-492.
- 77.- Fundamentos de dibujo en Ingeniería. L. Luzzder. Ed. Mc Graw Hill Interamericana, 1a. ed, 1990
- 78 - Thermal insulation handbook. Ed. Mc Graw Hil. William C Turner, Jhon F. Malloy. 1a ed, 1981.
- 79.- Theory and Problems of heat transfer. Donald R. Pitts. de Mc Graw Hill, 1977.