

# OPTIMIZACION DEL PROCESO DE REFINACIÓN DE GRANO EN ALEACIONES DE ALUMINIO DURANTE EL PROCESO DE COLADA CONTINUA HUNTER

Ing José Luis Sarutti  
Ing. Jorge Grau  
Ing. Ricardo Grammatico

Profesional de Apoyo CIC-LEMIT

## 1. INTRODUCCION

Uno de los tratamientos que se le realizan a las aleaciones de aluminio (Al) serie 1000 y 3000 es el de refinamiento de grano, uno de los refinadores de grano es el titanio (Ti), cuyo efecto refinador se debe a la formación del titaliuro de aluminio ( $TiAl_3$ ), sobre el que nuclearán los granos de aluminio. El  $TiAl_3$  se forma a partir de una reacción peritética a los  $665^\circ C$ , es decir a una temperatura mayor al comienzo de la solidificación del aluminio. Otro elemento agregado como refinador es el boro (B) que mejora la eficiencia del Ti, ya que reduce la solubilidad de este elemento en el Al líquido, favoreciendo así la reacción peritética Al-Ti. Al mismo tiempo, la formación de partículas de diboruro de titanio ( $TiB_2$ ) ayuda a la nucleación del  $TiAl_3$ . De modo que las aleaciones ternarias Al-Ti-B ( $AlTi_5B$ ) presentan un mejor efecto refinador que las binarias Al-Ti.

En el presente trabajo se realiza un estudio comparativo de dos refinadores (A y B) comerciales de  $AlTi_5B$  introducidos en el canal de alimentación- colada con el objetivo de optimizar el refinamiento de grano de las aleaciones de aluminio colada en forma continua.

Para ello se utilizó una máquina de colada continua Hunter (Figura 1) que produce una lámina de 900 mm de ancho x 8 mm de espesor, con una capacidad de producción de entre 0,8 y 1,2 Tn/h. La operación de refinación es de mucha importancia debido a que si el flujo de metal líquido en el canal de colada no es el suficiente, no se logra un eficiente mezclado e incorporación a la aleación del mismo, no alcanzando el óptimo efecto refinante. Debido a ello, el refinador decanta hacia el fondo del canal de colada, con el consiguiente tapado de filtros y boquilla de colada, lo que ocasiona una pérdida de rendimiento de la aleación refinante con el consiguiente aumento del costo.

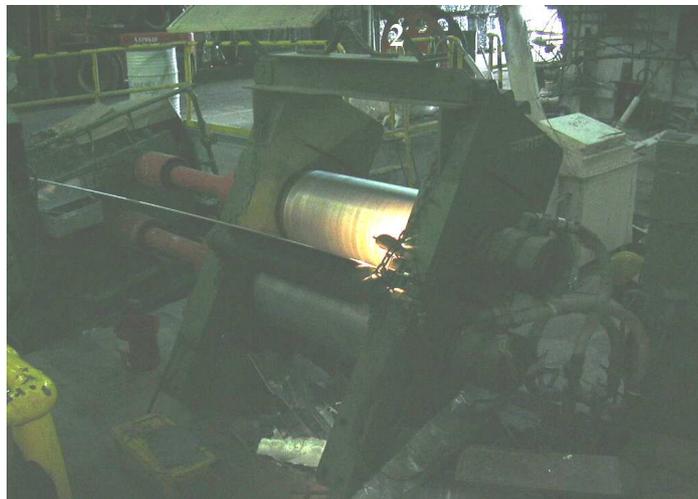


Figura 1. Máquina Hunter de colada continua.

## 2. DESARROLLO

### 2.1. Microestructuras del alambrión

El alambrión  $AlTi_5B$  presenta en su microestructura una matriz de aluminio con compuestos de  $TiAl_3$  y  $TiB_2$  como se ilustra en la Figura 2.

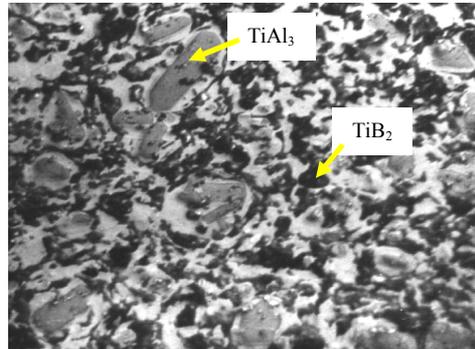


Figura 2. Compuestos  $TiAl_3$  y  $TiB_2$ . (400 X)

El  $TiAl_3$  se presenta en forma equiaxial o bien alargada y con una coloración gris claro. Su tamaño de partícula varía entre 30 y 250 micrones. El  $TiB_2$  es de color gris oscuro, con un menor tamaño de partícula, entre 1 y 2 micrones. Se encuentra en mayor cantidad y generalmente rodeando a las partículas de  $TiAl_3$ . Estos compuestos ( $TiB_2$  y  $TiAl_3$ ) deben presentar el menor tamaño posible y una distribución homogénea en la matriz de Al, como se ilustra en la Figura 3(a), teniendo una importancia significativa en la microestructura de la lámina de Al obtenida en colada continua. Un mayor tamaño de compuesto y/o una distribución heterogénea de los mismos [Figura 3 (b)], conduce a la formación de granos columnares en la lámina de Al, lo que implica su rechazo.

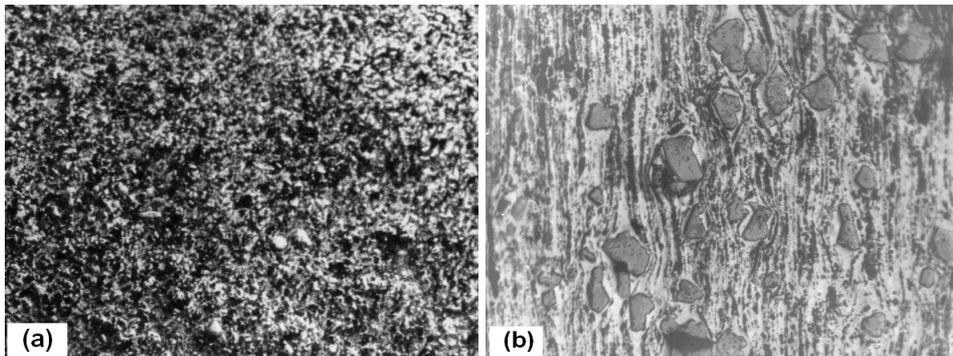


Figura 3. Distribución de los compuestos  $TiAl_3$  y  $TiB_2$  en el refinador. (a) Distribución homogénea. (b) Distribución heterogénea. (100X)

El alambrión A cuya estructura corresponde a la Figuras 3 (a) presentó óptimos resultados de refinación, mientras que las láminas de Al refinadas mediante el alambrión B correspondiente a la Figura 3 (b) presentaron un grano columnar que implicó el rechazo del material.

La formación de granos columnares obedece a la menor eficiencia del refinador, debido a que el mayor tamaño de las partículas de  $TiAl_3$  y  $TiB_2$  hace que estos compuestos decanten y formen lodos en el canal de colada, como consecuencia del pobre caudal de Al líquido, característico de esta máquina de colada continua Hunter. Estos lodos tienen

una estructura como la observada en la micrografía de la Figura 4, obtenida de la extracción de una muestra ubicada a 3 centímetros del fondo y a la mitad del canal de colada entre la piquera del horno de mantenimiento, la cuba de calentamiento y desgasado en línea.

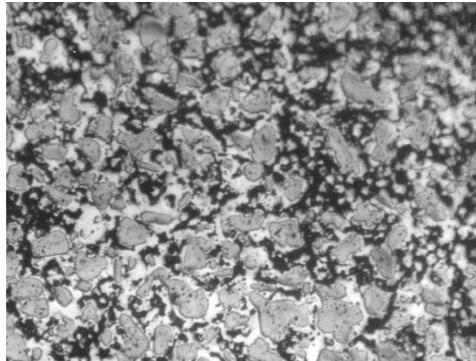


Figura 4. Micrografía de los lodos tomados del fondo del canal de colada. (100X)

La constante acumulación de estos lodos en el fondo del canal, además de bajar la eficiencia del alambroñ adicionado en la piquera del horno en aproximadamente un 30%, trae aparejado el inconveniente de aumentar la viscosidad y consecuentemente se debería aumentar la temperatura del baño líquido en el canal de colada. Otro efecto adverso es el taponamiento de los elementos filtrantes y de la boquilla de la colada Hunter, debido a que estos barros son arrastrados a lo largo del canal de colada [Figura 5 (a)], con el peligro de interrumpir la colada continua. Una de las formas de solucionar el inconveniente ocasionado por los lodos es la de mejorar el mezclado del refinador con el metal líquido al desgasificar el baño mediante el burbujeo de nitrógeno con un rotor desgasificador [Figura 5 (b)].

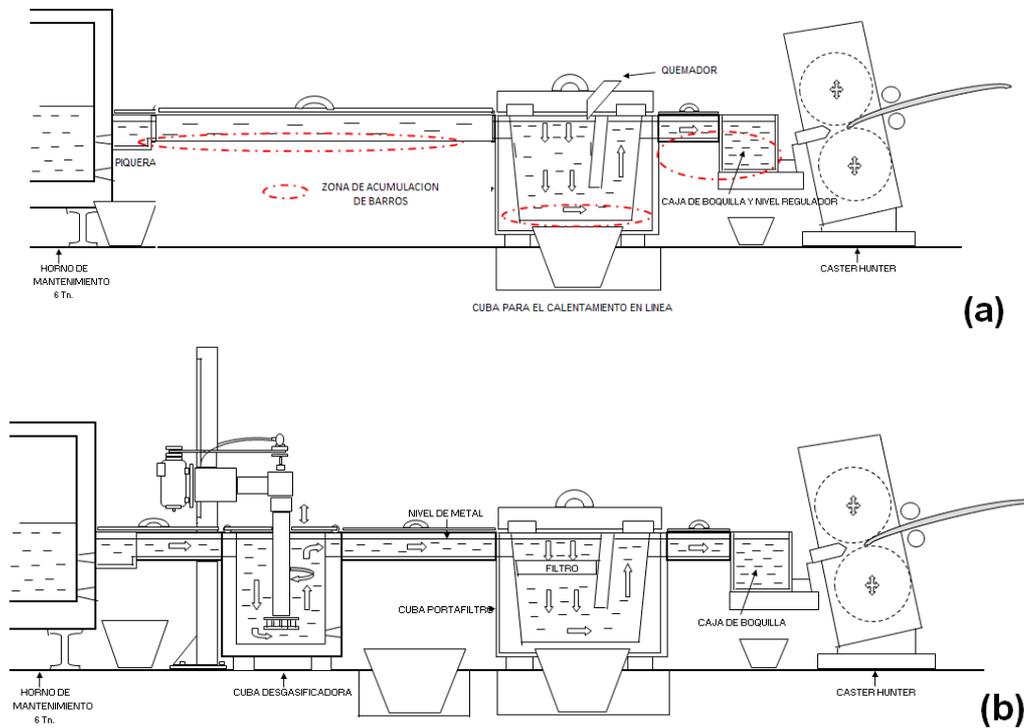


Figura 5. (a) Sistema original de colada con zonas de acumulación de barros. (b) Sistema de colada con rotor mezclador actualmente en uso.

Otras alternativas pueden ser la de generar un estrangulamiento en el canal de colada de manera de aumentar la velocidad del flujo del caudal líquido (Figura 6), o bien realizar la colada a menor temperatura y aumentar la velocidad de colada.

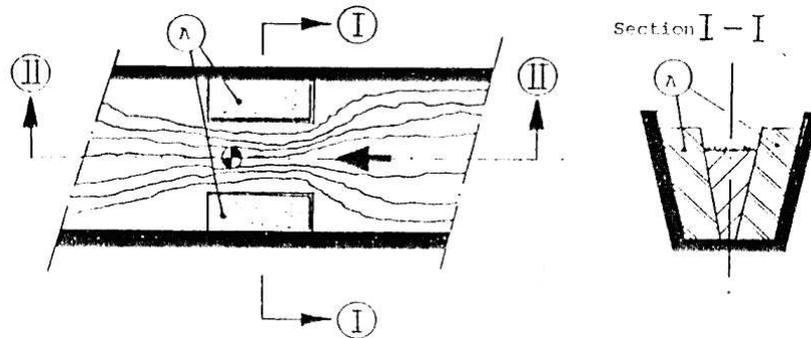


Figura 6. Estrangulamiento de la vena líquida para aumentar la velocidad del flujo.

El sistema de colada de la Figura 5 (b), fue el utilizado para la realización del estudio comparativo de los distintos refinadores de grano. Los resultados fueron altamente satisfactorios, debido a que la lámina de aluminio obtenida registró mejores propiedades mecánicas, como consecuencia de la mejor homogeneización lograda del refinador en el baño líquido conduciendo a un menor tamaño de grano equiaxial. Al mismo tiempo se obtuvo un mejor filtrado de óxidos y compuestos de segundas fases.

## 2.2. Clasificación de granos en colada continua

### 2.2.1 Grano dúplex

Se denomina grano dúplex cuando en la microestructura de un material existen diferentes tamaños de grano. El grano dúplex se debe a una pobre refinación de grano como consecuencia de un tamaño de partícula grade (240 micrones) y una heterogeneidad en la distribución de las partículas del refinador. Este tipo de grano es indeseable en el material final laminado ya que origina pérdida de ductilidad debido a las diferentes deformaciones que ocurren en cada uno de los grupos de granos ante sollicitaciones externas. En la Figura 7, se ilustra un material con una estructura dúplex, en la que coexisten granos con tamaños de entre 25 y 50 micrones con granos de tamaño entre 120 y 240 micrones. Lo deseable sería obtener, una estructura de granos equiaxial resultado de un buen refinador en la colada como se observa en la Figura 8. Ambos fueron producidos con el mismo proceso de laminación y tratamientos térmicos.

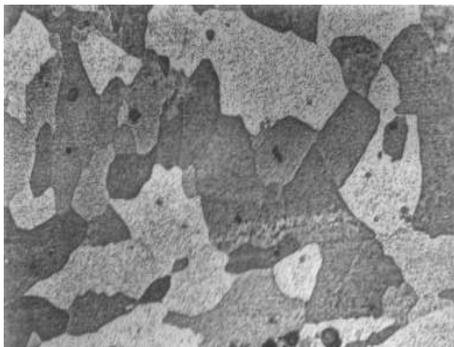


Figura 7. Grano dúplex (100X).

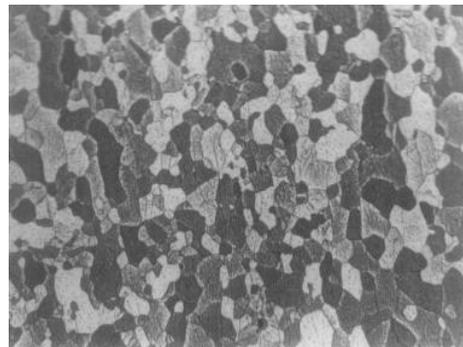


Figura 8. Grano equiaxial (100 X).

### **2.2.2 Grano columnar**

El grano columnar es un grano que crece alargado en la dirección de la extracción del calor, es decir, en la dirección de colada o dirección longitudinal de la banda de la bobina Hunter. El material con este grano debe ser descartado, ya que es imposible romper esta estructura con los procesos posteriores de laminación y tratamientos térmicos de recristalización, resultando el material con una muy pobre ductilidad. Este tipo de grano se presenta cuando la temperatura de la aleación líquida en el horno de mantenimiento es muy alta, la velocidad de colada baja, la temperatura del agua de enfriamiento de los cilindros de colada alta, o bien porque la refinación de grano es muy pobre o inexistente. Cuando esto último ocurre, es necesario incrementar la adición de refinador de grano, o bien cambiarlo por otro que presente un menor tamaño y distribución de partícula refinante.

### **2.2.3. Bordes congelados**

Este defecto ocurre en el borde de la banda de la bobina Hunter y se manifiesta como una fisuración de tales bordes cada tres o cuatro milímetros en ambos bordes alternativamente en forma de V durante la solidificación. Esto ocurre cuando hay una mala refinación en la aleación debido a la pobre adición o por el uso de un refinador de grano con un tamaño de partículas grandes. También puede suceder que el contenido de hierro y silicio en la aleación estén muy bajos los cuales secundariamente actúan como refinantes de grano. La bobina con este estado de bordes debe ser laminada a menor velocidad o bien con menor porcentaje de deformación por pasada de laminación, ya que estas fisuras, crecen en cada pasada hacia el centro de la banda hasta cortar la misma, produciéndose bobinas con muchos cortes y con pérdida de producción ya que en cada corte hay que parar el laminador, enhebrar nuevamente, e incrementar la velocidad hasta la de producción estando además el material desde el arranque de la laminación hasta la velocidad de régimen también fuera de especificación por falta de planitud.

## **2.3. Recomendaciones para el uso del alambón AlTi<sub>5</sub>B**

Las siguientes recomendaciones son extensibles a cualquier tipo de colada continua y semicontinua de aluminio:

### **2.3.1. Adición del alambón Ti<sub>5</sub>B**

El alambón debe ser introducido en el sector de mayor flujo y temperatura del metal líquido, donde la zona más aconsejable es la cercana a la piqueta del horno de mantenimiento, con esto se mejorará la incorporación del titanio-boro a la aleación debido a que favorece la formación de los compuestos refinantes.

El alambón, a su vez, debe ingresar en una zona de metal limpia de escorias y con una dirección que se encuentre en la superficie de un cono imaginario de 45° con la vertical e ingresando en contra del flujo del metal líquido Figura 9, mientras que la profundidad del metal líquido en el lugar de la adición debe ser tal que el alambón se funda antes de tocar el fondo del canal, una regla empírica simple es que la profundidad del canal donde se adiciona el alambón, debe ser el 10% de la velocidad de adición del mismo, por ejemplo: si la velocidad de adición es de 30 cm/min, la profundidad del canal debe ser de 3 cm.

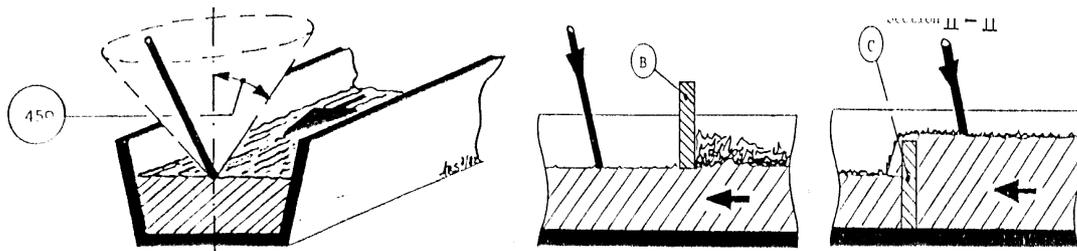


Figura 9. Formas de adicionar el refinador de grano en el canal de colada

El tiempo de contacto crítico requerido para disolver y nuclear cristales en el metal líquido es mínimo de 30 segundos, pero con 60 segundos se asegura un buen tratamiento refinante. Dependiendo de las condiciones de velocidad de colada del caster (baja velocidad) se puede extender hasta 15 minutos. Si se está colando 6Tn/h, o su equivalente 100 kg/minuto, debe haber mínimamente 100 kg de aleación líquida en el sector de adición de manera de asegurar un minuto de tiempo de contacto. Si el sector de adición es demasiado pequeño, los constituyentes no alcanzan su total actividad, en este caso, se debe incrementar el tamaño en la zona de adición, por ejemplo, en la cuba desgasificadora.

Calculo de la velocidad de adición ( $V_a$ )

Peso del alambroón = 0,192 Kg/m;

Diámetro del alambroón = 9,5 mm;

Peso del rollo = 180/190 Kg

El siguiente ábaco permite rápidamente calcular la velocidad del alambroón conociendo el flujo de colada  $v$  la adición de titanio deseado en la composición química. Figura 10.

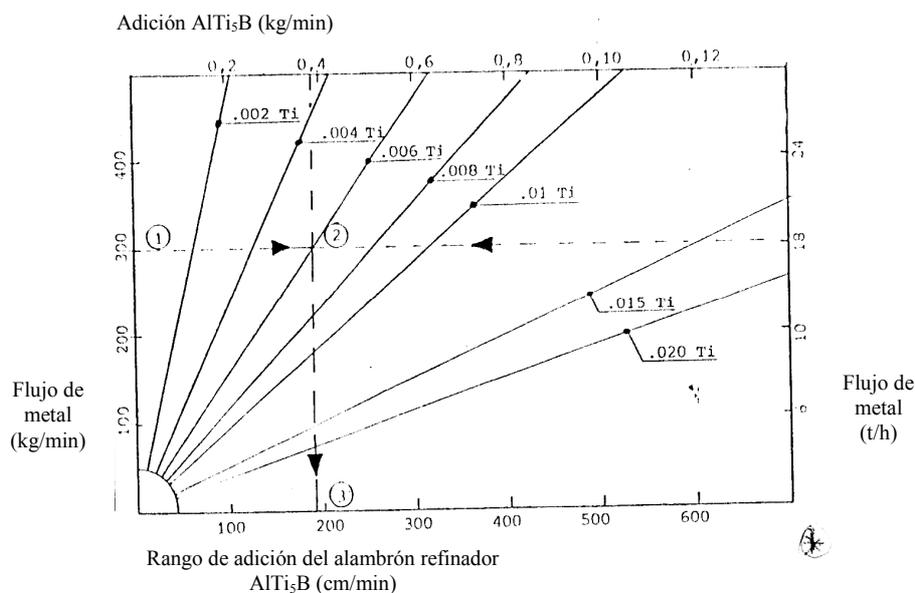


Figura 10. Ábaco para calcular la cantidad de alambroón a adicionar en función flujo de metal líquido.

El Tiempo de contacto ( $T_c$ ) se puede calcular mediante la expresión:

$$T_c \text{ (min)} = \frac{\text{Peso del metal en el sistema de colada (Pm) (kg)}}{\text{Rango de colada (Rc) (kg/min)}}$$

$$P_m \text{ (Kg)} = \text{Volumen del sistema de colada (Vsc) (cm}^3\text{)} \times \text{Densidad Al (g/cm}^3\text{)}$$

**Ejemplo:**

Sistema de colada

$$P_m = 24000 \text{ cm}^3 \times 2,2 \text{ g/cm}^3 = 57600 \text{ g} \text{ } \grave{=} \text{ } 57,6 \text{ kg}$$

Largo: 300 cm

Ancho: 20 cm

Profundidad: 4 cm

Densidad aluminio = 2,4 g/cm<sup>3</sup>

$$T_c = \frac{57,6 \text{ kg}}{100 \text{ kg/min}} = 0,576 \text{ min} \text{ } \grave{=} \text{ } 35 \text{ seg.}$$

Rango de colada: 6Tn/h  $\grave{=} \text{ } 100 \text{ kg/min}$

Vsc = 24000 cm<sup>3</sup>

**2.4. Equipo alimentador del alambri3n**

La alimentaci3n del alambri3n debe ser hecha en forma continua y constante, la cual va a depender de la cantidad de toneladas/horas que se est3 colando, de la medida de la bobina y de la velocidad de colada, una vez encontrado el valor de alimentaci3n del alambri3n en cm /minuto, corroborado por el porcentaje de titanio en la composici3n qu3mica de la aleaci3n mediante an3lisis qu3mico, este no se deber3 modificar durante la colada. Ocasionalmente puede ocurrir que el alambri3n patine o no es correctamente traccionado debido a fallas del alimentador o mal montaje del alimentador, con lo cual se est3 adicionando menos de los valores establecidos. A su vez, el alimentador deber3 estar equipado con una alarma sonora y lum3nica que chequee el movimiento del rollo, evit3ndose as3 la falta de alimentaci3n. El equipo completo del alimentador, es mostrado en la Figura 11.

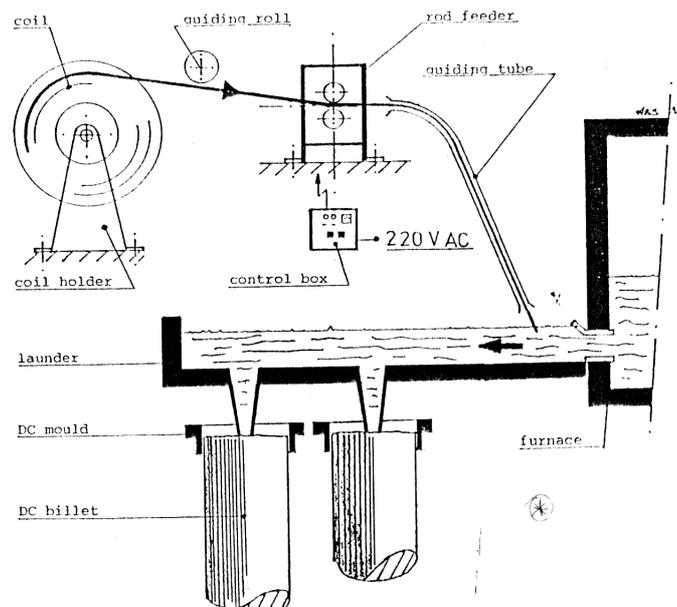


Figura 11. Esquema del equipo completo del alimentador.

El alambión debe ser alimentado formando un cono de 20° máximo con la vaina del alimentador, esto se asegura montando el rollo a 1,5 m del alimentador, tal como se observa en la figura 12, los cambios de dirección debe ser graduales de manera de no trabar la alimentación del alambión.

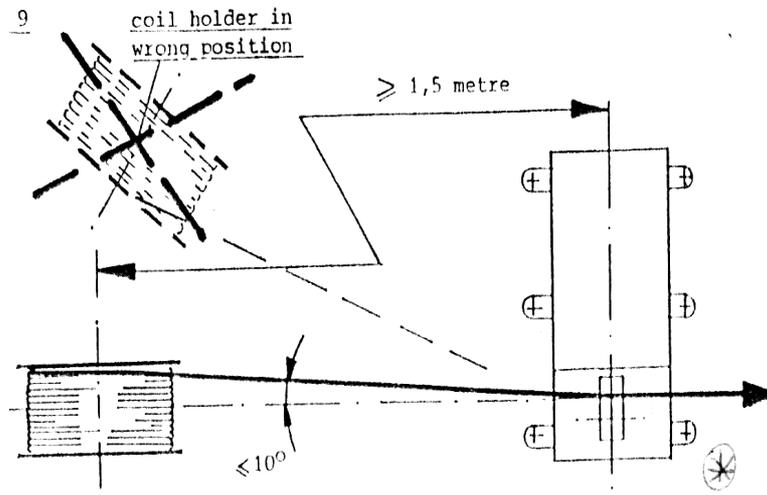


Figura 12. Angulo de alimentación y guías del alambión hacia el canal de colada.

### 3. CONCLUSIONES

- ❖ Un alambión con un tamaño grande de compuestos  $TiAl_3$  y  $TiB_2$  y de distribución heterogénea, aumenta el consumo del refinador en un 30% para igual efecto refinante, y a su vez, favorece la formación de lodos en el fondo del canal de colada que tapa el filtro y la boquilla de colada Hunter, con una menor concentración de titanio en la bobina e inferior calidad de refinación en el material solidificado.
- ❖ El incremento en la formación de lodos en el fondo del canal, no es una práctica habitual, por lo cual se deberá cambiar el tipo de alambión debido a su microestructura no deseada, o bien mejorar el mezclado con el desgasificado con nitrógeno mediante el disco rotor en el metal líquido a la salida de la piquera del horno en la zona de adición, y aun para casos extremos de compuesto  $TiAl_3$  y  $TiB_2$  de gran tamaño grande y de distribución heterogénea esta solución puede no ser suficiente.
- ❖ La formación del indeseado grano columnar en la banda de la bobina, obliga a incrementar la adición del refinador de grano, de no solucionarse el problema se deberá probar con cambios en los parámetros de colada tales como la temperatura del metal líquido o la velocidad de la máquina de colada. De no eliminarse el grano columnar se deberá cambiar el refinador de grano.
- ❖ El indeseado grano dúplex en el material solidificado es originado generalmente por una refinación heterogénea del material, la solución a ello es cambiar el refinador de grano.

### 4. BIBLIOGRAFIA

- ❖ Manual de manejo de la colada continúa Hunter,
- ❖ Refinación del aluminio. Lic. Fernando Daroqui – Aluar Aluminio Argentino,
- ❖ Metal Handbook Vol. 2. Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials,
- ❖ Aluminium titanium 5 boron 1 rod. Anglo Blackwells Master Alloys. Jan 1985,
- ❖ Atlas Metallographicus. Kawecki Billiton Master Alloys. April 1989,
- ❖ Enciclopedia del Aluminio. Grupo Pechiney.