

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA  
Y METALÚRGICA**



**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA  
METALÚRGICA**

**“OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE  
DESOXIDACIÓN Y MEJORA DE LA CALIDAD  
SUPERFICIAL EN LOS ACEROS CALIDAD 1008A2  
DE LA CORPORACIÓN ACEROS AREQUIPA”**

**TESIS**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO METALURGISTA**

**HAROLD JULIO AYERVE VILLASÍS**

Asesores:

Ing. Julio Uza Teruya

Ing. Alberto Landauro Abanto

2007

## Agradecimiento

---

---

A la Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica, Escuela de Ingeniería Metalúrgica por haberme dado las herramientas necesarias para mi desarrollo profesional.

A la Corporación Aceros Arequipa S.A., por darme la oportunidad de desarrollar la presente tesis, en especial a los ingenieros del Departamento de Acería por su apoyo y exigencia constante.

A los trabajadores de la empresa, que con su experiencia en el día a día han sido y son la mejor crítica para esta tesis y otros trabajos desarrollados.

A mis amigos que siempre me han apoyado a lo largo de mi carrera.

Agradezco sobre todo a mi familia, que es la fuente de mi inspiración y por su apoyo en todo momento, a mis abuelos hoy no presentes, quienes me enseñaron a contar antes que a leer y les hice la promesa de ser ingeniero.

## Resumen

---

La presente tesis se desarrolla completamente en la empresa Corporación Aceros Arequipa S.A., Departamento de Acería y tiene por objetivo contribuir en la mejora continua de la Corporación, a través de la optimización de los procesos y la mejora de la calidad del producto.

El trabajo muestra la optimización del proceso de desoxidación del acero líquido, dentro de la fabricación de la palanquilla de calidad 1008A2, donde se analizan los problemas de reoxidación del acero líquido y los cierre de buzas o clogging en el distribuidor de la colada continua. Además se hace un estudio de las variables del proceso metalúrgico (solubilidad de gases, temperatura de sangrado, desoxidación) para la reducción de la porosidad superficial y un análisis del mecanismo de oscilación de la colada continua para reducir la profundidad de las marcas de oscilación.

Se concluye que manteniendo una buena relación entre el calcio y aluminio total en el acero líquido, se eliminan los problemas de taponamiento de buzas en el distribuidor.

La porosidad superficial se reduce evitando temperaturas de sangrado mayores a 1650 °C y eliminando del horno cuchara y sangrado, el uso de residuo de escoria de aluminio, cal hidratada y demás insumos que contengan hidrógeno.

La profundidad de las marcas de oscilación disminuyen con un tiempo de strip negativo entre 0.12-0.14 segundos, el cual se consigue mediante la reducción de la amplitud de carrera y el aumento de la frecuencia del mecanismo de oscilación.

## I. Índice

---

---

<b>I.</b>	<b>Índice.</b>	<b>4</b>
<b>II.</b>	<b>Introducción.</b>	<b>7</b>
	<i>i. Objetivos.</i>	7
	<i>ii. Presentación del problema.</i>	8
<b>III.</b>	<b>Descripción de los Aceros de calidad 1008A2</b>	<b>9</b>
	<i>i. Composición Química.</i>	9
	<i>ii. Propiedades Mecánicas.</i>	11
	<i>iii. Aspectos Físicos.</i>	11
	<i>iv. Usos</i>	13
<b>IV.</b>	<b>Fabricación de los Aceros de calidad 1008A2</b>	<b>14</b>
	<i>i. Descripción de los procesos</i>	14
	<i>a. Metálicos</i>	15
	<i>b. Horno Eléctrico</i>	17
	<i>c. Horno Cuchara</i>	23
	<i>d. Colada Continua</i>	28

ii.	<i>Análisis Químico de las materias primas e insumos</i>	32
a.	<i>Materias Primas</i>	32
b.	<i>Desoxidantes y desulfurantes</i>	33
c.	<i>Ferroaleaciones y otros insumos</i>	33
<b>V.</b>	<b>Aspectos Teóricos Fundamentales:</b>	<b>34</b>
i.	<i>Descripción del proceso de desoxidación</i>	34
a.	<i>Aspectos termodinámicos</i>	38
b.	<i>Aspectos cinéticos</i>	44
c.	<i>Mecanismo de taponamiento o Cierre de Buzas</i>	52
ii.	<i>Mecanismo de Formación de defectos superficiales</i>	55
a.	<i>Pinhole o Porosidad Superficial.</i>	55
b.	<i>Marcas de oscilación.</i>	59
iii.	<i>Evaluación de los problemas</i>	65
<b>VI.</b>	<b>Modificaciones para mejorar la fabricación de aceros de bajo carbono y bajo silicio.</b>	<b>77</b>
i.	<i>Predicción del calcio y ratio Ca/Al para evitar el taponamiento de buzas.</i>	77
ii.	<i>Uso de desulfurantes y aluminatos para la desoxidación y desulfuración.</i>	81

<i>iii. Modificación de la amplitud de carrera de oscilación, para reducir las marcas de oscilación.</i>	83
<i>iv. Automatización de la inyección de aluminio para el mejor control del proceso.</i>	88
<b>VII. Resultados obtenidos de las modificaciones</b>	<b>92</b>
<b>VIII. Evaluación económica de las modificaciones</b>	<b>98</b>
<b>IX. Conclusiones</b>	<b>102</b>
<b>X. Recomendaciones</b>	<b>104</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>106</b>
<b>Anexos</b>	<b>108</b>

## II. Introducción

---

### i.- OBJETIVOS:

#### i.i. Objetivos Generales:

1. Mejorar el Proceso de desoxidación
2. Mejorar la Calidad de la palanquilla

#### i.ii. Objetivos Específicos:

1. Prevenir los cierre de buzas y disminuciones de la velocidad de colado.
2. Reducir la porosidad y la profundidad de las marcas de oscilación en la palanquilla, por lo tanto reducir costos por acondicionamiento.

## ii. PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA:

Debido a la composición química de la calidad del acero en estudio, el uso de ferroaleaciones de manganeso y silicio (FeMn y FeSi respectivamente) como desoxidantes del acero es limitado. Así mismo se reduce el uso de carburo de silicio y de calcio silicio. Para disminuir la actividad de oxígeno (desoxidar) en el acero se emplea aluminio, en forma de ferroaluminio y calcio en forma de alambre relleno de ferrocálcio. Estos desoxidantes son más costosos e inestables en el acero líquido que el manganeso y el silicio. Para desoxidar la escoria se usa residuo de escoria de aluminio en polvo.

Estos desoxidantes usados formarán diferentes tipos de microinclusiones, muchas de las cuales se irán acumulando en las buzas del distribuidor reduciendo su área transversal, disminuyendo la velocidad de colado hasta el taponamiento total de las buzas; el cual determina problemas tanto en la producción como en la calidad. El costo actual por acondicionamiento de palanquilla es considerable, el cual se realiza para eliminar los pinholes y las marcas de oscilación profundas de manera de no perjudicar la calidad del producto final.

Para efectos de nivel de calidad en la palanquilla, la porosidad superficial o pinholes son cavidades de 1 a 3mm de profundidad y de 1mm de diámetro, que se forman en la palanquilla durante la solidificación del acero líquido por la salida de los gases disueltos (cantidades considerables).

Las marcas de oscilación profundas son las depresiones mayores a 1 mm de profundidad, que se forman transversalmente en la superficie de la palanquilla debido al mecanismo de oscilación. El mecanismo de formación de ambos defectos se detalla en el capítulo V.



### III. Descripción de los Aceros de calidad 1008A2

La palanquilla de acero de bajo carbono y bajo silicio, es una barra de sección cuadrada de 130x130mm y un peso de 560kg cada una, dando una longitud de 4.31m. Esta palanquilla es el producto final de la Planta de Acería y materia prima de la Planta de Laminación, donde se transforma y obtiene el alambón para electrodos. El alambón para electrodos es un producto de acero de bajo carbono laminado en caliente de sección circular de 5.5mm de diámetro y de superficie lisa.

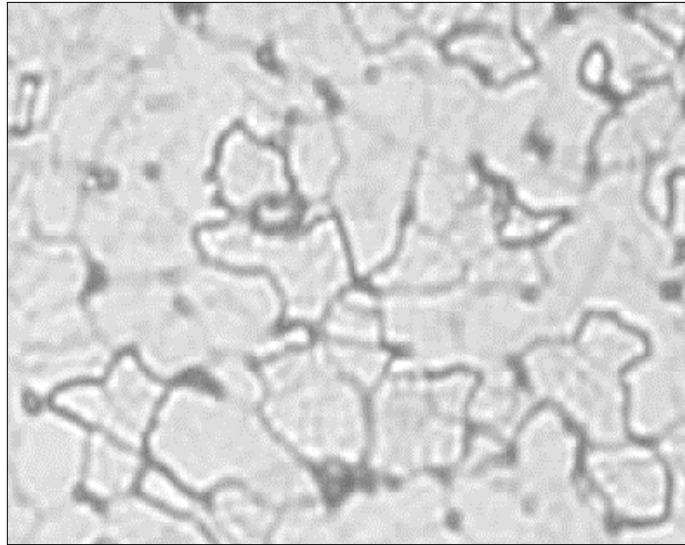
#### i. COMPOSICIÓN QUÍMICA TÍPICA EN EL PRODUCTO FINAL (%):

Porcentaje (%)											ppm		
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Nb	Ti	Pb	Ca	Al	N
		Máx	Máx	Máx	Máx	Máx	Máx	Máx	Máx	Máx	Máx	Máx	Máx
0,05-0,08	0,45-0,62	0,04	0,025	0,025	0,05	0,05	0,12	0,005	0,005	0,005	30	100	110

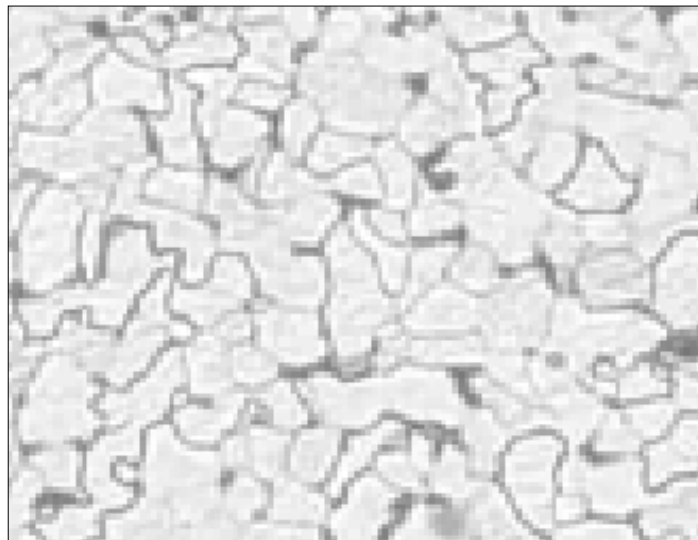
**Tabla 1.- Composición Química requerida por la ficha técnica del producto**

Se puede observar los niveles bajos de carbono y silicio en la especificación de la composición química, comparado a composiciones químicas de otros productos. Los niveles de residuales solicitados también son bastantes exigentes para no afectar la trefilabilidad del producto.

La microestructura presente en este tipo de acero es predominantemente ferrítica por ser de bajo carbono; las figuras 1.a y 1.b muestran micrografías tomadas en el laboratorio de control de calidad.



**Fig 1.a.- Micrografía Acero 1008A2. 100X. Colada N 192117**  
**Tamaño de grano: 10,05  $\mu\text{m}$ . % Perlita 9,6 . % Ferrita 90,4.**



**Fig 1.b.- Micrografía Acero 1008A2. 100X. Colada N 192124**  
**Tamaño de grano: 9,94  $\mu\text{m}$ . % Perlita 10,2 . % Ferrita 89,8.**

En las micrografías se pueden observar los granos de ferrita que constituyen la matriz ferrítica del acero en estudio. El número de tamaño de grano (G), es determinado según ASTM E112-96 E1. Ver Anexo (i).

## **ii. PROPIEDADES MECÁNICAS:**

- Límite de Fluencia = 2190 kg/cm<sup>2</sup> mínimo
- Resistencia a la Tracción (R) = 3367 - 4285 kg/cm<sup>2</sup>
- Alargamiento en 200 mm = 20.0 % mínimo
- Ductibilidad, capaz de ser trefilado en seco, sin recocido hasta 1.6mm

En el Anexo (ii) se muestra un gráfico esfuerzo versus deformación para poder observar el comportamiento de este tipo de aceros, al esfuerzo de un agente externo de tracción.

## **iii. ASPECTOS FÍSICOS:**

La superficie del producto alambrón está libre de grasas, aceite, pintura, etc. y presenta una cascarilla fácil de remover en el decapado. No presenta defectos perjudiciales para su posterior utilización tales como exfoliación, pliegues fuertes, marcas severas, etc.



**Fig 2.- Producto Alambroón listo para su despacho. Fuente: Almacén de Productos Terminados**

**iv. USOS TÍPICOS:**

El alambón para electrodos producido a partir de la palanquilla 1008A2, es usado para la fabricación de electrodos revestidos (celulósicos, rútilicos, de bajo hidrógeno y de hierro en polvo) y para la fabricación de alambre para soldadura con protección de gas (MIG MAG) y para arco sumergido.

La presentación de estos rollos es de 2.1 toneladas, aproximadamente (se admite una variación de  $\pm 100$  Kg), son empacados, presentando 4 amarres adecuadamente distribuidos y ajustados.

Largo del rollo máximo: 1.8 m

Diámetro interno/externo del rollo: 0.7 m mínimo / 1.4 m máximo

DIAMETRO NOMINAL (mm)	SECCION (mm <sup>2</sup> )	TOLERANCIA ADMISIBLE EN DIAMETRO (mm)	OVALIZACION MAXIMA ADMISIBLE (mm)	PESO APROXIMADO (Kg/m)
5.5	23.8	+ 0.20	0.30	0.186
6.35	31.7	+ 0.20	0.30	0.248
8.0	50.3	+ 0.25	0.30	0.393

**Tabla 2.- Dimensión, Tolerancias y Pesos del Producto**

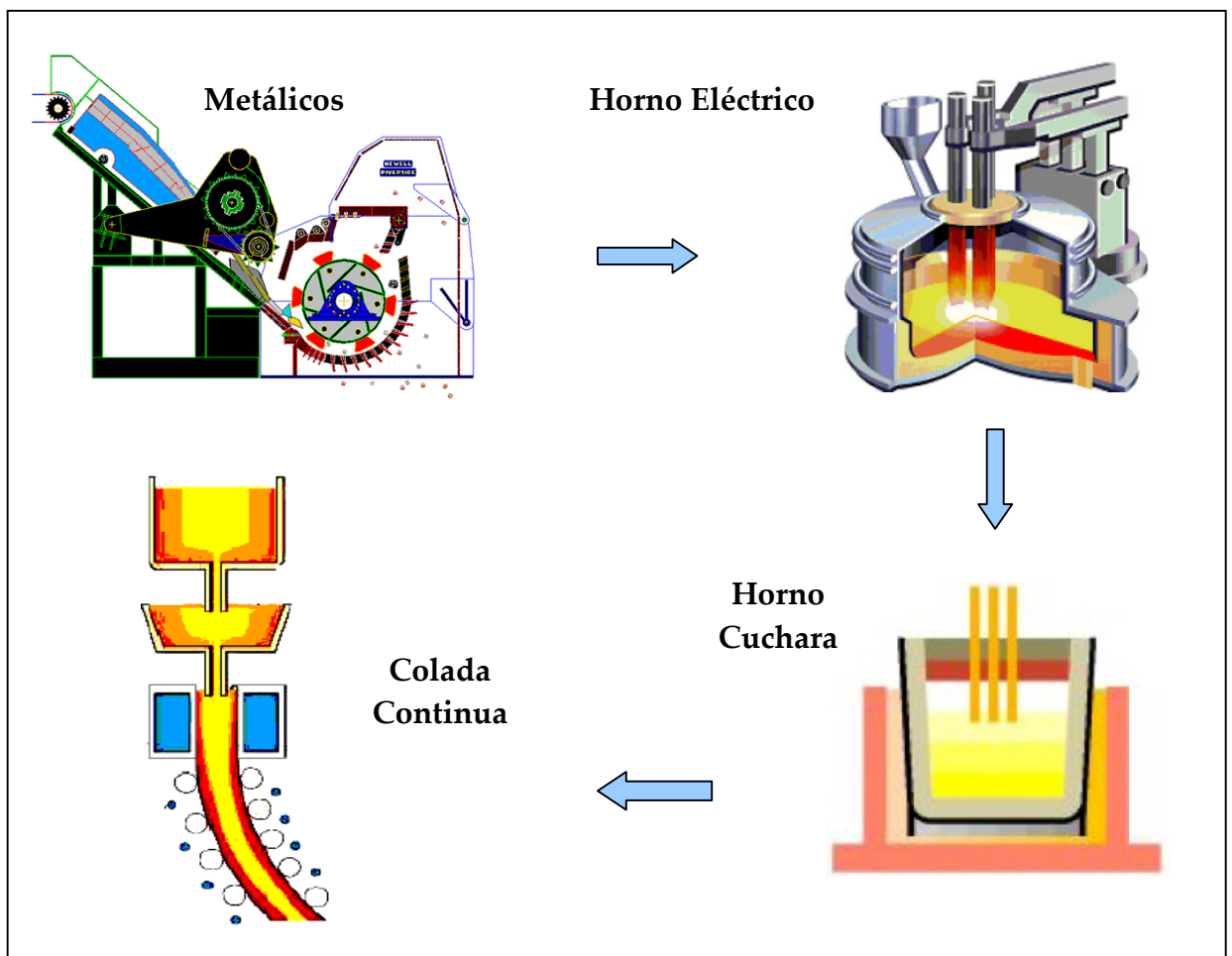
Para su mejor identificación cada rollo producido está identificado con dos tarjetas metálicas plateadas consignando: Producto, Norma, N° de colada, N° de paquete y Peso. La cola del rollo es fácilmente accesible, y se le da una coloración blanca en una porción de 10 a 15 cm.

Además a solicitud del cliente se emite Certificado de Calidad para cada lote de producto.

## IV. Fabricación de los Aceros de Calidad 1008A2

A continuación se describe el proceso de fabricación de la palanquilla Calidad 1008A2.

### i.- DESCRIPCION DE LOS PROCESOS:



*Fig.3.- Diagrama Simplificado de la Producción de la Planta de Acería*

a.- **METALICOS:**



***Fig.4.- Máquina Fragmentadora, marca Harris, martillos de acero al manganeso. Producción 1000 toneladas/día.***

En la sección de metálicos se almacena chatarra nacional e importada, además de los materiales pre-reducidos importados como las briquetas, los chips y el hierro esponja importado. La chatarra almacenada es separada en pilas según sus características principales como chatarra liviana, chatarra pesada, heavy melting, tarro de leche, paquetes, embutición, virutas, chatarra naval, primera, alto residual, etc. Luego de la separación de los distintos tipos de chatarra en pilas de almacenamiento, estas serán acondicionadas para su posterior consumo en el horno eléctrico.

La chatarra de espesor menor a un cuarto de pulgada (1/4”), se acondiciona en la máquina fragmentadora, fragmentándose para reducir su tamaño medio, además de limpiarla, de manera de obtener una carga de mayor densidad aparente y limpia de sílice para mejorar el proceso en el horno eléctrico.

La chatarra de espesores mayores a 1/4” se acondicionan mediante oxicorte, cortándola con lanzas de gas-oxígeno, debido a que por su espesor, puede romper los martillos del tambor de la máquina fragmentadora, causando paradas de producción y sobre costo. En cuanto a la fabricación de la calidad de acero en estudio, la chatarra usada es la de menor cantidad de elementos residuales (Cu, Zn, Sn, Ni, Pb, principalmente), debido a la especificación de la composición química del producto. Ver tabla N1.

La carga metálica o chatarra es adicionada en dos cestas y los materiales pre-reducidos en su mayoría por alimentación continua, según la siguiente distribución:

2 Cestas	31t	{ 20t de chatarra fragmentada 6t de hierro esponja a carbón 2t de recuperación interna 3t de chatarra pesada	
Alimentación Continua	17t		
			{ 16t de hierro esponja a gas 1t de perdigón
Total	48t		



b.- **HORNO ELÉCTRICO:**



***Fig.5.- Horno Eléctrico de Arco, 45t de capacidad de carga, transformador de 45MVA de potencia. Producción 440 mil toneladas de acero/año.***

En el horno eléctrico se logra la fusión de toda la carga metálica compuesta principalmente por chatarra y hierro esponja.

La principal energía usada para fundir dicha carga es energía eléctrica, que a través de tres electrodos de grafito conectados en corriente alterna, producen un arco eléctrico con la carga metálica el cual genera calor por encima de los 2000K cerca de los electrodos, obteniendo acero líquido.

No toda la energía empleada para fundir la carga metálica es eléctrica, también se emplea energía química aportada por las reacciones de oxidación entre el oxígeno y los elementos de la carga y además de estas dos fuentes de energía se cuenta con quemadores gas natural - oxígeno, los cuales trabajan en los primeros momentos de la fusión.

Aproximadamente para fundir la carga de 46t mostrada anteriormente se necesita 24MWh de energía, de los cuales 19MWh son energía eléctrica, 4.5MWh energía química debido a las reacciones de oxidación por el uso de oxígeno y 0.5MWh por los quemadores. Ver anexo (iii)

En cuanto a la Energía eléctrica, esta es aportada por un transformador de 45 MVA de potencia, el cual para un factor de potencia de 0.94 puede desarrollar hasta 42 MW de energía activa.

Dentro del programa de fusión se cuenta con diferentes TAP, los cuales corresponden a niveles de voltaje y corriente que puede desarrollar el transformador. Por ejemplo el TAP 26 corresponde a 800V en el transformador primario, lo cual distribuido a cada fase es 460V y 33KA en el circuito secundario(fases), es decir estos son los niveles que definirán la energía eléctrica aportada a través de los electrodos.

Antiguamente la tendencia en los hornos de arco eléctrico era trabajar con arcos eléctricos cortos, es decir se trabajaba a voltajes menores y grandes amperajes, ya que no se contaba con una escoria espumosa de protección como la que se ha desarrollado en la actualidad, por lo que no se podía aprovechar toda la potencia del transformador y el consumo de electrodos era alto (mayor a los 2.5kg/t). Siendo este costo muy elevado; a este proceso tradicional se le llama Proceso a Puerta Abierta.

La práctica actual desarrollada en la empresa denominada Proceso a Puerta Cerrada (Patente INDECOPI N3122), permite trabajar con voltajes altos y amperajes bajos, lo cual definirá un arco eléctrico largo y un menor consumo de electrodos (1.5kg/t). Pero esto se produce si es que se tiene una escoria capaz de cubrir dicho arco, permitiendo el aprovechamiento de la energía eléctrica, la protección del refractario y de los paneles refrigerados.

A este tipo de escoria se le denomina escoria espumosa, la cual se produce al reaccionar el carbono con el oxígeno, formando monóxido de carbono principalmente(ecuación *iv.i.1*), dicho gas al salir hacia la superficie provoca un

burbujeo en la escoria haciéndola crecer en altura, disminuyéndola en densidad; esta escoria es muy favorable para el aprovechamiento de la energía, además de proteger los refractarios del horno y paneles, reducir el ruido y mejorar la eficiencia de las reacciones de oxidación y reducción. Formar la escoria espumosa no es tan complicado como mantenerla, debido a que con el avance de la colada, la escoria se va calentando perdiendo viscosidad y las burbujas emergentes se hacen menos intensas, perdiendo la efervescencia y disminuyendo su altura.

Las reacciones de formación de la escoria espumosa son las siguientes:



Donde ( ) indican la presencia del componente en la escoria y  $\underline{X}$  indica la presencia del componente en el acero líquido, es decir soluble.

En cuanto a la energía química, estas son debidas a reacciones de oxidación con el Fe, Mn, Si, C, las cuales liberan energía. Siendo las reacciones con el Si y el Fe las que proporcionan el mayor aporte térmico.

Los óxidos de Fe, Mn y Si pasan parcialmente a la escoria, mientras el CO y el CO<sub>2</sub> pasan a los humos. En el anexo (iv) se puede apreciar un balance simplificado para poder determinar la cantidad de residuos que se producen en el proceso.

El oxígeno es inyectado mediante toberas especiales a velocidades supersónicas, aproximadamente a Mach 2, es decir a una velocidad igual a 2 veces la velocidad del sonido en el aire (340m/s). El chorro coherente que se forma es capaz de penetrar la escoria y llegar hasta el acero para completar las reacciones de oxidación, además de estas lanzas supersónicas, se tienen lanzas de oxígeno consumibles introducidas por la puerta de desescoreo.

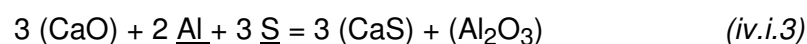
Los quemadores del horno trabajan con gas natural y oxígeno, se inicia con una proporción oxígeno/gas igual a 1 e incrementándose por etapas hasta una relación de 3 a 1, es decir una llama de mayor alcance. La transmisión de calor se realiza por radiación de la llama y convección forzada de los humos.

Ambas son mayores a menor temperatura de la carga y proporcionales a la superficie de intercambio térmico, es por ello que los quemadores se usan exclusivamente en la primera mitad de la fusión de la chatarra en cada cesta de carga.

En el Horno eléctrico de arco (EAF), además de la fusión de la carga y la conversión en acero líquido, se logra también una composición química aproximada del acero. En sus inicios, en los hornos eléctricos se hacía todo el ajuste de la composición química según especificación técnica del producto.

Actualmente el ajuste de la composición química se hace en el horno cuchara. Para lograr esta composición química, se tiene que eliminar primero el fósforo (Horno Eléctrico) y el azufre (Horno Eléctrico- Horno Cuchara) del acero y se dan mediante los siguientes procesos: La desfosforación, en este caso el fósforo en el metal fundido es oxidado formando  $P_2O_5$ . Este óxido es muy inestable y se encuentra en la interfase metal - escoria, por tanto para estabilizarlo y eliminarlo en el desescoreo del horno eléctrico se usa cal, la cual formará el pentóxido de calcio  $(CaO)_4 P_2O_5$  estabilizándolo para evitar su reversión al baño de acero líquido. La reacción de desfosforación se favorece con un alto contenido de oxígeno en el acero, una escoria básica (alto contenido de CaO) y una temperatura relativamente baja (menor a 1580 °C).

En cuanto a la desulfuración, el azufre del acero es eliminado parcialmente por el uso de cal, el cual por reacciones de metátesis o doble desplazamiento, eliminan el azufre a manera de sulfuro de calcio, la ecuación que expresa esta reacción es:



Luego de la fusión de la carga, calentamiento del acero y la escoria reducida, (% FeO en la escoria es menor a 10%), se procede a abrir la puerta de desescoreo, se toma la temperatura del acero, la cual debe de estar aproximadamente a 1580° C (comprobado con la termocupla), luego se comprueba que el % de carbono de fin de fusión esté entre 0.04 y 0.08% mediante la termocupla y muestreador, el valor objetivo de fin de fusión es 0.08%.

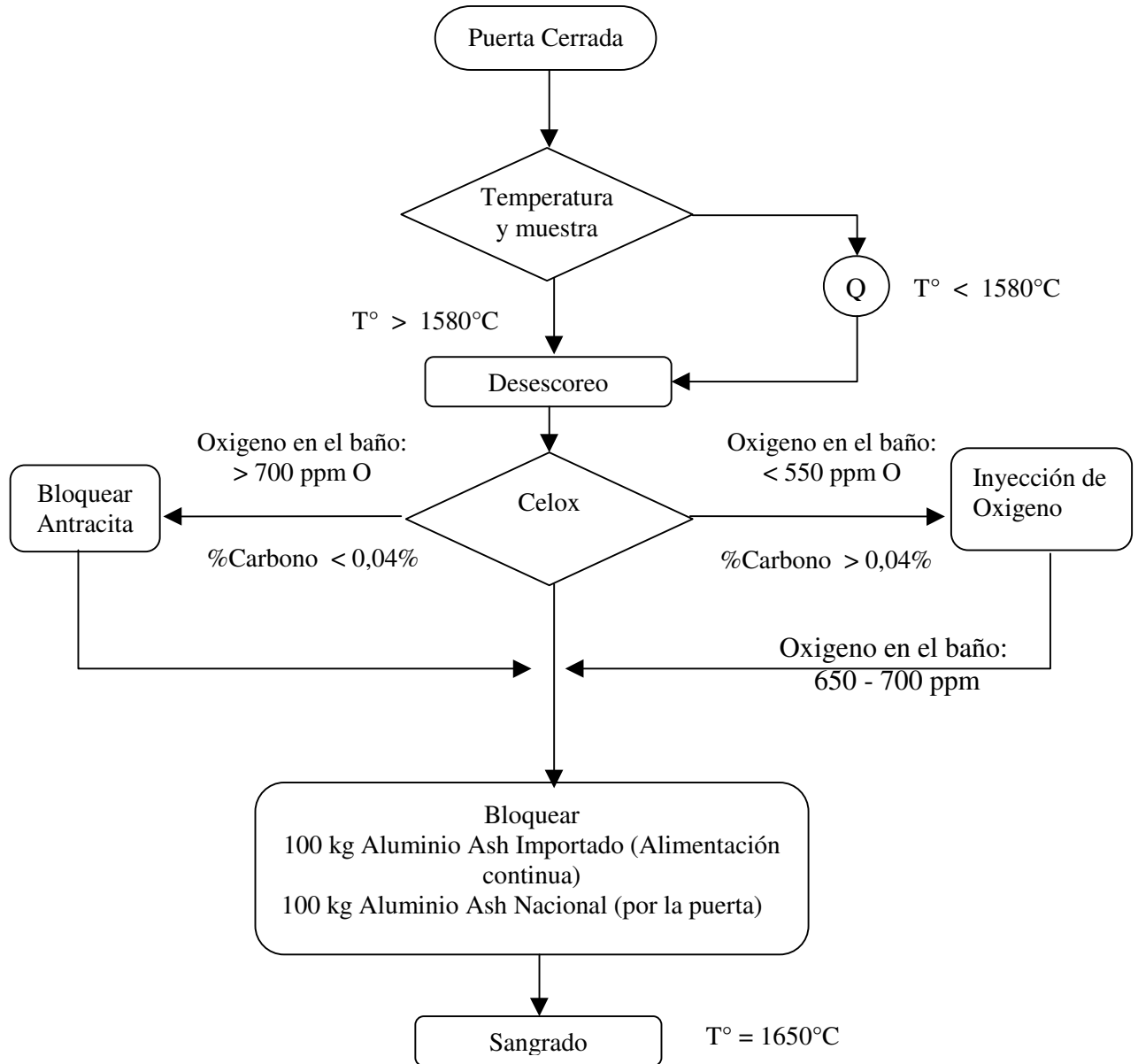
De ser así se procede a desescorear el baño rápidamente basculando el horno eléctrico hasta 5°, luego se procede a ajustar el carbono a 0.04% y medir las ppm de oxígeno.

Si el contenido de oxígeno fuera superior a 700 ppm, lo cual indicaría que el %C es menor a 0.04%, según las curvas de Vacher-Hamilton, inmediatamente se reduce con antracita, apuntando el %C a 0.04%, considerando que aumentar 0.01% de carbono se consigue con 15kg de carbón (50% de rendimiento) llegando así al equilibrio C-O.

Si por el contrario el oxígeno fuera menor a 650-700 ppm, es decir un % de carbono mayor a 0.04% se debe inyectar oxígeno hasta llegar a 700ppm, según equilibrio a 1625°C. Regulada las ppm de oxígeno y el % de carbono, se procede a bloquear la escoria con 200 kg de residuo de escoria de aluminio por alimentación continua y se sangra el acero por la piqueta del horno en la cuchara. El fin es uniformizar el % del carbono, el nivel de oxígeno soluble en el acero y el nivel de oxidación de la escoria, para adicionar una mezcla en el sangrado constante.

Por esta razón, en 40t de acero líquido la adición en el sangrado es: 60 kg de ferroaluminio, 300 kg. Mezcla (30% residuo de escoria de aluminio y 70% cal reactiva), 400 kg de cal cálcica, 180 kg. de ferromanganeso afinado y 15 kg de CaSi.

Luego del sangrado se transporta el acero líquido en la cuchara hacia el horno cuchara.



**Fig.6.- Diagrama de flujo de la practica operativa en el Horno Eléctrico. Calidad 1008A2.**

c.- **HORNO CUCHARA:**



***Fig.7.- Horno Cuchara, 40t de capacidad de acero líquido, transformador de 25MVA de potencia***

El Horno cuchara es un horno eléctrico con la diferencia que no tiene cuba, y la cuchara misma pasa a ser parte del Horno Cuchara, es decir se cuenta con tres electrodos que a través de la energía eléctrica calentará el acero para contrarrestar el enfriamiento normal del acero por las adiciones y por la transferencia de calor a los refractarios de la cuchara y al medio ambiente a través de la escoria.

En este horno se procede al ajuste de la composición química dentro de la especificación técnica descrita anteriormente y se calienta el acero hasta la temperatura a enviar para colada continua de la siguiente manera:

Estacionada la cuchara en el horno cuchara, se toma la temperatura y se procede a la toma de muestras de acero para análisis de laboratorio, para lo cual se necesita una temperatura mayor a 1550°C, luego se hace una medición con el equipo celox, para obtener el contenido de oxígeno soluble en el acero y luego se empieza la desoxidación con ferroaluminio hasta llegar a 50ppm de oxígeno.

La reacción de desoxidación con aluminio esta expresada mediante la siguiente ecuación:



Para lo cual se considera que 1kg de FeAl baja 5.1ppm de oxígeno soluble. Mientras, tanto se va trabajando la escoria del acero, tomando muestra de ella, para ir midiendo el grado de oxidación mediante observación de color con los patrones. En caso de que la temperatura sea menor a 1600°C, se calienta dándole arco eléctrico, además de agregarle cal para promover la desulfuración del acero.

Si la escoria esta muy líquida se agrega mayor cantidad de cal para endurecerla, si esta muy dura se agrega fluoruro de calcio(espato) y/o residuo de escoria de aluminio para fluidificarla dependiendo del nivel de oxidación y del contenido de aluminio presente en el acero.

El CaF<sub>2</sub> o espato actúa como un fundente bajándole el punto de fusión de la escoria para fluidificarla y favorecer la desulfuración. La desulfuración al igual que en el horno eléctrico se da mediante la ecuación (iv.i.3). Como se mencionó anteriormente el uso del carburo de calcio y calcio silicio es restringido por la composición química del acero, la cual indica que el % de carbono debe estar entre 0.06-0.08% y el % de silicio menor a 0.03%.



Para la llegada al horno cuchara los porcentajes son aproximadamente 0.05%C y 0.01%Si.

La escoria se desoxida con residuo de escoria de aluminio, mientras se termina de ajustar la composición química. Cuando la escoria este reducida es decir con un porcentaje de FeO menor a 1% (escoria blanca), y la composición química casi ajustada se procede finalmente a adicionarle 200m de alambre relleno de calcio (ferrocalcio 30% Ca) a una velocidad mayor a 100m/min, para terminar de disminuir las ppm de oxígeno a menos de 15ppm, además el calcio excedente pasa al baño de acero, para garantizar la colabilidad del acero. Las escorias de desulfuración típicas que se consigue, tienen un análisis químico aproximado de 50%CaO, 35%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y 15%SiO<sub>2</sub>.

No es recomendable para el proceso, obtener escorias de menor punto de fusión (1300-1400°C) debido a que son muy fluidas y se presentan dos problemas: El primero es la emulsificación de la escoria en el acero dentro del molde formándose incrustaciones de escorias. El segundo problema es el enfriamiento rápido del acero en la cuchara por radiación de calor.

Finalmente se ajusta el Si a 0.03% y el Mn entre 0.45-0.60%. No se hace antes por la reversión que se da de estos elementos al adicionar el ferro calcio, según las siguientes reacciones de metátesis o doble desplazamiento:



Obtenida la composición química, comprobada las ppm de oxígeno (menor a 15ppm) y la temperatura mediante el celox, se envía la cuchara con el acero líquido a colada continua para su solidificación.

Con el uso del ferro aluminio, y debido a que los porcentajes de manganeso y silicio son bajos, las inclusiones formadas en el acero son de alúmina principalmente, las cuales se forman según la reacción (iv.i.4).

La alúmina tiene un punto de fusión muy alto (2050°C), y una morfología compleja dendrítica, la cual se adhiere en las buzas del tundish de colada continua disminuyendo la velocidad de colado hasta un posible cierre de buzas.

Debido al calcio inyectado, se formarán aluminatos de calcio, los cuales se analizan en el capítulo V.

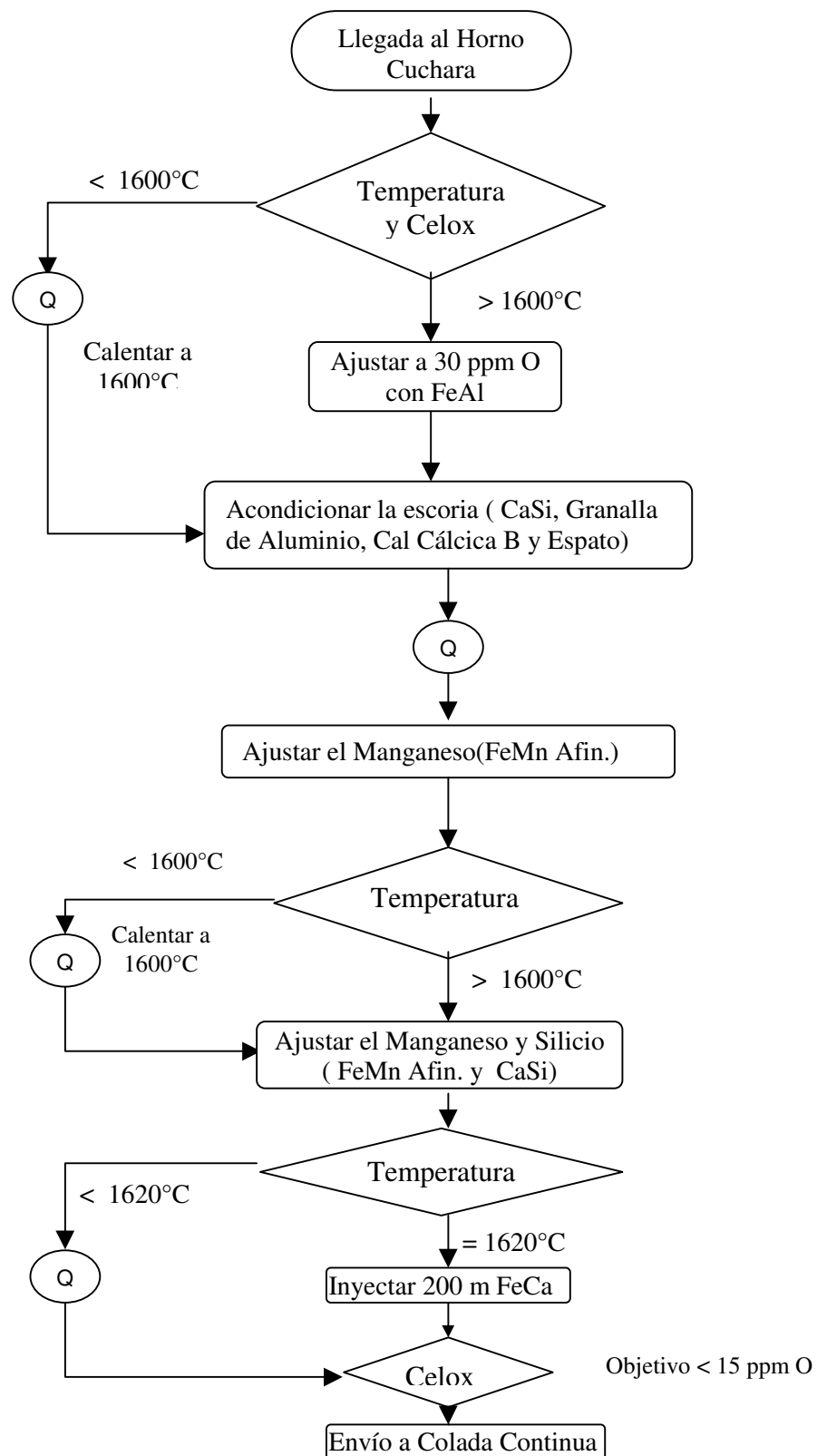
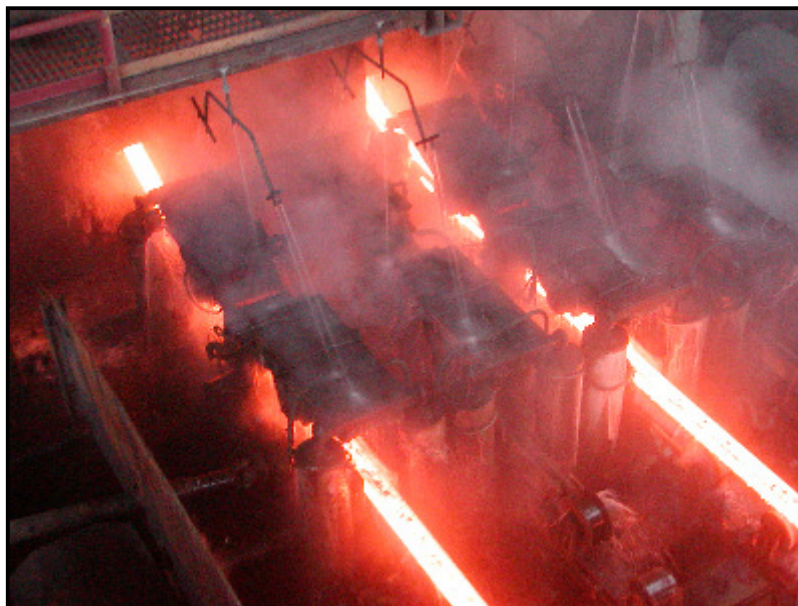


Fig.8.- Diagrama de flujo de la practica operativa en el Horno Cuchara.1008A2.

d.- COLADA CONTINUA:



***Fig.9a y 9b.- Colada Continua, de 4 líneas. Marca Concast. Radio de 5m.  
Capacidad de 800 mil toneladas de palanquilla/año.***

En La Colada Continua se produce la solidificación del acero, es decir se transforma el acero líquido en acero sólido en forma de palanquilla, el cual es el producto final de la Acería y materia prima para la laminación (cliente interno).

La Máquina de Colada Continua de 5 m de radio de curvatura, consta principalmente de una torreta giratoria con lugar para dos cucharas con acero líquido, en un lado está la cuchara con acero líquido que está colando y en el otro lado esta la cuchara en espera. Al momento en el cual termina la cuchara de colar entra la que esta en espera, a este proceso se le denomina secuenciamiento. La torreta consta también de tapas para evitar el rápido enfriamiento del acero líquido por radiación de calor.

El acero líquido de la cuchara es vertido hacia un distribuidor a través de la buza, que es un orificio de 32mm ubicado en la base de la cuchara, este distribuidor también conocido como tundish, es el que se encarga de recibir aproximadamente 14t de acero y las distribuye en 4 líneas de colada. Además de la función de repartir el acero líquido, en el tundish se reduce la turbulencia del flujo de acero, por lo que el acero líquido de la cuchara, pasa al tundish chocando con la zona de impacto, luego con la ayuda de los tabiques e inhibidores de turbulencia el acero aumenta su recorrido hacia las buzas, incrementando el tiempo de residencia del acero en el tundish y reduciendo la turbulencia. Esta reducción de la turbulencia permite la flotación de las macroinclusiones que se puedan tener y de escoria atrapada en el acero, garantizando una palanquilla de mejor calidad. La caída de temperatura del acero en la cuchara es aproximadamente 1 °C/min para esta calidad.

La colabilidad del acero depende mucho del tipo de microinclusiones que contenga y de la temperatura, esta colabilidad será determinante para la producción continua de este tipo de acero y de la calidad de la palanquilla.

El acero líquido luego pasa hacia los moldes oscilatorios, en ellos se da una refrigeración primaria e indirecta, es decir el acero no entra en contacto con el agua, sino que lo hace a través de una pared de cobre-plata, la cual esta dentro de una camisa de refrigeración con paso de agua constante.

La transferencia o extracción de calor por tanto se da del acero a la pared del molde de cobre-plata y del molde al agua. Es en esta etapa donde se forma una piel suficientemente resistente para soportar los esfuerzos mecánicos que sufre la barra a través de su transformación en palanquilla.

Posteriormente se cuenta con una refrigeración secundaria, en la cual se completa la solidificación del acero mediante sprays o toberas, las cuales pulverizan el agua, haciéndolo impactar en la barra de acero que va solidificando. Luego esta barra solidificada es cortada mediante oxicorte (Gas y Oxígeno a alta presión) a la medida solicitada. Comprobado el peso de la palanquilla, esta es enviada para su inspección y acondicionamiento en caso necesitarlo, luego trasladada a la Planta de Laminación para su transformación en alambrón.

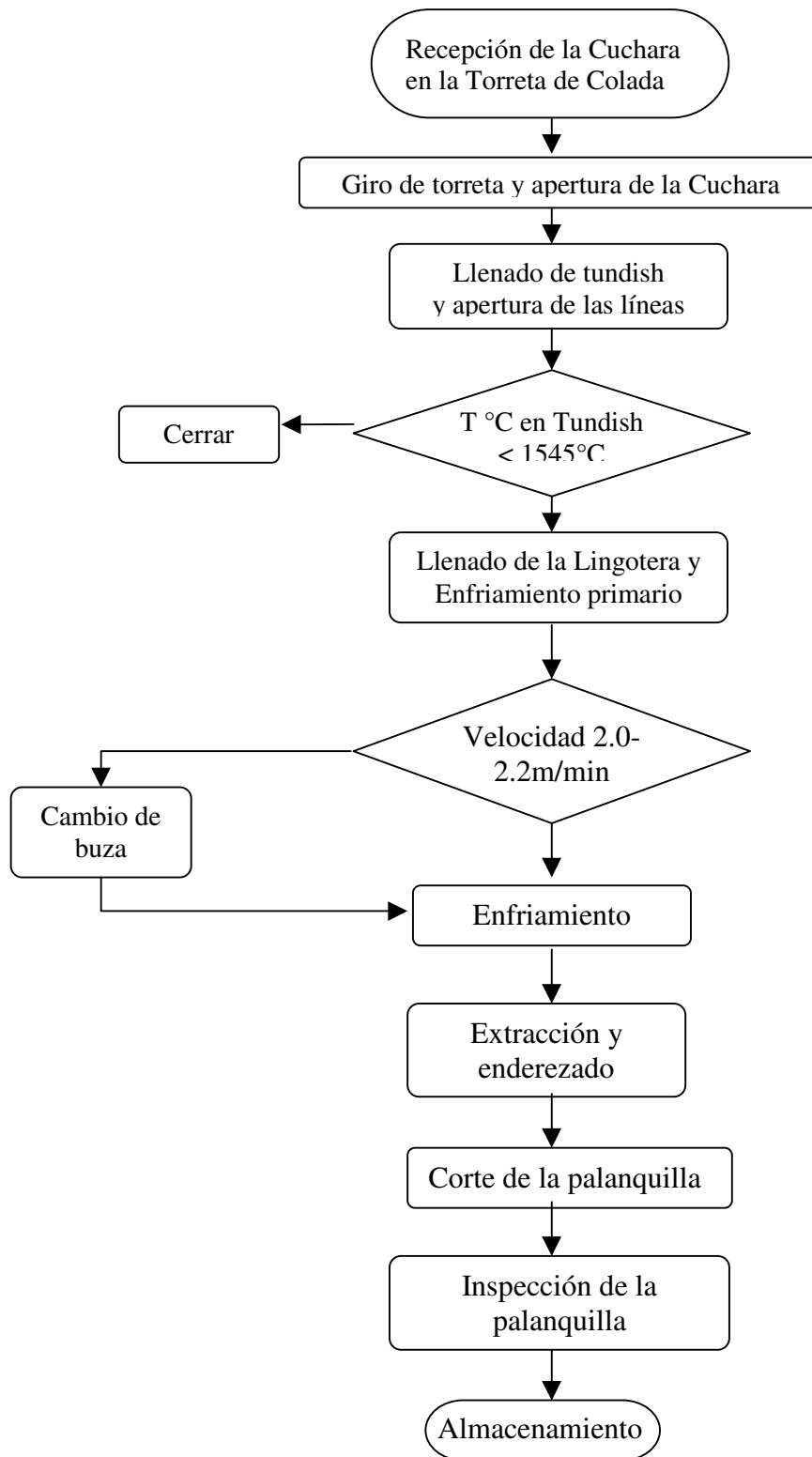


Fig.10.- Diagrama de flujo de la practica operativa en la Colada Continua.1008A2

ii.- ANALISIS QUIMICOS DE LAS MATERIAS PRIMAS E INSUMOS:

a.- La composición química de las principales materias primas son:

Tipo de Carga	Fe Total	Fe Metálico	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Sn	GM	SiO2
Chatarra Fragmentada Nacional	99.07	-	0.09	0.45	0.07	0.02	0.03	0.07	0.07	0.01	0.10	0.02	-	-
Chatarra Pesada	97.83	-	0.45	1.02	0.22	0.05	0.05	0.08	0.08	0.01	0.15	0.06	-	-
Chatarra Recuperación	99.62	-	0.07	0.06	0.03	0.02	0.02	0.04	0.04	0.01	0.08	0.01	-	-
Hierro Esponja a Gas	92.4	86.9	2.10	-	-	-	0.0005	-	-	-	-	-	94.05	1.1
Hierro Esponja a Carbón	88.7	82.1	0.02	-	-	-	0.0200	-	-	-	-	-	92.56	4
Perdígón	62	8.9	5.90	-	-	-	0.0900	-	-	-	-	-	14.35	5



Donde el perdigón es la materia prima que se obtiene del reciclado de los finos de pellets, carbón y briquetas, de manera de eliminar desechos.

**b.-** La composición química de los principales desoxidantes y desulfurantes son:

	Al %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	CaO %	SiO <sub>2</sub> %	F %	C %
FeAl	37	0	0	0	-	-
Al Ash Nacional	20	50	0	0	-	-
Al Ash Importado	15	50	0	0	-	-
Desulfurante EAF	4	26	54	3	16	
Desulfurante LF	0	0	56	2.5	35	10
Cal tipo A	0	0	87	0	-	-
Cal tipo B	0	0	92	0	-	-
Aluminato de Calcio	5	42	37	4	18	0

**c.-** La composición química de las principales ferroaleaciones y otros insumos son :

- Alambre Relleno de Ferrocacicio: 30%Ca
- Mn Electrolítico: 99,86% Mn
- FeMn Afinado: 80% Mn 1,5%C
- SiCa: 28% Si 30% Ca
- Cal: 89%CaO 3%SiO<sub>2</sub> 0,064%S
- Antracita: C fijo 92% MV 2,8% Cenizas 5,1% S 0,58%.
- Fluorita: 92%CaF<sub>2</sub> 6% SiO<sub>2</sub> 1%CaCO<sub>3</sub>
- CaC<sub>2</sub>: 59% Ca 21%C

## V. Aspectos Teóricos Fundamentales

---

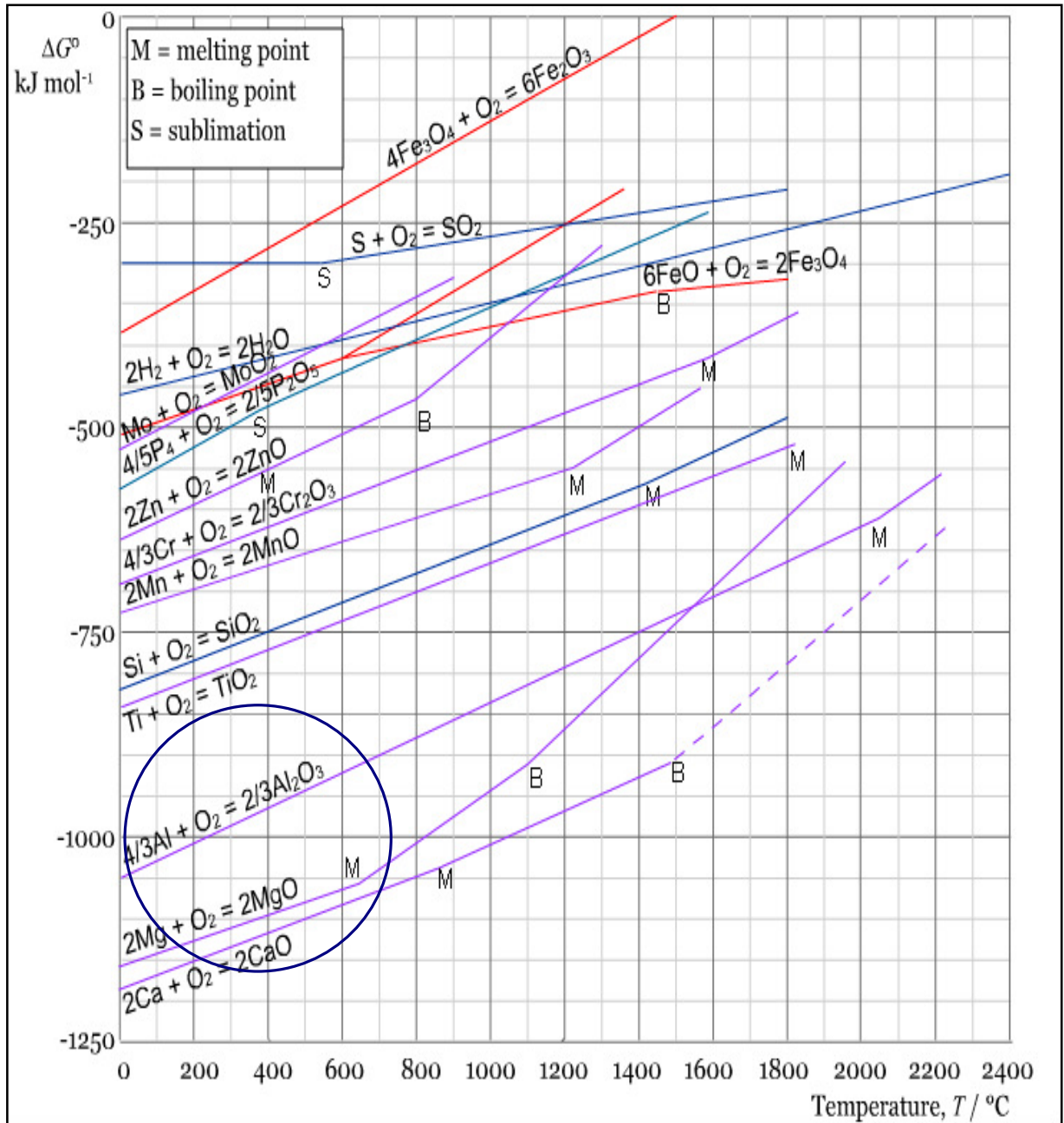
---

### i. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE DESOXIDACIÓN:

Los principales desoxidantes usados en esta calidad son el Aluminio y el Calcio, debido a la limitación de la composición química, en cuanto al carbono y al silicio, así como también al manganeso.

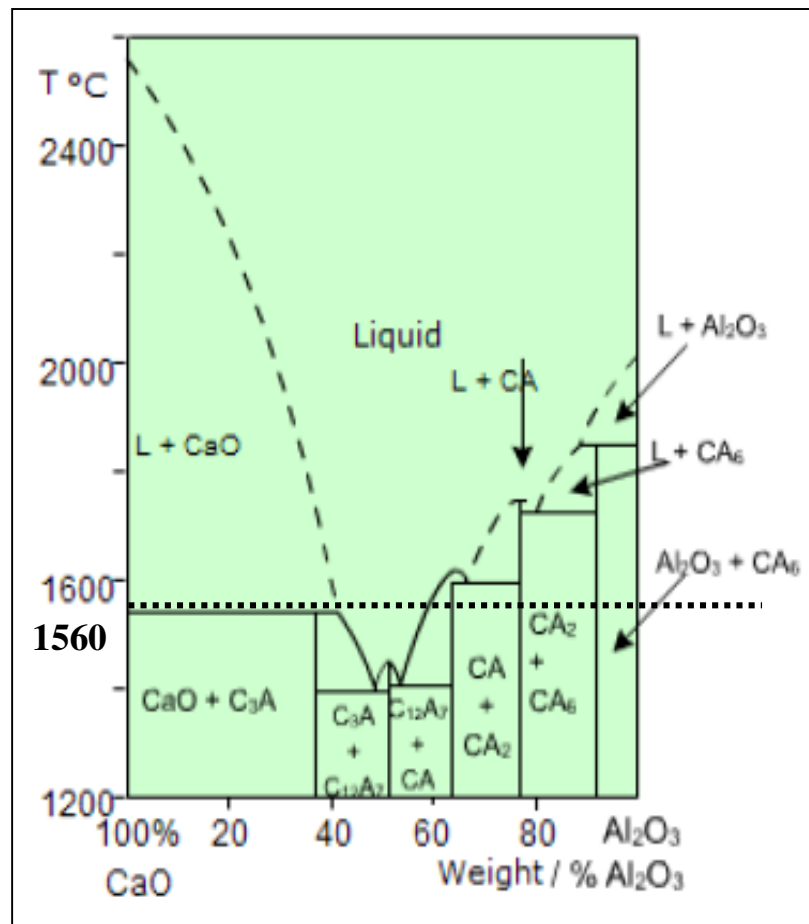
Estos dos elementos son muy ávidos por el oxígeno, tanto para desoxidar el acero como para reoxidarse con el oxígeno del aire cuando el acero líquido entra en contacto con el medio. Esto debido a que la reacción de ambos elementos con el oxígeno tiene una energía libre bastante baja, incluso menor que la del Silicio. Ver el siguiente diagrama de energía libre ( Fig.11).

En dicho diagrama, se observa que la reacción del calcio con el oxígeno tiene una energía libre inferior a la reacción de aluminio con oxígeno y esta a su vez menor que la reacción oxígeno-silicio. Por esta razón el calcio en el acero líquido tiene una fuerte tendencia a la reoxidación.



**Fig 11.- Diagramas de Energía libre  $\Delta G$  vs Temperatura. Fuente: Steeluniversity.org**

Termodinámicamente el aluminio y el calcio de los desoxidantes formarán inclusiones de acuerdo al siguiente diagrama de fases:

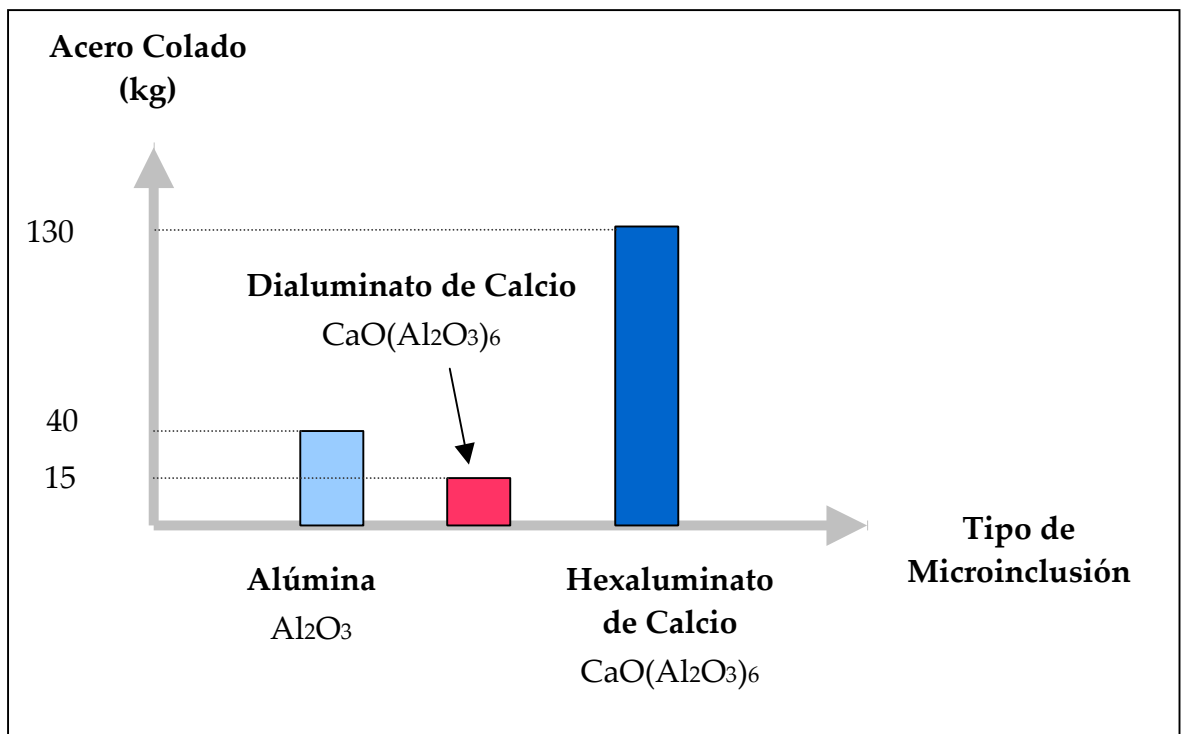


**Fig 12.- Diagrama de fases Binario CaO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**

Algunas fases tienen una temperatura de líquidus por encima de los 1560 °C, que es la temperatura de colado de este tipo de acero. Es decir las microinclusiones formadas serán sólidas dentro del acero líquido, el cual atraviesa las buzas del repartidor, pudiendo ocasionar cierre de buzas.

Farrell y Hilty (1) hicieron ensayos empíricos con respecto a la colabilidad. Estos consistían en elaborar aceros con distintos contenidos de calcio y aluminio, por lo tanto diferentes tipo de inclusiones, y colar un lingote de 130kg a través de una buza calibrada.

Durante el colado de prueba, si las inclusiones formadas eran de alúmina lograban pasar 40kg de acero a través de la buza calibrada hasta el taponamiento, pero si parte de las inclusiones eran de hexaluminato de calcio pasaban solo 15 kg el resto no pasaba por el taponamiento de la buza calibrada. Cuando el contenido de calcio en relación al de aluminio era suficiente para que se formara dialuminato de calcio, lograban colar el lingote completo, es decir no existía taponamiento.



**Fig 13.- Colabilidad del Acero de acuerdo al tipo de microinclusion existente. Ensayos de Farrell y Hilty.**

En el capítulo V se caracteriza los aluminatos de calcio que intervienen en el proceso.

**a.- Aspectos termodinámicos:**

Producto de la desoxidación se obtienen diversos tipos de microinclusiones. Para analizar el equilibrio entre el acero líquido y estas microinclusiones se necesita encontrar las energías libres de formación de los óxidos resultantes que se constituyen del oxígeno con los elementos disueltos en el acero. Para el estudio se deduce la curva de coexistencia entre el dialuminato de calcio  $\text{CaO}(\text{Al}_2\text{O}_3)_2$  (CA2) y el hexaluminato de calcio  $\text{CaO}(\text{Al}_2\text{O}_3)_6$  (CA6), para evitar el rango de cierre de buzas. De la termoquímica se plantean las siguientes ecuaciones:

ECUACION DE LA ENERGIA LIBRE (GIBS):

$$\Delta G_T = \Delta H_T - T\Delta S_T \quad \dots \quad (\text{V.i.a.1})$$

ENTALPIA :

$$\Delta H_T = \Delta H_{298} + \Delta H_{298-T} \quad \dots \quad (\text{V.i.a.2})$$

ENTROPIA:

$$\Delta S_T = \Delta S_{298} + \Delta S_{298-T} \quad \dots \quad (\text{V.i.a.3})$$

CAPACIDAD DE CALOR A P CTE:  $C_p = a + bT + cT^{-2} \quad \dots \quad (\text{V.i.a.4})$

Valores obtenidos de las tablas termodinámicas Kubachski (6).

	Cp(cal.K <sup>-1</sup> ,mol <sup>-1</sup> )*			$\Delta H_{298}$ (Kcal/mol)	$\Delta S_{298}$ (cal/grado.mol)
	a	b.10 <sup>-3</sup>	c.10 <sup>5</sup>		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27,38	3,08	-8,2	-400,0	12,2
CaO	11,86	1,08	-1,66	-151,5	9,5
Al	7	0	0		
Ca	7,4	0	0		
O	7,16	1	-0,4		

**Tabla 3.- Tabla de Valores de Cp, entalpías y entropías de formación del óxido de calcio y el óxido de aluminio.**

Con estos valores se encuentra la variación del calor de fusión a presión constante (Cp) en función de la temperatura, reemplazándolos en la ecuación (V.i.a.5). Luego se encuentra la variación de la entalpía y entropía a cualquier temperatura según las expresiones planteadas a continuación.

$$\Delta C_p = C_p \text{ (productos)} - C_p \text{ (reactantes)} \quad \dots \quad (\text{V.i.a.5})$$

	<u>a</u>	<u>b</u>	<u>c</u>
$\Delta C_p \text{ Al}_2\text{O}_3$	-8.1	0	-700000
$\Delta C_p \text{ CaO}$	-2.7	0	-126000

Luego:

$$\Delta H_{298-T} = \int \Delta C_p . dT \quad \dots \quad (\text{V.i.a.6})$$

$$\Delta S_{298-T} = \int \Delta (C_p/T) . dT \quad \dots \quad (\text{V.i.a.7})$$

Reemplazando los valores de la variación de Cp en las ecuaciones (V.i.a.6) y (V.i.a.7) e integrando se obtiene las siguientes expresiones:

$$\Delta H_{298-T} = a'(T - 298) + 0.5.b'(T^2 - 298^2) + c'(-1/T + 1/298) \quad \dots \quad (V.i.a.8)$$

$$\Delta S_{298-T} = a'(\ln(T/298)) + b'(T-298) - 0.5.c'(1/T^2 - 1/298^2) \quad \dots \quad (V.i.a.9)$$

Debido a que el estudio de la formación de los aluminatos de calcio es de interés a la temperatura de colado, se evalúan las anteriores expresiones a 1560°C. Luego estas dos ecuaciones se reemplazan en la ecuación (V.i.a.2) y (V.i.a.3). Finalmente se halla la energía libre a esta temperatura en la ecuación (V.i.a.1) y usando las entalpías y entropías de formación.

	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	
$\Delta H_{298-T}^{\circ}$	-15033,538	-4505,215	cal/mol
$\Delta S_{298-T}^{\circ}$	-18,429	-5,473	cal/(mol.K)
$\Delta G_{T}^{\circ}$	-403.616	-163.387	kcal/mol

Entonces:

<u>Reacción</u>	<u><math>\Delta G</math> (kcal/mol)</u>
<u>2Al</u> + <u>3Q</u> = Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-403,62
<u>Ca</u> + <u>Q</u> = CaO	-163,39



Calculadas las energías libres de las reacciones del óxido de calcio y la alúmina a 1560°C, por operaciones aritméticas se encontraron también las energías libres de las reacciones de formación del dialuminato de calcio y el hexaluminato de calcio a la misma temperatura.

<u>Reacción</u>	<u>ΔG (kcal/mol)</u>	
$4\text{Al} + \text{Ca} + 7\text{O} = \text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$	-970,62	CA2
$12\text{Al} + \text{Ca} + 19\text{O} = \text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$	-2585,08	CA6

El siguiente paso es encontrar las constantes de equilibrio para ambos aluminatos y luego igualar la actividad del oxígeno de ambas expresiones para encontrar una relación entre las actividades del aluminio y el calcio.

$$K_{C(CA2)} = (a_{\text{Al}}^4 \cdot a_{\text{Ca}} \cdot a_{\text{O}}^7)^{-1} \quad \dots \quad (\text{V.i.a.10})$$

$$K_{C(CA6)} = (a_{\text{Al}}^{12} \cdot a_{\text{Ca}} \cdot a_{\text{O}}^{19})^{-1} \quad \dots \quad (\text{V.i.a.11})$$

Igualando  $a_{\text{O}}$  (ecuaciones V.i.a.10 y V.i.a.11) y despejando  $a_{\text{Ca}}$ :

$$a_{\text{Ca}} = (K_{C(CA6)}^{7/12} / K_{C(CA2)}^{19/12}) \times a_{\text{Al}}^{2/3} \quad \dots \quad (\text{V.i.a.12})$$

Para encontrar las constantes de equilibrio se evalúa la siguiente expresión a 1560°C (1833 k):

$$\Delta G = - RT \ln K \quad \dots \quad (\text{V.i.a.13})$$

Donde:

R: Constante universal de los gases ( 1,987 cal/mol.K).

T: Temperatura de colado en Kelvin (1833 K)

K: Constante de Equilibrio a encontrar.

$\Delta G$ : Energía libre en Kcal/mol encontrada a 1833K.

Reemplazando R y expresando la ecuación en función de logaritmo decimal:

$$\Delta G = -4,57.T.\log K$$

$$K = 10^{(-\Delta G/4,57.T)}$$

Evaluando para los aluminatos en estudio:

$$K_{C(CA_2)} = 1,31$$

$$K_{C(CA_6)} = 2,03$$

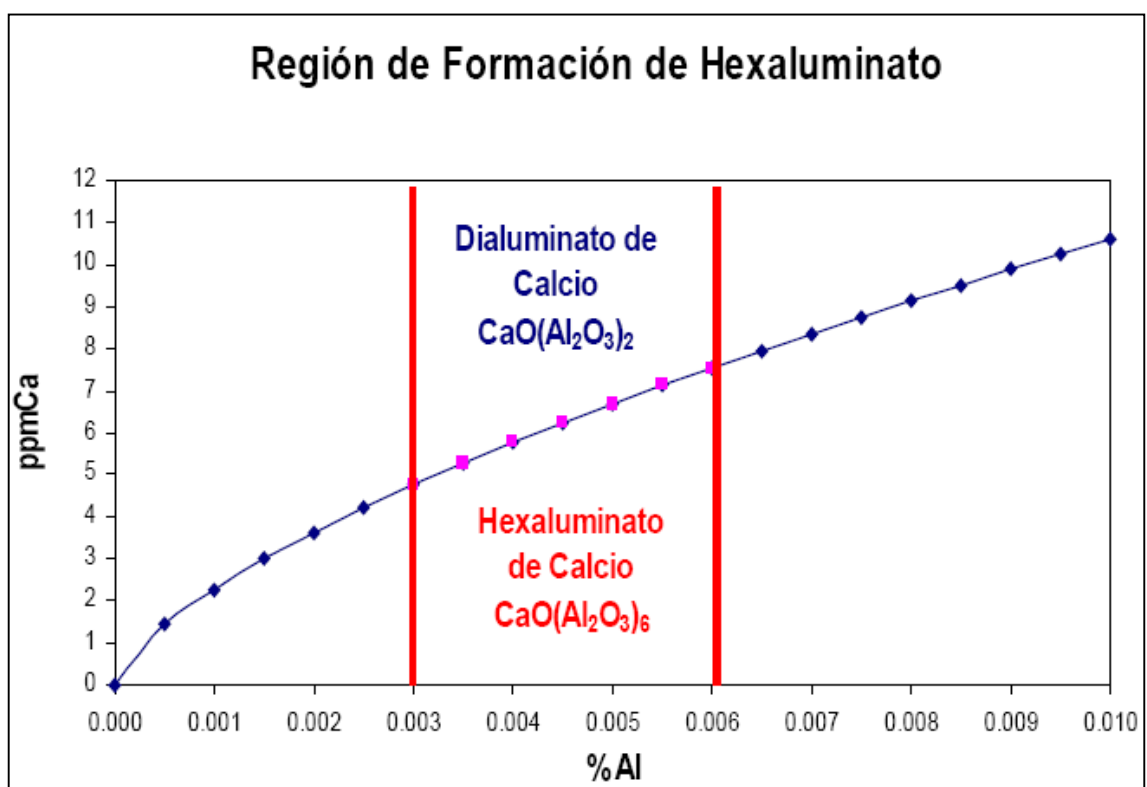
Calculadas las constantes de equilibrio se reemplazan en la ecuación (V.i.a.12), obteniendo:

$$a_{Ca} = 9.92 \times 10^{-1} a_{Al}^{2/3}$$

Encontrada la ecuación de la curva de coexistencia entre el dialuminato de calcio y el hexaluminato de calcio. Luego se obtiene la gráfica mediante tabulación, con los siguientes valores de fugacidad:

$$f_{Ca} = 2.3 \times 10^{-6}$$

$$f_{Al} = 1.0$$



**Fig 15.- Rango de Formación de Aluminatos de Calcio**

Para el rango de trabajo actual del aluminio total(0,003 – 0,006), según gráfica se necesita un contenido de calcio de 5 a 8ppm, obteniéndose un ratio Ca/Al de 0.13 a 0,15 mínimo, es decir para una cantidad de 0.005% de Al se necesitará 0.0007%Ca o lo que es lo mismo 7ppm de calcio. En la práctica un ratio Ca/Al total de 0,20 es el valor encontrado como mínimo necesario para asegurar la colabilidad del acero en el momento que pase por las buzas del tundish.

En dicha gráfica (fig. 15) se observa una coexistencia entre ambos aluminatos y para un porcentaje de aluminio dado se necesita un porcentaje de calcio mínimo, para evitar la región de formación del hexaluminato de calcio. De lo cual se puede deducir un ratio calcio total y aluminio total. Los datos on-line de la planta analizados con el equipo ARL son de calcio y aluminio total, además también se cuenta con la medición de Al soluble.

Sin embargo el calcio no es estable en el acero y va disminuyéndose por reoxidación con el medio, reduciendo el ratio Ca/Al a niveles de formación del hexaluminato de calcio, el cual se irá acumulando en las buzas del distribuidor descendiendo la velocidad de colado, este descenso de velocidad afecta la calidad de la palanquilla, debido a que alterará los parámetros de oscilación y patrones de refrigeración secundaria. Esta presencia de hexaluminato de calcio es observada como un lagrimeo de la buzas (acumulación), el cual distorsiona además el chorro de acero líquido causando problemas operativos, pudiendo llegar a perderse la línea. De continuar el problema se produce un cierre de buzas o una perforación de la línea de colada.

### **b.- Aspectos cinéticos:**

La velocidad de desoxidación depende del tiempo de agitación con gas inerte argón y de la proporción del área cubierta por la escoria. Sin embargo, sólo se logra una efectiva desoxidación por aluminio en presencia de una escoria apropiada con baja actividad de oxígeno. La escoria obtenida en el horno eléctrico tiene una alta actividad de oxígeno. Por lo tanto, es necesario minimizar el traspaso de esta escoria y convertirla en una escoria básica. Para este objetivo la escoria se desoxida con granalla de aluminio y escorias sintéticas que preparan además la escoria para poder desulfurar rápidamente el acero.

El calcio a la temperatura de trabajo está en estado gaseoso, por tanto su rendimiento al adicionarlo es bastante bajo ya que en contacto con el acero se evapora y debido a su alta afinidad al oxígeno se reoxida rápidamente con una escoria no muy bien desoxidada o con el medio ambiente. Por tanto

conocer como se comporta el calcio a través de su paso desde el horno cuchara hasta las buzas del distribuidor es indispensable, para poder predecir su disminución de concentración en el proceso y proveer la cantidad de calcio que debe tener el acero para un aluminio dado al salir del horno cuchara, de manera que cuando pase exactamente por las buzas del tundish se tenga un ratio mayor al calculado garantizando así la colabilidad del acero.

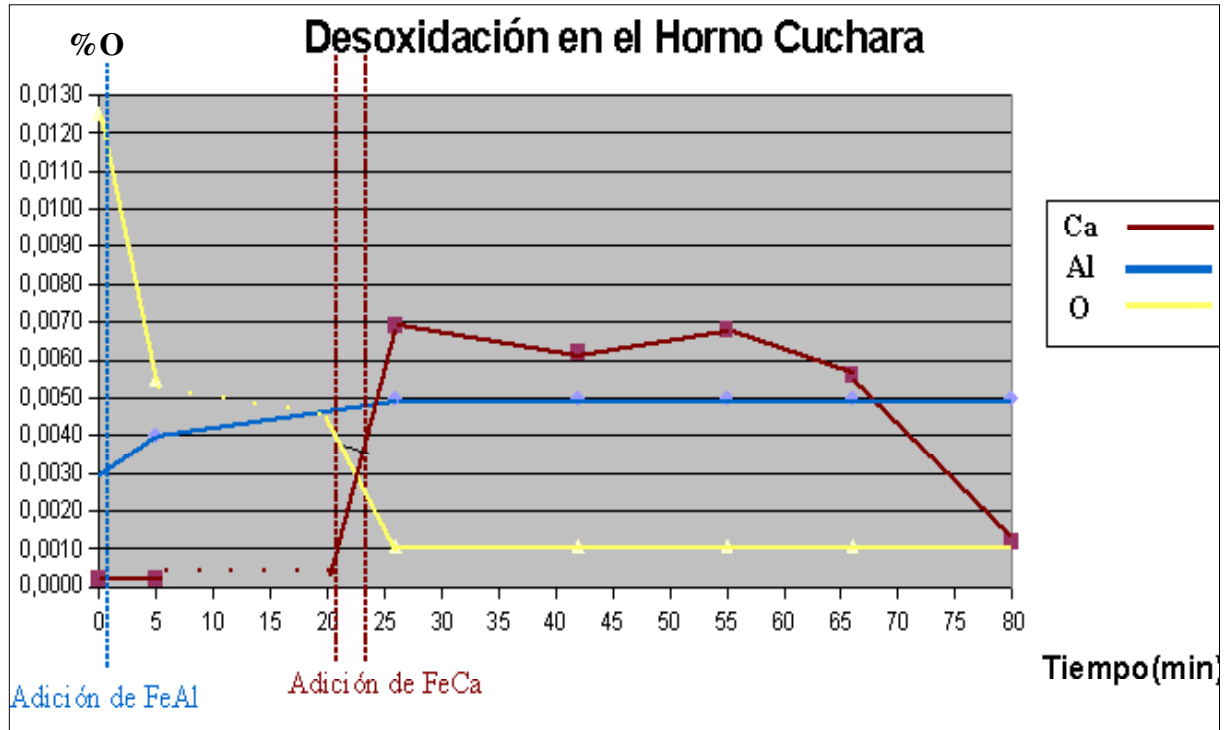
Por otro lado elevar el contenido de calcio intencionalmente es un gasto considerable que repercutirá en el costo de la palanquilla, aproximadamente 50m de FeCa usados aumenta un dólar por tonelada el costo de la palanquilla; normalmente en esta calidad de acero se usan de 200 a 250m de Ferro calcio. Además el calcio en exceso desestabiliza el MgO de las placas deslizantes del sistema de apertura y cierre de las cuacharas cuando el acero líquido pasa de la cuchara al tundish.

Se muestran los datos acerca de la cinética de la adición del calcio y su reoxidación a través del tiempo:

Etapa	Hora	Tiempo (min)	Al (%)	Ca (%)	Ratio (Ca/Al)	O %
Antes de la Adición de FeAl	00:40	0	0.003	0.0002		0.0125
Antes de la Adición de FeCa	00:45	5	0.004	0.0002		0.0055
Final de Cuchara	01:06	26	0.005	0.0069	1.38	0.0011
Torreta	01:22	42	0.005	0.0062	1.24	
	01:35	55	0.005	0.0068	1.36	
	01:46	66	0.005	0.0056	1.12	
Tundish	02:00	80	0.005	0.0012	0.24	0.0012

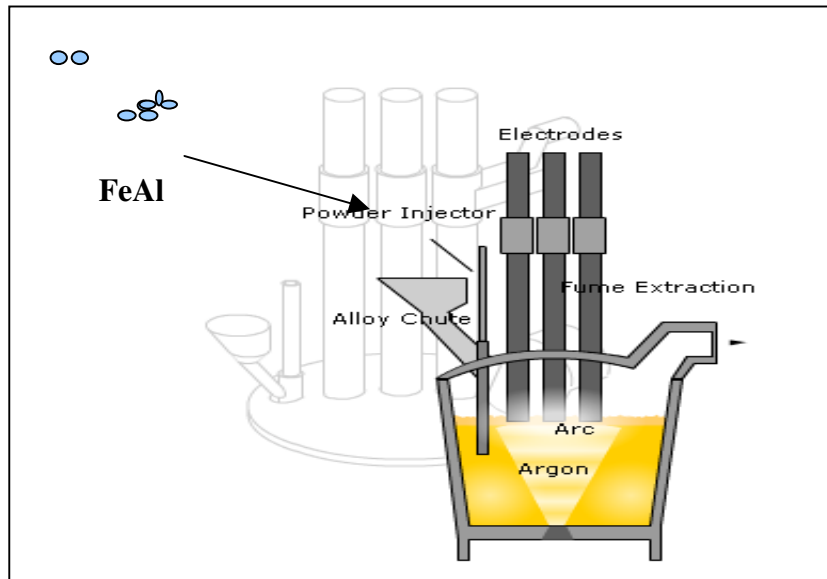
**Tabla 4.- Cinética de Desoxidación y Reoxidación del Calcio**

En esta tabla se observa como el aluminio se mantiene prácticamente en el valor 0.005% durante casi todo el proceso. El calcio luego de la inyección de ferrocalcio empieza a disminuir su valor desde 69ppm hasta 12ppm. El contenido de oxígeno soluble en el acero líquido con el que se envía a colar es de 11ppm. Con estos valores se elabora la siguiente gráfica:



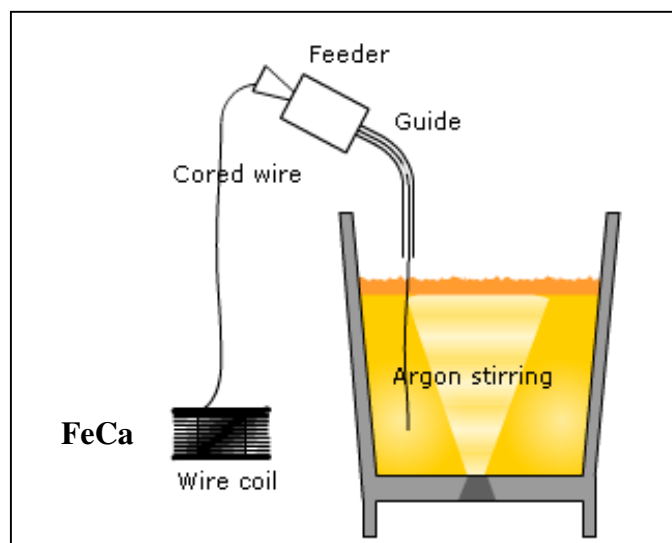
**Fig 16.- Gráfica de la Cinética de Desoxidación y Reoxidación**

El oxígeno soluble que se tiene en el acero a su llegada al horno cuchara es de 100-130 ppm. El primer paso para desoxidar el acero es agregar bolsas de ferroaluminio según el oxígeno soluble, considerando que 1 kg de FeAl disminuye en oxígeno en 5,2ppm. Esta adición es acompañada de una agitación vigorosa. En la gráfica se observa que al adicionarle ferroaluminio las ppm de oxígeno disminuyen desde 125 a 55 ppm, lo que es lo mismo de 0,0125% a 0,0055%.



**Fig 17.- Adición de Ferroaluminio para Reducir las ppm de Oxígeno soluble**

Mientras se continúa la desoxidación y tratamiento de la escoria y ajuste de composición química el oxígeno soluble va disminuyendo levemente. Al final del ajuste de la composición química y con una escoria tratada se adiciona el ferrocálcio a manera de alambre relleno. Al agregarle FeCa las ppm de oxígeno disminuyen hasta valores menores a 15ppm.



**Fig 18.- Inyección de Ferrocálcio en el acero líquido**

La desoxidación inicial con FeAl forma microinclusiones de alúmina, las cuales son de alto punto de fusión(1940°C), por lo que permanecen sólidas a la temperatura de colado, ocasionando descensos de la velocidad de línea y taponamiento de las buzas del tundish.

Luego de la adición del calcio, en forma de FeCa, el calcio se vaporiza dentro del acero(punto de ebullición 1491°C), de allí su rendimiento muy bajo en la adición. Esta adición se realiza con una agitación suave para no exponer el acero al medio ambiente, es decir sin romper la escoria y la inyección del FeCa se realiza a una gran velocidad (100 m/min) para que el tubo de hierro se funda a la mayor profundidad posible, liberando el calcio en el fondo logrando rendimientos mayores. El vapor del calcio reacciona con el oxígeno del óxido de hierro y la alúmina, desoxidando parcialmente el baño y transformando morfológicamente las microinclusiones de alúmina. A continuación se muestra una secuencia de la desoxidación:

1.- Producto de la desoxidación con Al se tienen inclusiones de alúmina en el acero líquido. Estas inclusiones pueden precipitarse en las buzas del distribuidor y cuchara, pudiendo ocasionar un clogging o cierre de buzas. Al inyectarle el Ca este se ioniza dentro del acero y escoria.

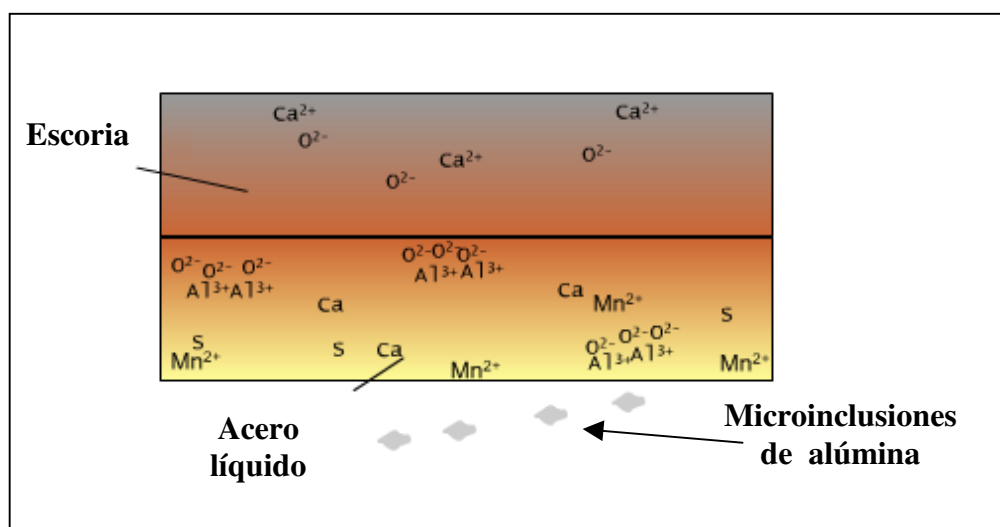
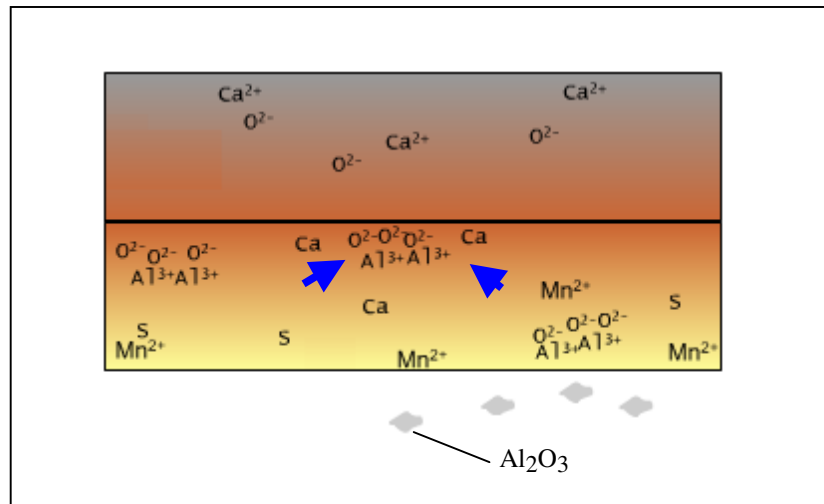


Fig 19.- Desoxidación inicial con ferroaluminio

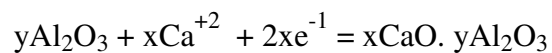


2.- El calcio ionizado migra hacia el oxígeno y compite con los demás desoxidantes. El calcio debido a su alta afinidad por el oxígeno, desplaza parcialmente a aluminio dentro de la inclusión. Esta afinidad del calcio con el oxígeno se torna perjudicial cuando el acero líquido es trasvasado de la cuchara al tundish y del tundish al molde debido a que se reoxida fácilmente.

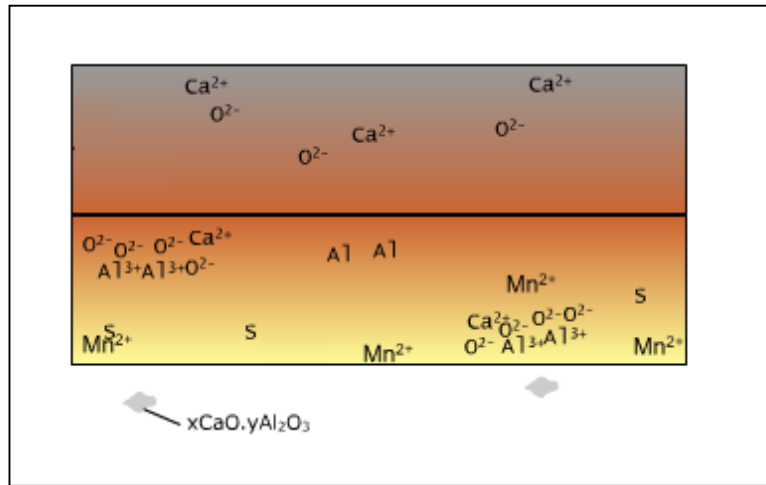


**Fig 20.- Desoxidación posterior con calcio por inyección**

3.- El calcio desplaza al aluminio del oxígeno parcialmente por su mayor afinidad según la siguiente reacción de sustitución:

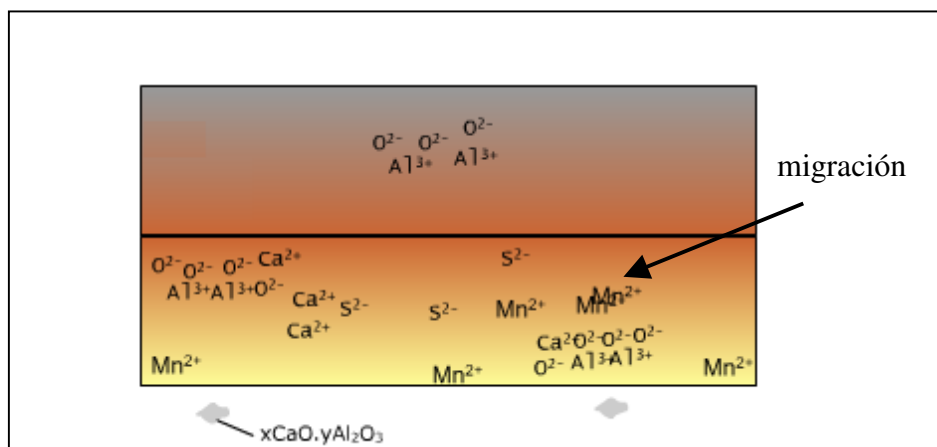


Estas inclusiones, se transforman de alúmina a aluminatos, es decir la inclusión formada será ahora un complejo de alúmina con óxido de calcio. Dependiendo de la cantidad de calcio inyectado esta inclusión podrá ser un aluminato, dialuminato o hexaluminato de calcio principalmente. Acompañando a este cambio de composición química va también un cambio morfológico.



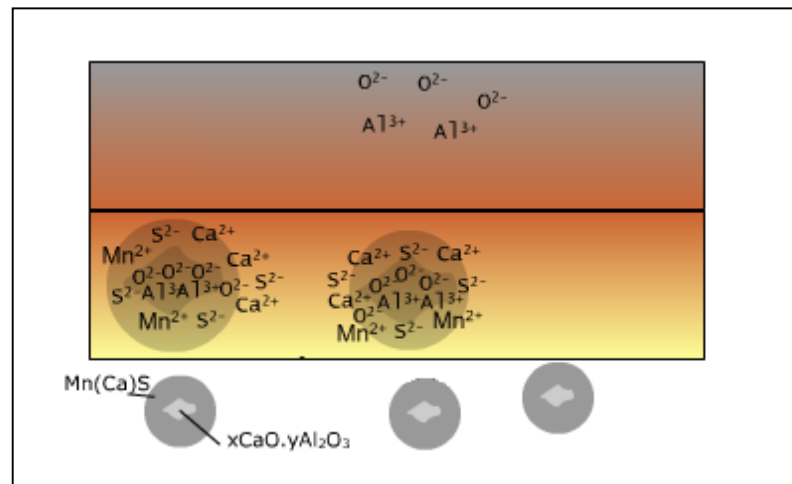
**Fig 21.- Sustitución parcial del aluminio por el calcio**

4.- Los iones de Ca, Mn y S rodean las microinclusiones de aluminatos de calcio. Los sulfuros de manganeso y calcio son los siguientes en formarse y se depositan alrededor de los aluminatos. Se forman luego de los aluminatos, debido a que el calcio es más afín por el oxígeno que por el azufre; y el manganeso menos afín por el oxígeno que el calcio y el aluminio, reacciona con el azufre.



**Fig 22.- Formación de Anillos de sulfuro de manganeso**

5.- Los oxisulfuros globulares mixtos han reemplazado a los sulfuros alargados de manganeso y óxidos alargados de alúmina. Resultado del proceso de desoxidación con aluminio y tratamiento con calcio se obtienen microinclusiones complejas de aluminatos rodeados de sulfuros.



**Fig 23.- Formación de oxisulfuros globulares**

Esta modificación de morfología y composición química de la microinclusión por adición de calcio mejora también la maquinabilidad, adicionalmente a evitar el clogging o cierre de buzas.

**c.- Mecanismo de taponamiento o cierre de buzas:**

Para entender el mecanismo de taponamiento de buzas, primero hay que describir el tipo de microinclusiones principales que interactúan con el acero líquido.

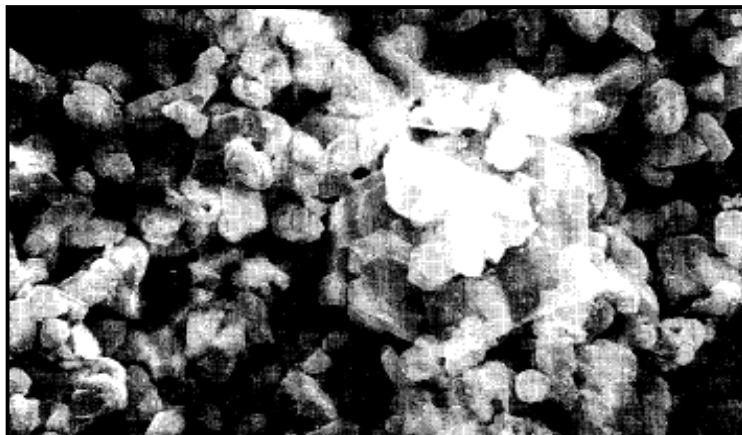
El causante del taponamiento de buzas es el hexaluminato de calcio, el cual tiene las siguientes características:

Densidad: 3,38 gr/cm<sup>3</sup>

Punto de Fusión: 1850 °C

Dureza Vickers: 2200

Forma: Compleja(racimo)



**Fig 24.- Microinclusión de Hexaluminato de Calcio**

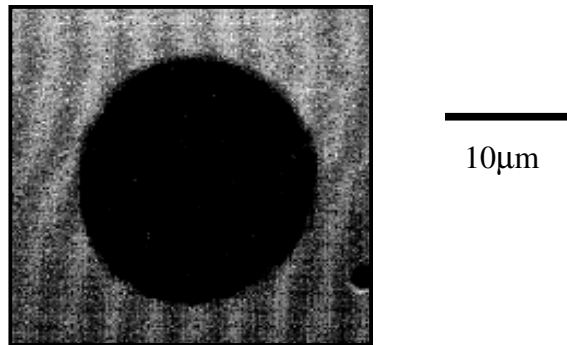
Esta microinclusión, cambia morfológicamente con la inyección de calcio. La microinclusión resultante es el dialuminato de calcio de las siguientes características:

Densidad: 2,91 gr/cm<sup>3</sup>

Punto de Fusión: 1750 °C

Dureza Vickers: 1100

Forma: Esferoidal



**Fig 25.- Microinclusión de Dialuminato de Calcio**

El cierre de buzas se produce por la formación de hexaluminato de calcio según las pruebas de Farrel y Hilty (1). Esto debido a que las microinclusiones sólidas de hexaluminato de calcio tienen una forma de racimo de uvas las cuales se van acumulando en la buza del distribuidor, reduciendo la velocidad de colado hasta producirse el cierre de buzas. Para cambiar la morfología de esta inclusión, se inyecta el calcio el cual transforma el hexaluminato en dialuminato de calcio. Esta nueva microinclusión atraviesa la buza sin mayor problema, mejorando la colabilidad del acero líquido.

En los aspectos termodinámicos se encontró la curva de coexistencia de ambas microinclusiones y el calcio necesario para un porcentaje de aluminio dado, de manera de no producir clogging. En la colada continua el acero líquido pasa desde la cuchara al tundish, en esta exposición del chorro, el acero líquido reoxida, produciéndose una desestabilización del calcio de las inclusiones, aumentando el ratio de calcio/aluminio, pudiendo llegar a niveles de preferente formación de hexaluminato de calcio ocasionando problemas de disminución de la velocidad y/o cierre de buzas.

## **ii. MECANISMO DE FORMACIÓN DE DEFECTOS SUPERFICIALES:**

### **a. Pinhole o Porosidad Superficial:**

#### Definición:

El pinhole o porosidad superficial tiene diversos orígenes tales como: Una pobre desoxidación del acero, un alto contenido de Hidrógeno y Nitrógeno; un flujo de aceite en abundancia en el molde. Ver fig. 35 y 36.

De las gráficas de Sievert (ecuación 2), el hidrógeno es el gas más importante en la formación de porosidades superficiales. Es decir 0.5ppm de Hidrógeno puede definir la formación o no de pinholes. Su equivalencia en cuanto a la formación de pinhole con otros gases es:

Hasta los 4.5ppm de H:

- 1ppm de H equivale a 5ppm de Oxígeno

- 1ppm de H equivale a 10ppm de Nitrógeno

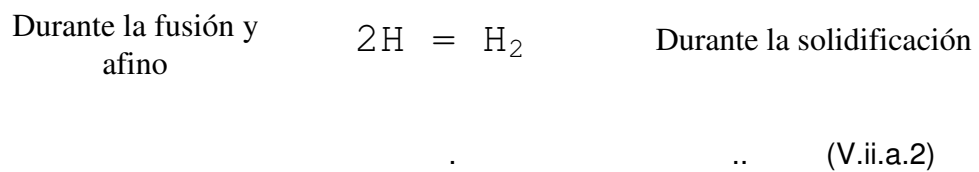
Pasado las 4.5ppm la equivalencia se duplica o triplica. De tener 7ppm a más de H, la formación de pinholes es inevitable.

La formación del pinhole(porosidad superficial) al igual que el blowhole (sopladura) se produce cuando la suma de las presiones parciales de los gases disueltos en el acero: monóxido de carbono(debido al oxígeno), hidrógeno y nitrógeno exceden a la presión atmosférica(1atm).

$$P_T = P_{CO} + P_{H_2} + P_{N_2} \quad \dots \quad (V.ii.a.1)$$

Si  $P_T > 1 \text{ atm}$  se formará porosidad

Estos gases están en el acero en su forma monoatómica es decir O(formando CO), H y N y al solidificar el acero saldrán para retornar a su forma molecular, debido a que la solubilidad del oxígeno en el acero líquido(0,16%) es mucho mayor que en el acero sólido(0,003%), de igual forma sucede con el resto de gases, por ejemplo para el caso del hidrógeno está dado por la reacción:



Ley de Sievert:

Existen diversas gráficas termodinámicas basadas en esta ley, en las cuales directamente se observa si existe la condición o no de formar pinhole. La Ley de Sievert se expresa a continuación:

$$(\text{H}) = K\sqrt{P_{\text{H}_2}} \quad \cdot \quad (\text{V.ii.a.3})$$

donde:

(H): Concentración de Hidrógeno atómico disuelto

K: Constante de Sievert

$P_{\text{H}_2}$  : Presión parcial del gas Hidrógeno.

A manera de explicación se analizará el ejemplo siguiente:



De las ecuaciones de Sievert se pueden trazar gráficas para evaluar la tendencia a la formación de porosidad en función del contenido de gases disueltos. Por ejemplo el siguiente acero 1008A2 con el siguiente contenido de carbono y composición de gases:

%C	Oxígeno (ppm)	Nitrógeno (ppm)	Hidrógeno (ppm)
0.08	12.0	70	6.5

Paso 1: Se ubica en la figura 1, el contenido de los gases Nitrógeno en el eje horizontal e Hidrógeno en el eje vertical, para el ejemplo esta intersección corresponde al Punto A. Posteriormente se observa que la curva 1.0 corresponde a este punto, es decir, la suma de presión parcial del H<sub>2</sub> y N<sub>2</sub> es 1.0 atm.

$P_{H_2} + P_{N_2} = 1.0 \text{ atm}$ , El valor está al límite de pasar a la región de formación de porosidad, es decir el contenido de oxígeno en el acero debe ser 0 atm.

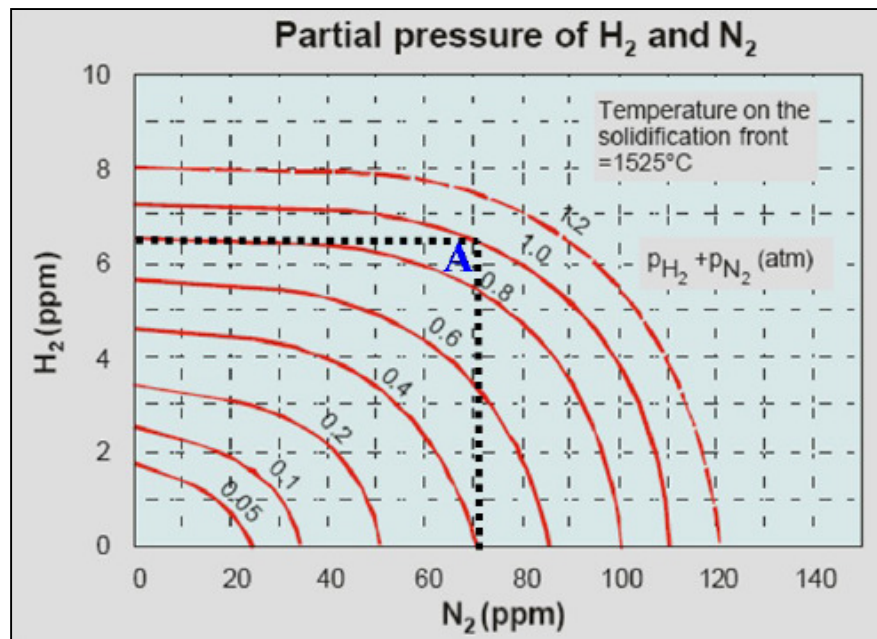
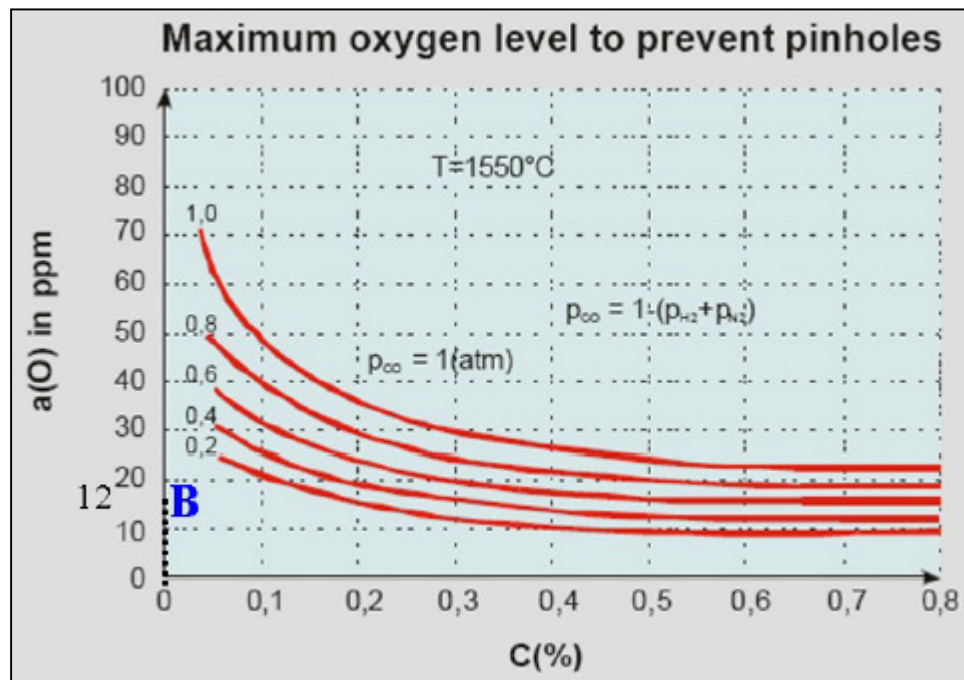


Fig 26.- Suma de las presiones parciales del Hidrógeno y Nitrógeno

Paso 2: En la figura N2, ubicamos el porcentaje de carbono de la muestra en el eje horizontal, el cual es 0.15% e interceptamos con la curva correspondiente a 0.2 atm de presión de CO, de manera que en el eje vertical se puede encontrar el valor límite del contenido de oxígeno soluble en ppm. Para el ejemplo corresponde en el gráfico a 18ppm.



**Fig.27.- Formación del Pinhole debido a los tres gases CO, H<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>**

Paso 3: Comparar con el oxígeno soluble presente medido en el acero líquido, para la muestra es 12ppm. Este valor está por encima del valor límite encontrado, es decir está en la región de formación de pinhole. Por lo tanto en la colada continua se inyectará aluminio para eliminar este oxígeno soluble.

**b.- Marca de oscilación:**

Definición:

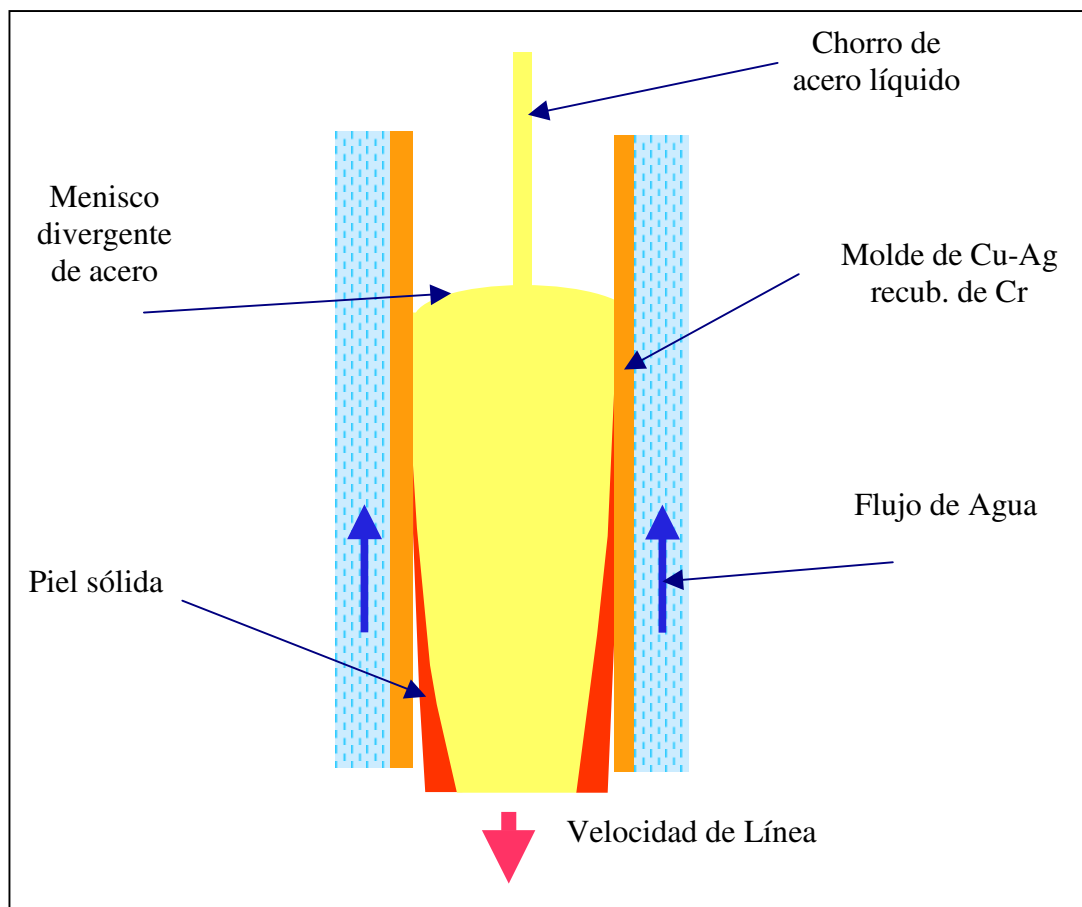
La producción de palanquilla de alta calidad está ligada al movimiento de oscilación de la lingotera, por lo que se le considera el evento más importante para el control de perforaciones y defectos superficiales en la palanquilla.

La finalidad del movimiento oscilador es evitar la adherencia del acero a la lingotera durante la solidificación.

Para una buena operación de la Máquina de Colada Continua, es necesario sincronizar la oscilación con la velocidad de extracción de la palanquilla, lo cual implica correlacionar varios parámetros como son: Amplitud de carrera, frecuencia de oscilación, velocidad de línea (extracción) y el tiempo de strip negativo ó heal time.

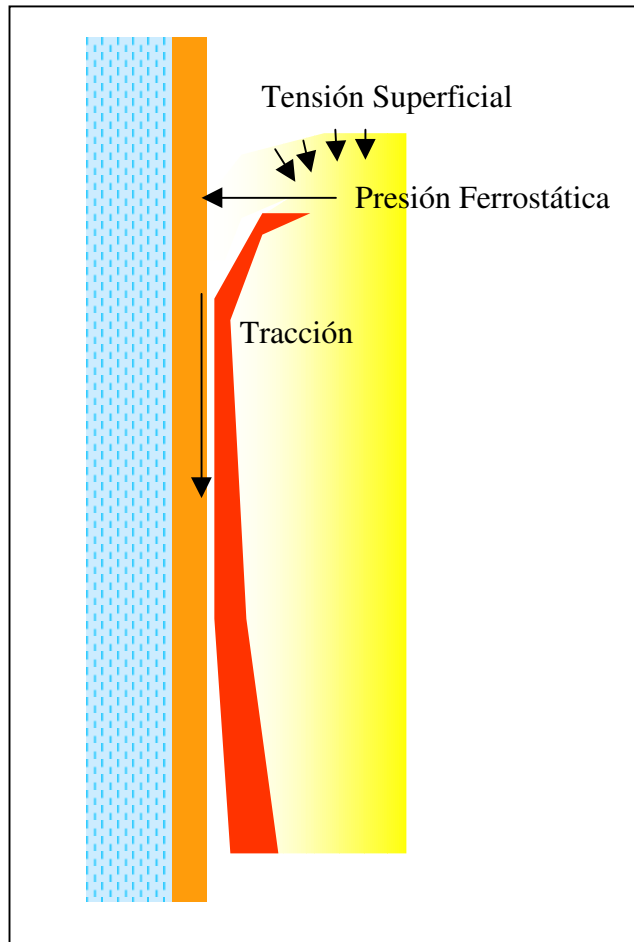
Se define como tiempo de strip negativo(TSN) al tiempo durante el cual el molde desciende más rápido que la barra, produciéndose la extracción o stripping de manera continua. Pero si este (TSN) es muy grande la palanquilla puede sufrir marcas de oscilación. A continuación se describe la formación de la marca de oscilación:

1.- El acero líquido en el molde se va enfriando por conducción de calor, debido a la transferencia de calor del acero al agua, a través de la pared del molde. De esta manera el acero se va solidificando formando una piel muy delgada la cual es suficiente para resistir los esfuerzos externos a las salida del molde.



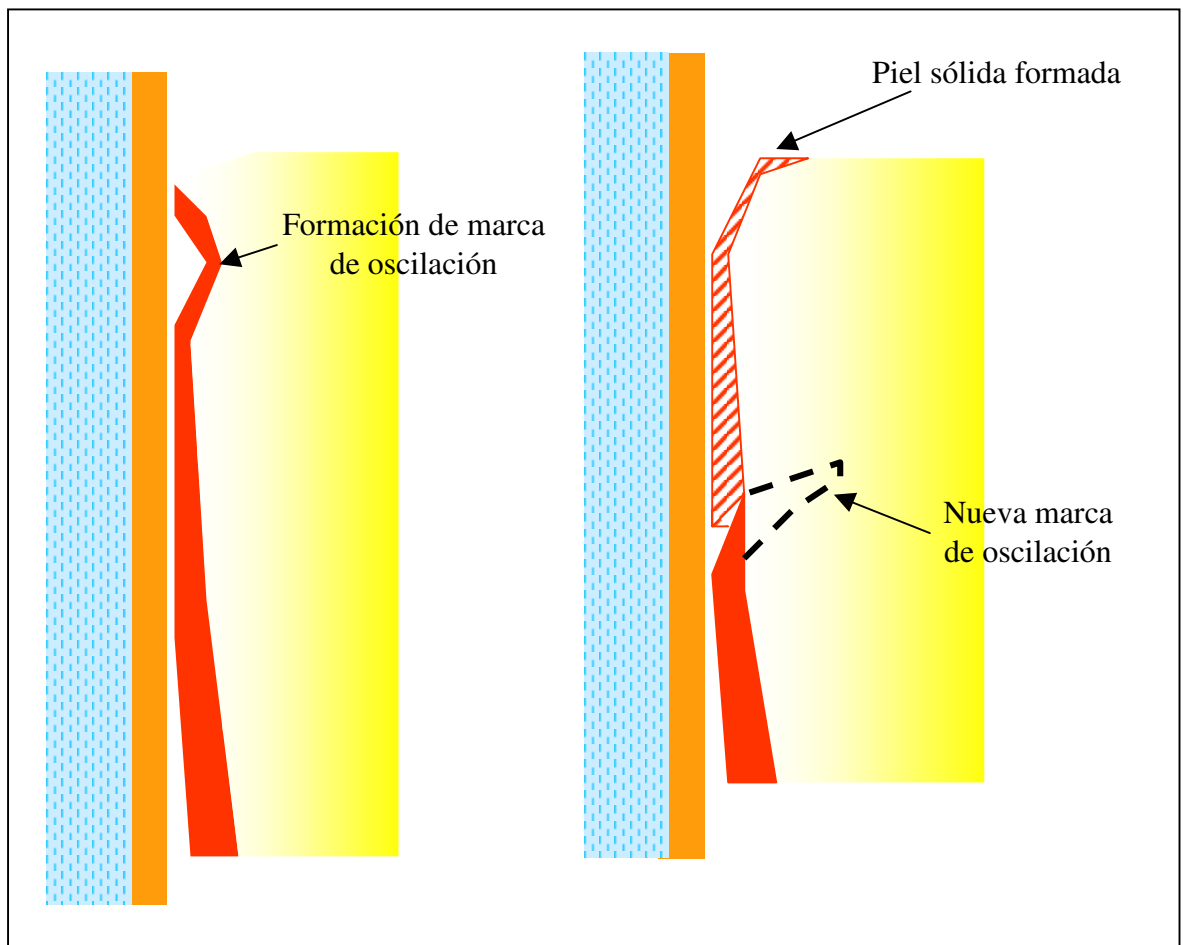
**Fig.28.- Formación de la piel sólida de acero**

2,- Durante el tiempo de strip negativo(ver pag. 59), el molde ejerce una tracción al menisco por fricción, y sumado a la presión ferrostática superan las fuerzas de tensión superficial haciendo un desborde del menisco a manera de olas, dejando la marca de oscilación.



**Fig.29.- Desborde del menisco sobre la piel solidificada**

3.- Este fenómeno se repite en cada ciclo de la oscilación, y es de mayor intensidad al aumentar el tiempo de strip negativo, produciendo una marca mas profunda. El problema principal que puede producir la marca de oscilación es la grieta transversal en la misma marca de oscilación.



**Fig.30.- Generación de la marca de oscilación**

Mecanismo de Oscilación:

La lingotera va montada sobre la mesa móvil y su oscilación tiene lugar por un accionamiento excéntrico de acuerdo con una curva geométrica que corresponde al radio de colada (5000 mm).

Debido al accionamiento excéntrico, la velocidad de la lingotera varía durante el movimiento ascendente y descendente según una función sinusoidal.

$$V = \pi n a \cos 2\pi n t \quad \dots \quad (V.ii.b.1)$$

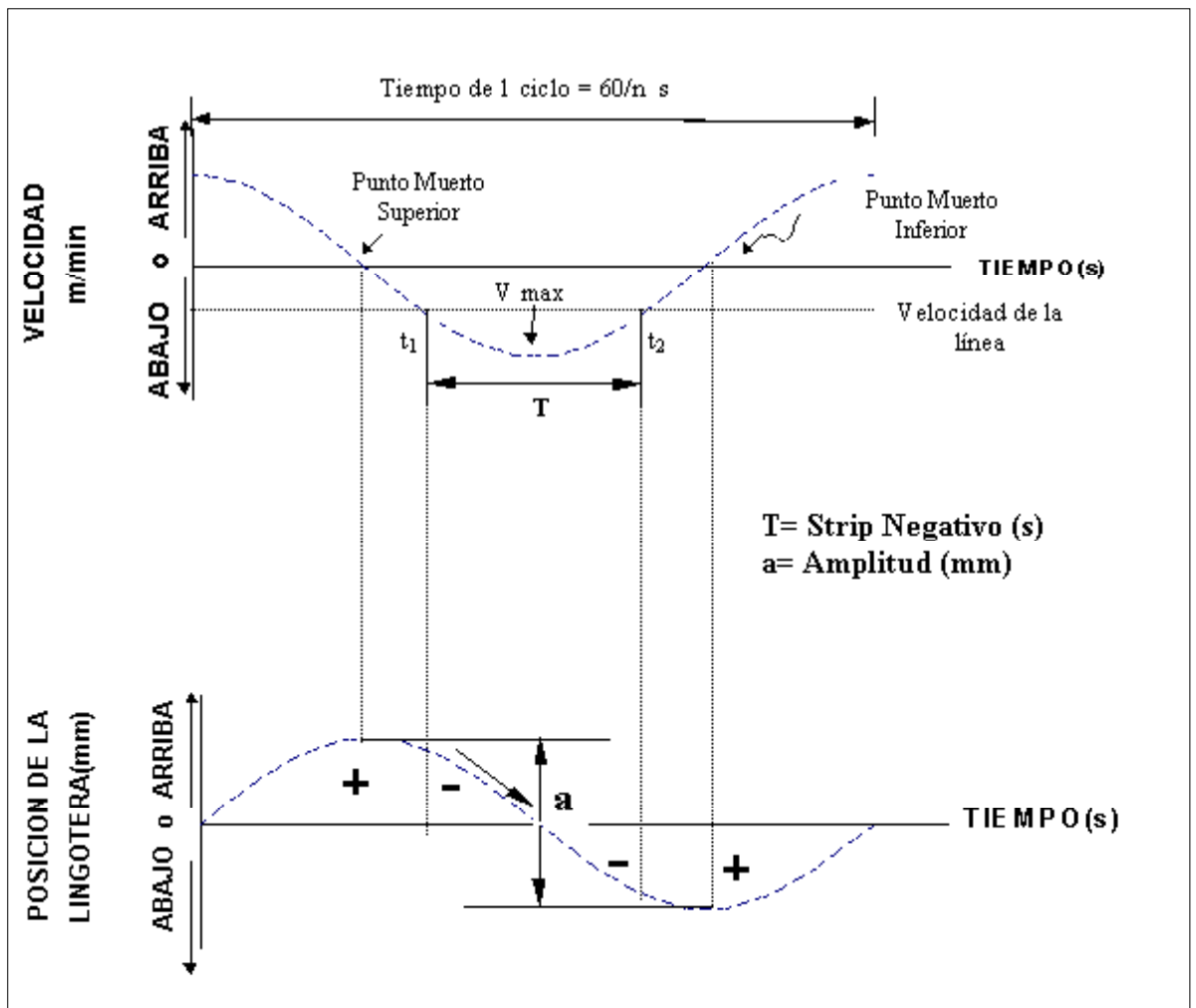


Fig.31.- Velocidad y Posición de la lingotera con respecto al Tiempo

El Tiempo de Strip Negativo(TSN) lo podemos definir como el tiempo durante el ciclo, en el cual la lingotera se está moviendo hacia abajo más rápido que la velocidad de la línea. Este tiempo ( $t_2-t_1$ ) puede calcularse analíticamente según:

$$(t_2-t_1) = \text{TSN} = (60/\pi n) \times \text{Cos}^{-1}(v/a\pi n) \quad (4)$$

Donde:  $v$  = velocidad de línea (m/min)

$a$  = amplitud de oscilación (m)

$n$  = frecuencia(ciclos/min)

El arcoseno se calcula en radianes.

El tiempo de strip negativo se puede expresar como fracción del tiempo total de 1 ciclo y por lo tanto su equivalencia en porcentaje es:

$$\% \text{ Strip Negativo} = T/60/n \times 100 \quad (5)$$

Otro concepto muy importante usado en la actualidad es el mould lead, que no es mas que la diferencia de recorridos entre el molde y la barra durante el tiempo de strip negativo, y está definido por la siguiente ecuación:

$$\text{ML} = a\text{Sen}(2\pi n\text{TSN}) - V \times \text{TSN} \quad (6)$$

$v$  = velocidad de línea (m/min)

$a$  = amplitud de oscilación (m)

$n$  = frecuencia(ciclos/min)

Los valores prácticos recomendados son trabajar con un tiempo de strip negativo(TSN) entre 0.12-0.14 segundos y un mould lead (ML) entre 3.0-5.0 mm. Actualmente tenemos un valor de tiempo de Strip negativo de 0.18 s y un Mould Lead de 4mm. Este es un tiempo de strip demasiado alto que produce una marca de oscilación muy profunda y en algunos casos puede producir grieta transversal.



### iii.- EVALUACION DE LOS PROBLEMAS:

Actualmente el proceso de desoxidación de acero se hace mediante FeAl y FeCa, obteniendo valores de Al y Ca total en el acero líquido de 30 y 20 ppm respectivamente. A continuación se muestran las adiciones en el sangrado.

Práctica Convencional					
Aditivos	Peso (kg)	Al (kg)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (kg)	CaO (kg)	Sang. (kg)
FeAl	60	22,2	-	-	60
Granalla de Al	0	-	-	-	0
Al Ash Nac	90	18	45	-	90
Desulfurante EAF	0	-	-	-	0
Cal Calcica A	400	-	-	348	400
Cal Calcica B	210	-	-	193,2	210
FeCa	-	-	-	-	-

**Tabla.5.- Desoxidantes y aditivos usados en el sangrado**

A estas adiciones hay que aumentarle las adiciones realizadas en el horno cuchara que son en promedio 40 kg de FeAl y 50 Kg de FeCa. Por otro lado para trabajar en la desoxidación de la escoria se emplea aproximadamente 300 kg de residuo de escoria de aluminio, que junto a 300 kg de Cal Cálctica adicionales permite una buena escoria de desulfuración (CaO 50%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 30%, SiO<sub>2</sub> 20%). La cantidad de estas adiciones considerable, con el cual estamos formando un gran cantidad de escoria, que si bien es cierto promueve la desulfuración, también absorbe grandes cantidades de Ferrocálcio y demás aditivos, bajando su rendimiento. Por la cantidad de adiciones realizadas el ajuste de la composición química es aproximadamente 40 min, convirtiéndose en un punto crítico que no acompaña el desarrollo de un mayor ritmo de producción del Horno Eléctrico y Colada Continua pudiendo tener paradas de producción por acumulación de cucharas con acero y/o pérdidas de secuencia por tener el acero líquido ajustado listo para colar. El incremento del consumo de energía eléctrica también es alto debido al mayor tiempo de horno conectado. Por otro lado el uso de residuo de escoria de aluminio es nocivo para la calidad,

ya que tiene alrededor de 2,5% de humedad y al ser higroscópico, secarlo en una estufa no soluciona este problema.

El agua presente es disociado en hidrógeno y oxígeno por la alta temperatura y parte es absorbido por el acero, ocasionando problemas de porosidad superficial.

El nivel de porosidad es de 60 poros por palanquilla y con profundidad de 2-3mm. Para efectos de calidad de la palanquilla se considera como defectos por porosidad superficial, a los poros de profundidad mayores a 1mm y menores 3mm. Poros menores a 1mm, desaparecen por oxidación de la capa superficial de la palanquilla al salir del horno de recalentamiento. Poros mayores a 3mm se consideran como blowholes o sopladuras. Para los defectos por porosidad se necesita de un esmerilado hasta la desaparición del defecto.

Otro problema que se tiene en la calidad de la palanquilla es la marca de oscilación profunda (3mm). Esto principalmente a que actualmente estamos trabajando con un tiempo de Strip negativo muy grande (0,17 segundos).

Esta marca de oscilación junto a la porosidad superficial de 3mm de profundidad obligan a que la palanquilla sea acondicionada con esmeril y/o arenado previo a su utilización en la Planta de Laminación. Este acondicionado involucra pérdida de tiempo, costos por mano de obra, equipos y manipuleo.

Por tanto los principales problemas a resolver son tres: El descenso de la velocidad de línea que puede terminar en el clogging o cierre de buzas del tundish, la porosidad superficial y las marcas de oscilación profunda presentes en la palanquilla.

A continuación se pasa a detallar el análisis de los problemas.

iii.i.- En cuanto al descenso de velocidad de línea se muestra el siguiente parte de producción:

7.5.1 CONTROL DE PROCESO PARTE DE COLADA					REVISION : 04
24/11/2006-14					APROBADO : JUM
COLADA #194420/1					FECHA :
Supervisor de Inicio : jmelgar Supervisor Final : jmelgar Turno : 22-07 Calidad : 1008 A2 Seccion : 130 x 13000F					
Observaciones : <u>Se baja la velocidad de las líneas de 1.9 a 1.3 se cambia de buzas y se inyecta ferrocaldio00F</u>					
Cuchara en Torreta	Datos del Tundish	Datos Generales	Temperaturas	Consumos	
ADA : 08:35   HORA DE LLEGADA : 09:16	TUNDISH # : T4	MERMA RECIRC(%) : .35	HORA T° PPM	THERMOPAR D UN	
ING : 08:37   INICIO STIRRING : :	T/TUNDISH : Basico	MERMA METAL.(%) : .1692	09:38 1556	0   PULITON kg	
NG : 09:16   FINAL STIRRING : :	SECUENCIA : 14	ACERO LIQ. (%) : 44	10:05 1550	0   MUESTREADOR UN	
RAT. : 1603   TEMPERATURA : :		PALANQUILLAS(%) : 35.8		TUBO CERAMI UN	
: 818   HORA APERTURA : 09:19		# PALANQUILLAS : 64		TUNDISH COV TM	
: 45   FORMA APERTURA : Normal		% REND. PALANQ. : 81.36		PUROTHERM W kg	
# LANZAS : 0				CARTUCHOS D UN	

**Fig 32.- Parte de producción de Colada Continua**

En el parte de producción de colada continua mostrado (fig. 32), se aprecia en las observaciones que las velocidades de línea han disminuido de 1,9 a 1,3m/min, se cambia de buzas e inyecta ferrocaldio para intentar mejorar la colabilidad del acero.

El descenso de velocidad se da por un exceso de aluminio(0,014%) en el acero enviado a colar, de manera que se formará la alúmina. Estos datos pueden ser evidenciados en el siguiente cuadro, tomado del parte de producción del horno cuchara:

ANAL.	HORA	C	Mn	Si	P	Al	S_LEC	Ca	N_LEC
FC	08:17	.04	.23	.01	.014	.008	.062	6.2	31
FC2	08:54	.04	.42	.03	.016	.025	.052	3	49
FC3	09:05	.05	.49	.03	.017	.018	.024	75.6	53
FC4	09:12	.06	.53	.03	.018	.014	.016	28.1	62
FINAL	10:56	.06	.54	.03	.017	.015	.01	20	92

**Fig 33.- Análisis Químico del Acero en la Cuchara**

En el cuadro se observa también que se inyectó calcio, obteniendo en el acero 28,1 ppm; con este calcio las inclusiones de alúmina se modificarán morfológicamente además de químicamente, preferentemente en hexaluminato de calcio y dialuminato de calcio para estos niveles de Ca y Al en el Acero.

Del análisis químico del acero en la cuchara que se envía a colar se obtiene que la relación Ca/Al total es 0,20; pero debido a la cinética de reoxidación del calcio, disminuye su contenido pasando por el tundish a 20 ppm, es decir la nueva relación Ca/Al será 0,13 la cual es una relación mucho menor a 0,20 que es lo mínimo necesario; por ende se formará preferencialmente el hexaluminato de calcio, el cual es el principal causante de descenso de velocidades y cierre de buzas, tal como se menciona en el capítulo de aspectos teóricos fundamentales.

Las acciones tomadas de cambiar de buzas son para evitar la acumulación del hexaluminato de calcio de esa colada y no perder el tundish en esa colada ni parar la producción. Inyectar ferrocalcio en el tundish ayuda ya que incrementará las ppm de calcio de manera de mejorar la relación; pero esta inyección no es homogénea de manera que no todo el acero en el tundish tendrá

el mismo contenido de calcio, por tanto existirán líneas de la colada en las cuales la colabilidad no mejorará.

iii.ii.- En cuanto a la porosidad superficial se muestra el siguiente reporte de control de calidad:

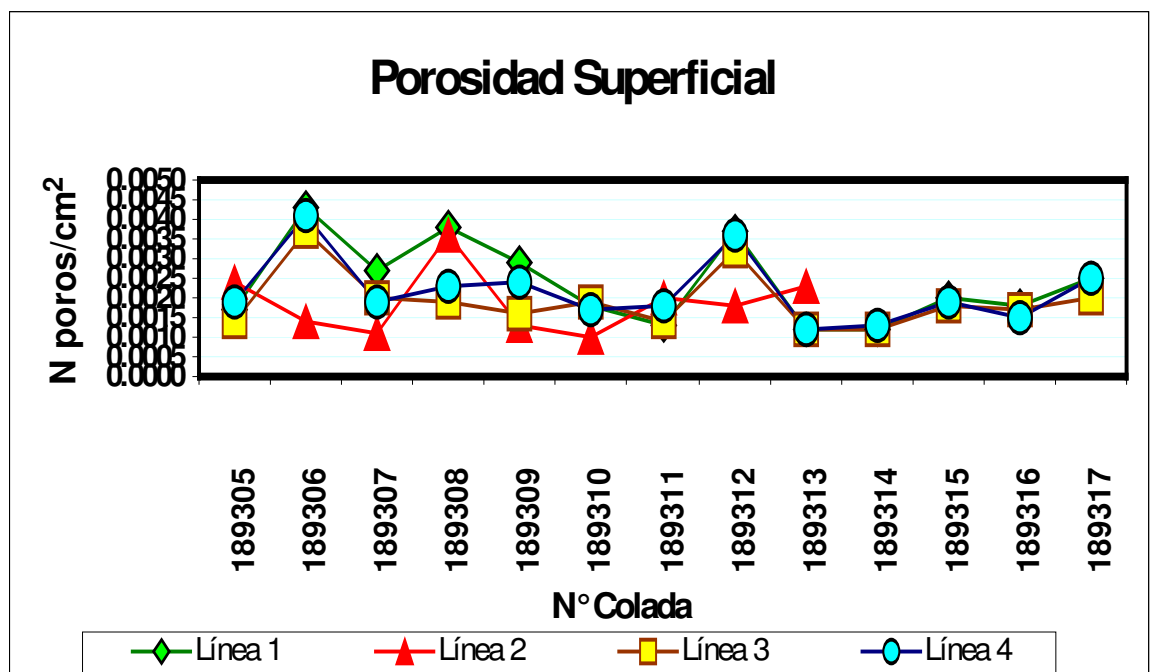
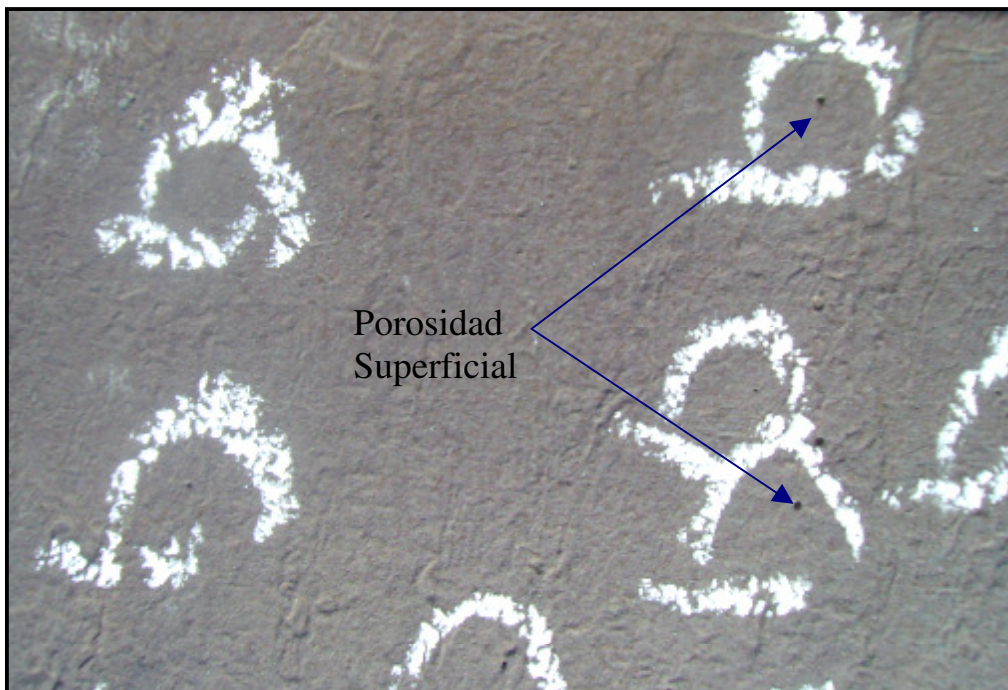


Fig 34.- Cantidad de Poros colada a colada

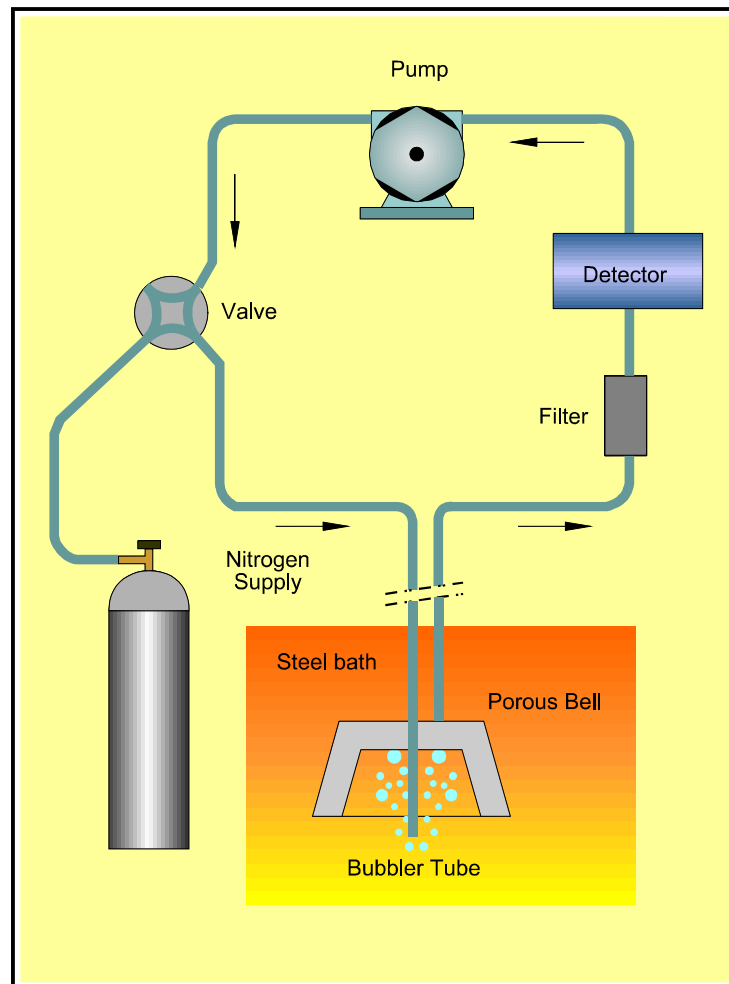
Del gráfico se puede observar que la cantidad en promedio de poros es de 0.0020 poros/cm<sup>2</sup> (equivalente a 60 poros por palanquilla, teniendo picos de hasta 100 poros por palanquilla). Los contenidos de Oxígeno soluble en estas coladas son de 20 ppm y de Nitrógeno 70ppm en promedio(niveles aceptables), el problema principal es el hidrógeno el cual con la práctica actual está en niveles de 6,5 ppm. Con este valor la formación de porosidad superficial es inevitable tal como se explica en la sección de aspectos teóricos fundamentales.

A continuación se muestra unas fotos de la presencia porosidad superficial o pinholes en la palanquilla:



**Fig 35 y 36.- Evidencia de Porosidad Superficial en la Palanquilla. Colada N178202.Fecha de Producción 24-04-05.N de poros por palanquilla 75.**

Para comprobar que el Hidrógeno es el principal causante de la porosidad se rento un equipo Hydris y se tomaron muestras para obtener una relación entre número de poros y contenido de hidrógeno soluble en el acero líquido. A continuación se muestra el funcionamiento del equipo Hydris.

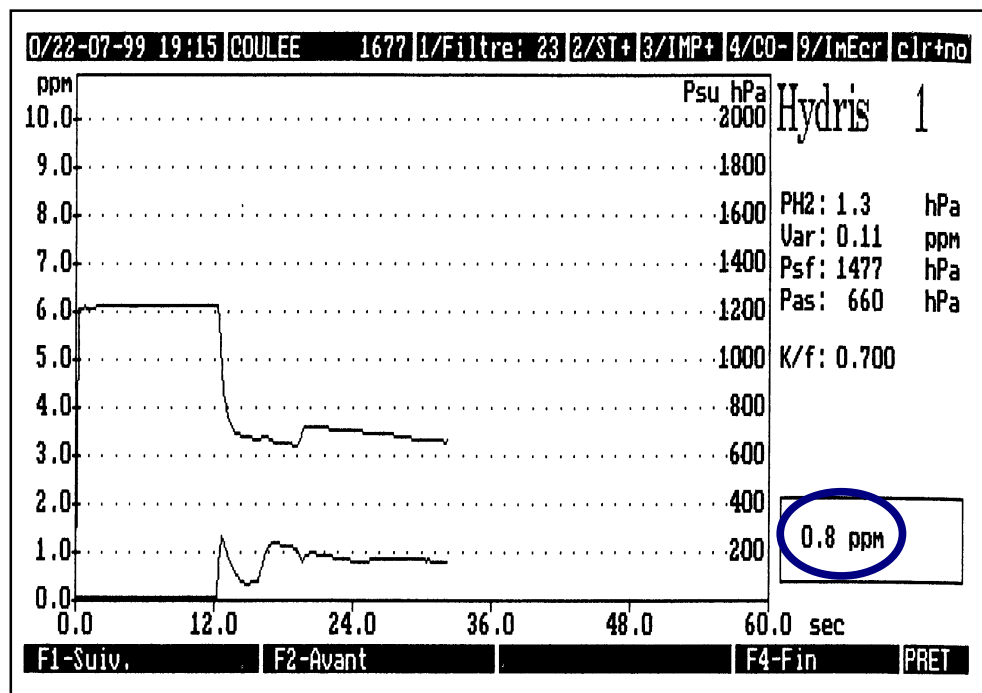


**Fig 37.- Diagrama de Funcionamiento del Equipo Hydris**

Experimentación:

Este equipo trabaja con una botella de nitrógeno superseco (humedad menor a 0,5%), el cual es inyectado al baño mediante una lanza especial, creando un volumen muestral donde el gas es nuevamente absorbido por el sistema. El gas entrante es medido en un manómetro, el cual calculará la diferencia de presión entre entrada y salida; esta diferencia corresponde a la presión relativa del hidrógeno, la cual indirectamente por la ley de Sievert (Ver capítulo V.ii), encuentra el valor del contenido de hidrógeno soluble.

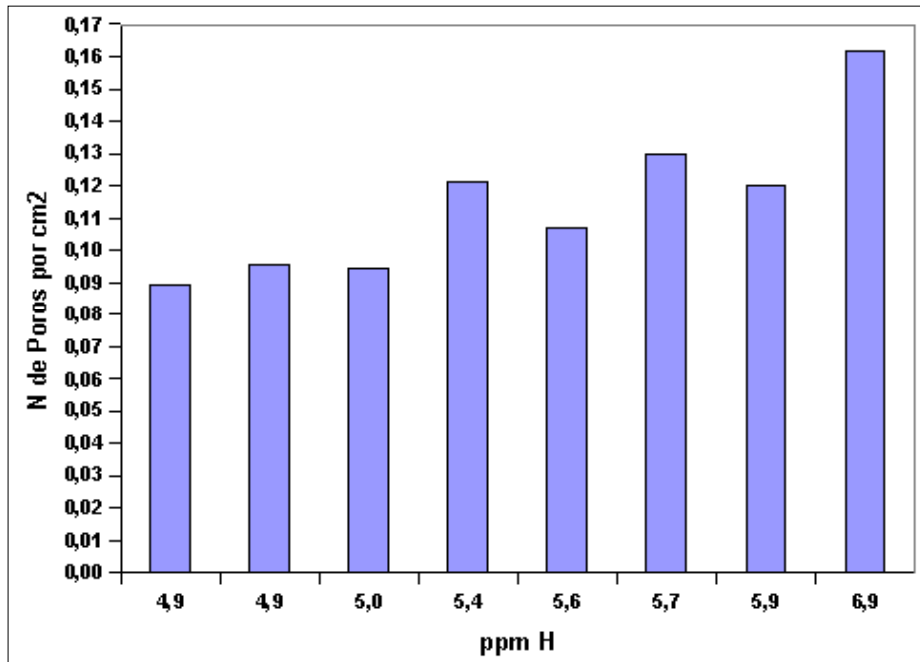
La toma de muestra de este equipo tarda aproximadamente 30 segundos; el equipo muestra el resultado tanto gráfica como digitalmente. Un modelo de medición se muestra a continuación:



**Fig 38.- Gráfica de medición del equipo Hydris**

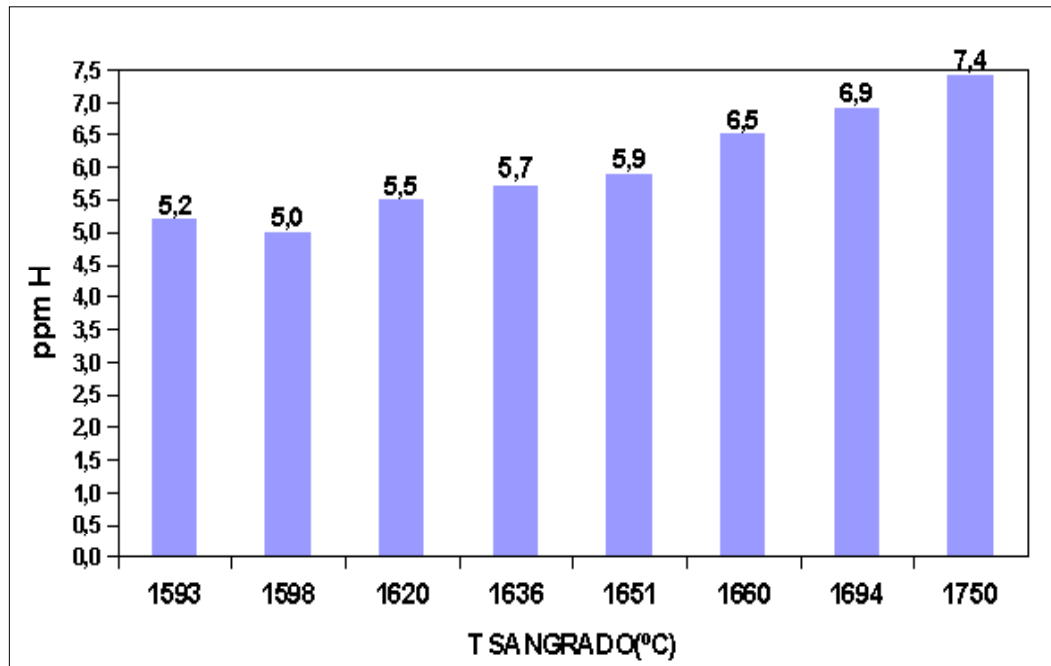


Luego de observar el funcionamiento y medición del equipo se tomó algunas muestras para comprobar la relación existente entre el contenido de hidrógeno y la porosidad superficial obteniendo la siguiente gráfica:



**Fig 39.- Relación entre la porosidad superficial y el H**

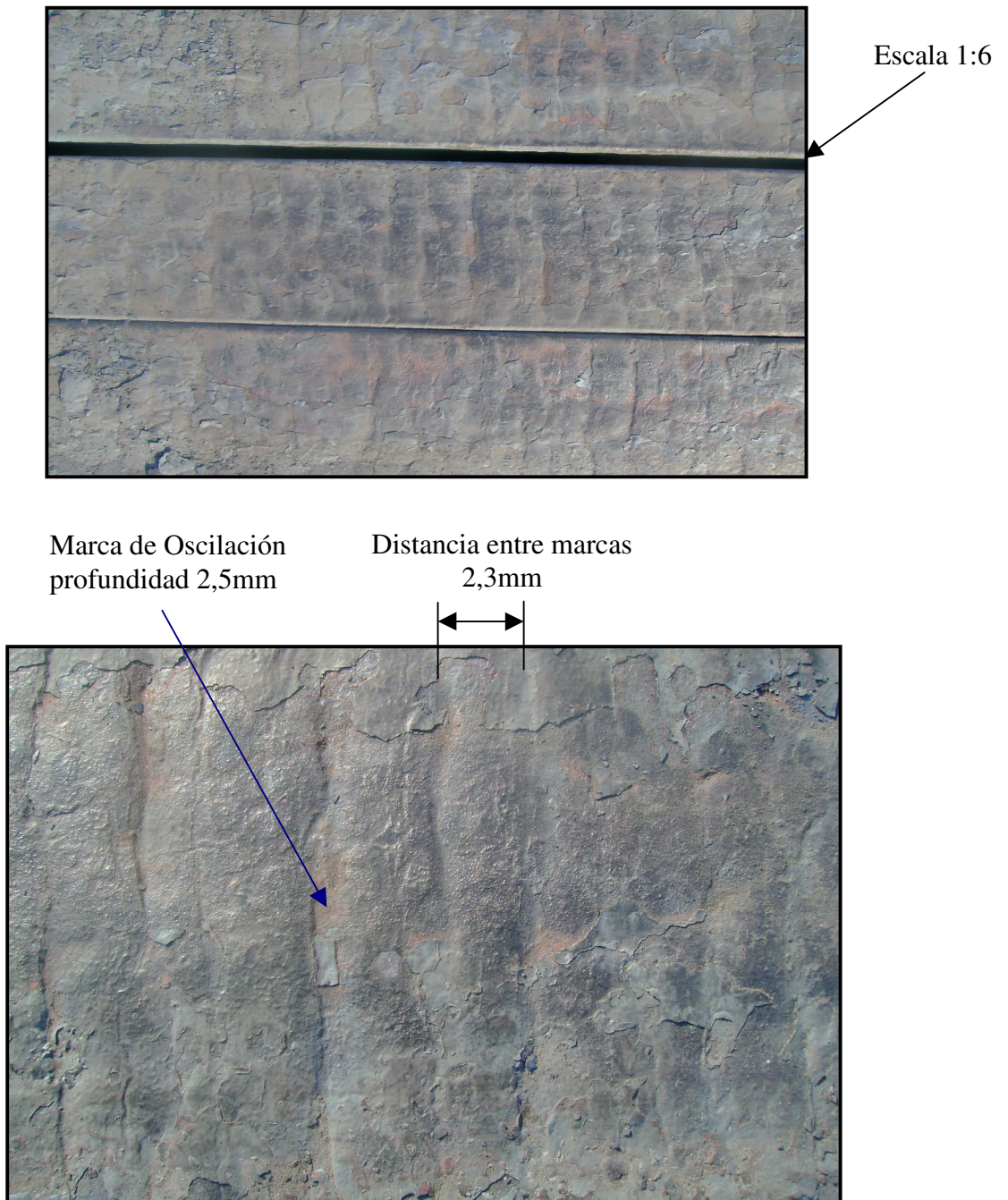
Se observa de la gráfica que a medida que aumenta el contenido de hidrógeno soluble en el acero líquido, la porosidad superficial en la palanquilla aumentará. Esto comprueba lo estudiado en el capítulo V. Por lo tanto toda fuente de hidrógeno debe ser eliminada, es decir se debe utilizar aditivos secos completamente y tener cuidado con la temperatura, sobre todo en el sangrado que es donde alcanza su máximo valor, ya que a mayor temperatura aumenta la solubilidad de los gases.



**Fig 40.- Relación entre la Temperatura y el contenido de H**

A medida que se tiene mayor temperatura de sangrado, el acero líquido disolverá mayores cantidades de hidrógeno, el cual una vez dentro del acero no podrá ser eliminado por métodos convencionales, a menos que se tenga un horno de vacío. En la gráfica se observa valores de hasta 6,9 y 7,4 ppm de Hidrógeno; con estos valores, así se tenga en teoría 0 ppm de oxígeno y nitrógeno la formación de porosidad es inevitable.

iii.ii.- Las marcas de oscilación profundas, como se explicó en los aspectos teóricos fundamentales, son producidas debido a un tiempo de strip negativo grande. Estas marcas son focos donde pueden nacer grietas transversales. Cuando son mayores a 1mm de profundidad son acondicionadas.



**Fig 41 y 42.- Evidencia de Marcas de Oscilación Profundas en la Palanquilla**

## **VI. Modificaciones para Mejorar la fabricación de aceros 1008A2**

---

### **i.- PREDICIÓN DEL CALCIO Y RELACION Ca/Al PARA EVITAR EL TAPONAMIENTO DE BUZAS DE TUNDISH:**

Como se mostró en el análisis termodinámico, es necesario evitar la formación de hexaluminato de calcio, para lo cual se encontró la relación mínima Ca/Al para que no se produzca; esta relación varía entre 0.11 y 0.16, dependiendo del tenor de aluminio total en el acero y es la necesaria en el acero líquido cuando esté atravesando las buzas del tundish.

El calcio decrece en concentración desde su salida del horno cuchara hasta su paso por el tundish. Por lo que es necesario estimar esta caída de concentración, para la cual se ha tomado valores de diversas coladas mostrándolos en la siguiente tabla:

Final de Cuchara			TUNDISH			Palanquilla			ΔCa C-T %	ΔCa T-M %	ΔCa C-M %
Ca	Al	Ca/Al	Ca	Al	Ca/Al	Ca	Al	Ca/Al			
24,4	0	1,22	16,1	0,002	0,48	9,0	0,010	0,09	34	44	20
55,3	0	1,84	14,4	0,003	0,29	9,5	0,009	0,11	74	34	9
20,9	0	0,70	14,5	0,003	0,29	8,7	0,008	0,11	31	40	24
24,7	0	0,82	15,1	0,003	0,30	10,1	0,008	0,13	39	33	20
51,1	0	2,56	14,2	0,002	0,43	10,4	0,008	0,13	72	27	10
25,9	0	1,30	23,0	0,002	0,69	11,8	0,009	0,13	11	49	19
40,9	0	1,02	23,9	0,004	0,36	10,8	0,008	0,14	42	55	12
44,7	0	1,49	14,1	0,003	0,28	12,6	0,009	0,14	68	11	11
40,3	0	1,34	15,1	0,003	0,30	12,6	0,009	0,14	63	17	12
32,1	0	0,80	21,8	0,004	0,33	14,1	0,010	0,14	32	35	16
37,3	0	1,24	20,9	0,003	0,42	18,4	0,010	0,18	44	12	13
52,6	0	1,75	22,8	0,003	0,46	15,2	0,008	0,19	57	33	10
37,7	0	1,89	30,1	0,002	0,90	12,7	0,009	0,14	20	58	13
35,9	0	1,20	22,1	0,003	0,44	13,6	0,008	0,17	38	38	14
28,6	0	1,43	13,3	0,002	0,40	8,7	0,009	0,10	53	35	17
42,1	0	1,05	20,0	0,004	0,30	11,9	0,008	0,15	52	41	12
39,1	0	1,30	22,2	0,003	0,44	15,7	0,010	0,16	43	29	13
99,4	0	2,49	21,4	0,004	0,32	17,1	0,010	0,17	78	20	5
40,4	0	1,35	25,5	0,003	0,51	14,2	0,008	0,18	37	44	12
35,9	0	1,80	18,1	0,002	0,54	16,0	0,008	0,20	50	12	14
49,6	0	1,24	25,6	0,004	0,38	19,0	0,009	0,21	48	26	10
57,4	0	1,91	35,3	0,003	0,71	17,9	0,008	0,22	39	49	9
23,3	0	1,17	13,1	0,002	0,39	7,7	0,009	0,09	44	41	21
43,8	0	1,46	16,1	0,003	0,32	9,2	0,010	0,09	63	43	11
22,0	0	0,73	14,8	0,003	0,30	9,2	0,008	0,12	33	38	58
21,9	0	1,10	17,7	0,002	0,53	10,8	0,009	0,12	19	39	51
29,9	0	1,00	15,7	0,003	0,31	12,8	0,009	0,14	47	18	57
37,3	0	1,87	18,5	0,002	0,56	12,6	0,008	0,16	50	32	66
36,0	0	0,90	17,4	0,004	0,26	8,5	0,010	0,09	52	51	76
27,1	0	1,36	13,1	0,002	0,39	9,6	0,010	0,10	52	27	65
36,5	0	1,83	14,2	0,002	0,43	8,2	0,008	0,10	61	42	78
20,1	0	0,87	15,8	0,003	0,31	10,9	0,010	0,11	22	30	46
25,0	0	1,25	12,4	0,002	0,37	10,5	0,008	0,13	50	15	58
28,7	0	1,44	13,7	0,002	0,41	9,7	0,008	0,12	52	29	66
65,2	0	1,63	22,0	0,004	0,33	13,2	0,010	0,13	66	40	80
20,4	0	1,02	14,0	0,002	0,42	10,0	0,007	0,14	31	29	51
36,3	0	0,91	17,5	0,004	0,26	12,9	0,009	0,14	52	26	64
56,9	0	1,90	26,0	0,003	0,52	14,1	0,009	0,16	54	48	75
31,9	0	1,60	27,3	0,002	0,82	13,5	0,007	0,19	14	51	58
60,2	0	2,01	26,2	0,003	0,52	15,8	0,008	0,20	56	40	74
65,4	0	2,18	17,7	0,003	0,35	16,0	0,008	0,20	73	10	76
33,5	0	1,12	17,7	0,003	0,35	12,0	0,007	0,17	47	32	64
20,9	0	0,52	17,9	0,004	0,27	9,3	0,007	0,13	14	48	56
68,2	0	1,71	20,5	0,004	0,31	13,1	0,009	0,15	70	36	81
56,7	0	1,89	14,1	0,003	0,28	13,7	0,008	0,17	75	3	76
53,9	0	1,35	25,7	0,004	0,39	20,4	0,009	0,23	52	21	62
42,3	0	1,41	21,2	0,003	0,42	16,0	0,007	0,23	50	25	62
31,3	0	1,04	19,4	0,003	0,39	9,7	0,008	0,12	38	50	69
32,5	0	1,63	17,5	0,002	0,53	14,3	0,009	0,16	54	82	56
53,3	0,01	1,07	24,0	0,005	0,29	13,6	0,008	0,17	45	57	74
45,2	0	1,51	16,1	0,003	0,32	12,1	0,007	0,17	36	75	73
58,0	0	1,45	25,8	0,004	0,39	16,9	0,008	0,21	44	66	71
42,2	0	1,41	27,9	0,003	0,56	17,1	0,008	0,21	66	61	59
66,9	0,01	1,34	23,4	0,005	0,28	20,1	0,009	0,22	35	86	70
53,2	0	1,33	25,4	0,004	0,38	20,1	0,009	0,22	48	79	62
49,4	0	1,65	20,6	0,003	0,41	9,7	0,008	0,12	42	47	80
34,9	0	1,16	21,9	0,003	0,44	14,6	0,010	0,15	63	67	58
37,3	0	0,93	18,8	0,004	0,28	15,5	0,010	0,16	50	82	58
33,2	0	1,11	20,9	0,003	0,42	13,6	0,008	0,17	63	65	59
28,6	0	1,43	18,6	0,002	0,56	8,7	0,005	0,17	65	47	70
34,8	0	1,16	19,3	0,003	0,39	14,5	0,007	0,21	55	75	58
61,4	0	1,54	23,3	0,004	0,35	15,3	0,007	0,22	38	66	75
50,1	0	1,25	30,5	0,004	0,46	23,4	0,008	0,29	61	77	53
33,8	0	0,85	21,7	0,004	0,33	10,5	0,008	0,13	64	48	69
47,7	0	2,39	13,5	0,002	0,41	10,6	0,007	0,15	28	79	78
48,4	0	1,21	21,1	0,004	0,32	10,7	0,007	0,15	44	51	78
29,5	0	0,98	19,1	0,003	0,38	14,5	0,009	0,16	65	76	51
53,9	0	2,70	18,7	0,002	0,56	14,1	0,008	0,18	35	75	74
31,7	0	1,59	14,6	0,002	0,44	10,6	0,006	0,18	46	73	67
39,4	0	1,31	16,1	0,003	0,32	11,1	0,006	0,19	41	69	72
33,9	0	1,13	19,8	0,003	0,40	14,9	0,007	0,21	58	75	56
42,6	0	1,07	24,9	0,004	0,37	17,6	0,007	0,25	58	71	59
PROMEDIO		1,39			0,41				48,20	45,13	48,31

45,2	0	1,51	16,1	0,003	0,32	12,1	0,007	0,17	36	75	73
58,0	0	1,45	25,8	0,004	0,39	16,9	0,008	0,21	44	66	71
42,2	0	1,41	27,9	0,003	0,56	17,1	0,008	0,21	66	61	59
66,9	0,01	1,34	23,4	0,005	0,28	20,1	0,009	0,22	35	86	70
53,2	0	1,33	25,4	0,004	0,38	20,1	0,009	0,22	48	79	62
49,4	0	1,65	20,6	0,003	0,41	9,7	0,008	0,12	42	47	80
34,9	0	1,16	21,9	0,003	0,44	14,6	0,010	0,15	63	67	58
37,3	0	0,93	18,8	0,004	0,28	15,5	0,010	0,16	50	82	58
33,2	0	1,11	20,9	0,003	0,42	13,6	0,008	0,17	63	65	59
28,6	0	1,43	18,6	0,002	0,56	8,7	0,005	0,17	65	47	70
34,8	0	1,16	19,3	0,003	0,39	14,5	0,007	0,21	55	75	58
61,4	0	1,54	23,3	0,004	0,35	15,3	0,007	0,22	38	66	75
50,1	0	1,25	30,5	0,004	0,46	23,4	0,008	0,29	61	77	53
33,8	0	0,85	21,7	0,004	0,33	10,5	0,008	0,13	64	48	69
47,7	0	2,39	13,5	0,002	0,41	10,6	0,007	0,15	28	79	78
48,4	0	1,21	21,1	0,004	0,32	10,7	0,007	0,15	44	51	78
29,5	0	0,98	19,1	0,003	0,38	14,5	0,009	0,16	65	76	51
53,9	0	2,70	18,7	0,002	0,56	14,1	0,008	0,18	35	75	74
31,7	0	1,59	14,6	0,002	0,44	10,6	0,006	0,18	46	73	67
39,4	0	1,31	16,1	0,003	0,32	11,1	0,006	0,19	41	69	72
33,9	0	1,13	19,8	0,003	0,40	14,9	0,007	0,21	58	75	56
42,6	0	1,07	24,9	0,004	0,37	17,6	0,007	0,25	58	71	59
<b>PROMEDIO</b>		<b>1,39</b>			<b>0,41</b>				<b>48,20</b>	<b>45,13</b>	<b>48,31</b>

**Tabla.6.- Análisis de Calcio y Aluminio Total durante el Proceso de Colado**

De las tablas se observa que el calcio presente, cuando el acero está en el tundish; es el 48.2% del presente en el acero líquido de cuchara; y el ratio Ca/Al desciende de 1.39 a 0.41. El ratio calcio aluminio necesario para aluminio total de 0.002-0.004% como se tiene en el acero, debe ser mínimo 0.14-0.18, es decir el calcio necesario mínimo debe ser 7.2 ppm para que no se produzca el hexaluminato de calcio, entonces el calcio mínimo en el acero líquido que está en la cuchara debe ser 15ppm.

Con este mismo análisis se logra evitar definitivamente los descensos de velocidad y el cierre de buzas. Por lo tanto según las condiciones críticas del cierre de buzas se puede definir que el calcio en el acero luego del ajuste de la composición química debe ser como mínimo 20ppm.

Por otro lado, en colada continua normalmente se hace agitación gaseosa con argón para uniformizar la temperatura del acero, evitando estratificación de temperaturas de manera que el acero que cuela mantenga una temperatura constante y no se solidifique en la parte baja del tundish. Es durante esta agitación que el calcio del acero puede reaccionar con la escoria y en caso de ser muy fuerte la agitación, también reaccionaría con el medio ambiente.

Es por eso que no se debería agitar el acero en el horno cuchara, al final del ajuste de la composición química; con lo cual obtendremos tener una temperatura mayor en la parte superior, de manera que cuando ocurra la estratificación y termine la colada, esta parte superior termine intencionalmente mas caliente o igual que la parte inicial; esto se puede conseguir dándole un minuto y medio de arco eléctrico suave al acero sin stirring, de manera de no agitar el acero y obteniendo en la parte superior de 6-8°C más de temperatura.

Adicionalmente a esta práctica se debe de garantizar una apertura libre de cuchara mediante un sellado mejor direccionado de la buza con la arena de cromita. Un beneficio adicional de no agitar fuerte en la colada continua es la mejor flotación de las macroinclusiones del acero.

**ii.- USO DE DESULFURANTES Y ALUMINATOS PARA LA DESOXIDACIÓN  
Y DESULFURACIÓN**

Luego de haber estudiado la formación de los pinholes y haber determinado como uno de los problemas principales el hidrógeno, se necesitará eliminar el hidrógeno de los aditivos usados en esta calidad. Los principales insumos que contienen hidrógeno son la cal cálcica, la cual contiene hidróxidos de calcio a manera de polvo fino y la humedad del residuo de escoria de aluminio (3%). Estos dos insumos no se pueden secar, ya que el primero tiene agua de composición química y a su vez lo dos son higroscópicos, es decir si se calienta para eliminar el hidrógeno, a esa temperatura la absorción de agua (recuperación de humedad) será violenta. Esta hidratación se produce en menos de 10 minutos.

Es por esta razón que se necesita, reemplazar la cal cálcica por una cal, la cual no tenga finos como la cal reactiva, y el aluminio ash por insumos que mantengan su contenido de aluminio y alúmina para poder desoxidar adecuadamente; como las escorias sintéticas, aluminatos y aluminio metálico.

<b>Práctica Propuesta (Desulfur. EAF – Aluminatos)</b>						
<b>Aditivos</b>	<b>Peso (kg)</b>	<b>Al (kg)</b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (kg)</b>	<b>CaO (kg)</b>	<b>\$/t</b>	<b>Sang. (kg)</b>
FeAl	90	33	-	-	1620	90
Granalla de Al	0	-	-	-	3580	0
Esc. De aluminio	0	0	0	-	179.6	0
Desulfurante EAF	125	5	32.5	67.5	500.5	125
Cal Calcica A	0	-	-	0	77.99	0
Cal Calcica B	400	-	-	368	93	400
Aluminato de Ca	25	1.3	10.5	9.25	774.97	25
FeCa	-	-	-	-	3450	-

**Tabla.7.- Aditivos propuestos a usar en el sangrado**



La tabla muestra las nuevas adiciones a usar en el sangrado, de manera de eliminar las fuentes de hidrógeno sin perjudicar el proceso de desoxidación.

De igual forma en el horno cuchara se puede reemplazar la gran cantidad de escoria de aluminio presente en el acero por su equivalente sin humedad, por lo tanto, sin hidrógeno; además de favorecer la desulfuración con el uso de escorias sintéticas.

### **iii.- MODIFICACIÓN DE LA AMPLITUD DE CARRERA DE OSCILACIÓN, PARA REDUCIR LAS MARCAS DE OSCILACIÓN**

Con respecto a reducir las marcas de oscilación, se debe reducir el tiempo de strip negativo de acuerdo a los valores recomendados, es decir de 0.12 a 0.14 segundos considerando también el mould lead dentro de las consideraciones. Para lograr este propósito se cuentan con dos alternativas: Aumentar la frecuencia de oscilación o reducir la amplitud de carrera.

En cuanto a la frecuencia se cuenta con una limitación de 150 cpm, con lo cual no lograríamos el objetivo, motivo por el cual se necesitará de una nueva amplitud de carrera que dependerá del casquillo de la excéntrica.

La velocidad de colado para esta calidad es de 2.1m/min +/- 0.1 y el rango máximo de frecuencia de trabajo sería de 120 a 150 cpm, para lo cual se muestra a continuación el procedimiento para la elección de la nueva amplitud de carrera.

Buza:	13.5	Sección:	130
Velocidad:	2.1	Calidad:	BC
		$\pi$	3.14

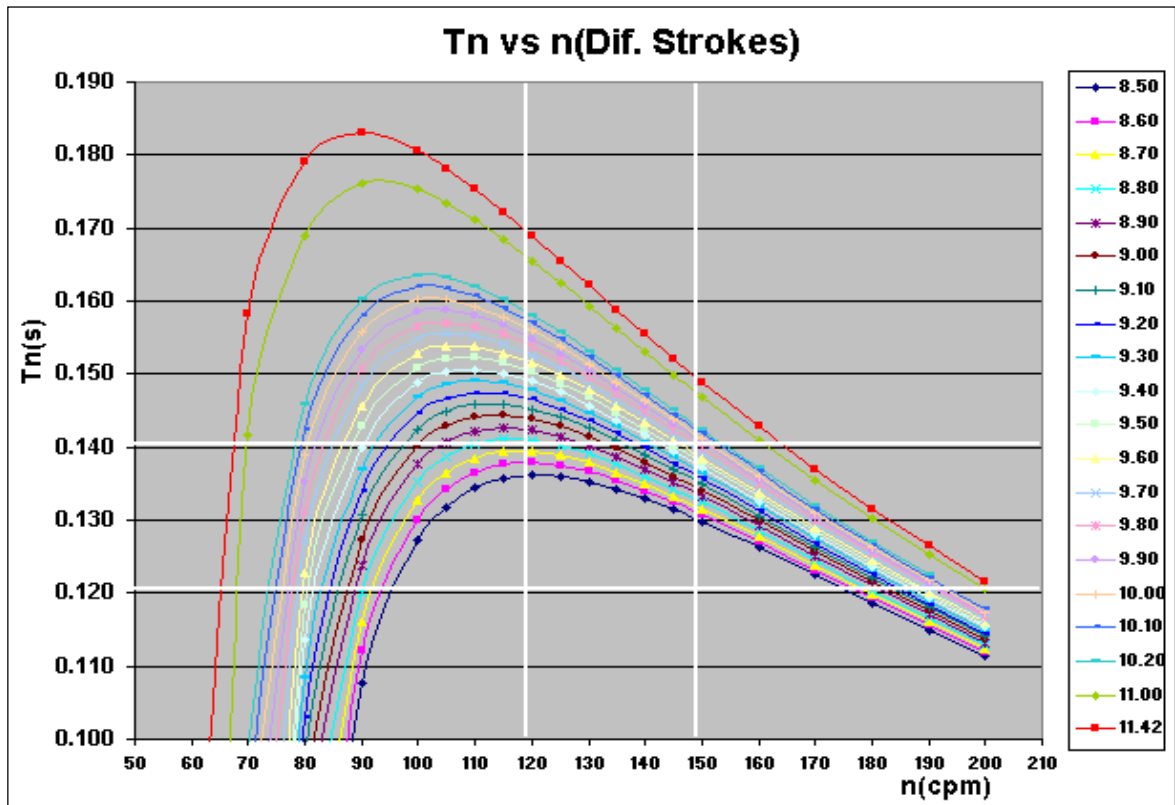
  

n(cpm)   S(mm)	Tiempo de Strip Negativo																				
	8.50	8.60	8.70	8.80	8.90	9.00	9.10	9.20	9.30	9.40	9.50	9.60	9.70	9.80	9.90	10.00	10.10	10.20	11.00	11.42	
50	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
60	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
70	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
80	0.044	0.057	0.067	0.076	0.084	0.091	0.097	0.103	0.109	0.114	0.118	0.123	0.127	0.131	0.135	0.139	0.142	0.146	0.149	0.158	0.179
90	0.108	0.112	0.116	0.120	0.124	0.127	0.131	0.134	0.137	0.140	0.143	0.146	0.148	0.151	0.153	0.156	0.158	0.160	0.176	0.183	
100	0.127	0.130	0.133	0.135	0.138	0.140	0.142	0.145	0.147	0.149	0.151	0.153	0.155	0.157	0.158	0.160	0.162	0.164	0.175	0.181	
105	0.132	0.134	0.136	0.139	0.141	0.143	0.145	0.147	0.149	0.150	0.152	0.154	0.155	0.157	0.159	0.160	0.162	0.163	0.173	0.178	
110	0.134	0.136	0.138	0.140	0.142	0.144	0.146	0.147	0.149	0.151	0.152	0.154	0.155	0.157	0.158	0.159	0.161	0.162	0.171	0.175	
115	0.136	0.138	0.139	0.141	0.143	0.144	0.146	0.147	0.149	0.150	0.152	0.153	0.154	0.155	0.157	0.158	0.159	0.160	0.168	0.172	
120	0.136	0.138	0.139	0.141	0.142	0.144	0.145	0.146	0.148	0.149	0.150	0.151	0.153	0.154	0.155	0.156	0.157	0.158	0.165	0.169	
125	0.136	0.137	0.139	0.140	0.142	0.143	0.144	0.145	0.146	0.148	0.149	0.150	0.151	0.152	0.153	0.154	0.155	0.156	0.162	0.166	
130	0.135	0.137	0.138	0.139	0.140	0.141	0.143	0.144	0.145	0.146	0.147	0.148	0.149	0.150	0.151	0.151	0.152	0.153	0.159	0.162	
135	0.134	0.135	0.137	0.138	0.139	0.140	0.141	0.142	0.143	0.144	0.145	0.146	0.146	0.147	0.148	0.149	0.150	0.151	0.156	0.159	
140	0.133	0.134	0.135	0.136	0.137	0.138	0.139	0.140	0.141	0.142	0.142	0.143	0.144	0.145	0.146	0.146	0.147	0.148	0.153	0.155	
145	0.131	0.132	0.133	0.134	0.135	0.136	0.137	0.138	0.139	0.139	0.140	0.141	0.142	0.142	0.143	0.144	0.144	0.145	0.150	0.152	
150	0.130	0.131	0.132	0.132	0.133	0.134	0.135	0.136	0.136	0.137	0.138	0.139	0.139	0.140	0.141	0.141	0.142	0.142	0.147	0.149	
160	0.126	0.127	0.128	0.128	0.129	0.130	0.131	0.131	0.132	0.133	0.133	0.134	0.134	0.134	0.135	0.135	0.136	0.137	0.141	0.143	
170	0.122	0.123	0.124	0.124	0.125	0.126	0.126	0.127	0.127	0.128	0.129	0.129	0.129	0.130	0.130	0.131	0.131	0.132	0.135	0.137	
180	0.119	0.119	0.120	0.120	0.121	0.122	0.122	0.123	0.123	0.124	0.124	0.125	0.125	0.125	0.126	0.126	0.127	0.127	0.130	0.132	
190	0.115	0.116	0.116	0.117	0.117	0.118	0.118	0.118	0.119	0.119	0.120	0.120	0.121	0.121	0.121	0.122	0.122	0.122	0.125	0.126	
200	0.111	0.112	0.112	0.113	0.113	0.114	0.114	0.114	0.115	0.115	0.116	0.116	0.116	0.117	0.117	0.117	0.118	0.121	0.122	0.126	
Strip Min.	0.127	0.130	0.132	0.132	0.133	0.134	0.135	0.136	0.136	0.137	0.138	0.139	0.139	0.140	0.141	0.141	0.142	0.142	0.147	0.149	

N = NO EXISTE

$T_n = (60/\pi n) \times \arccos(V_r/\pi \times S_{xm})$

Tabla.8.- Tabulación del Tiempo de Strip Negativo

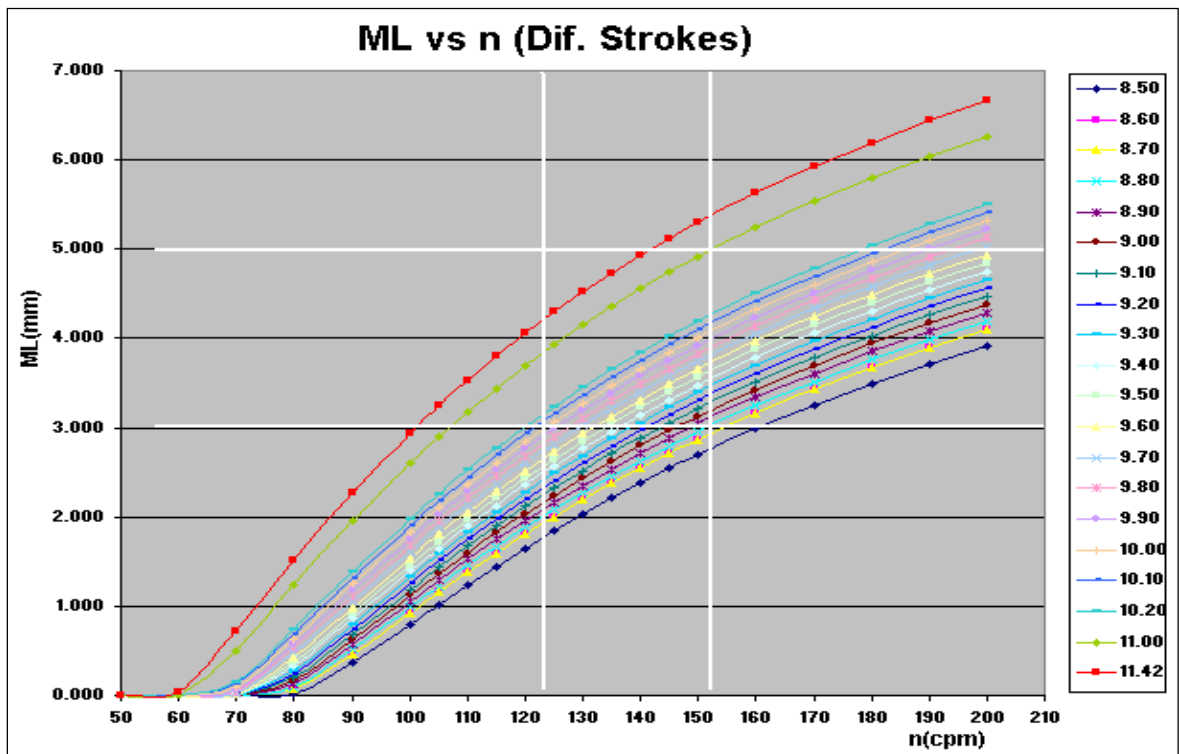


**Fig 43.- Variación Tiempo de Strip Negativo vs Frecuencia**

De la gráfica se observa que las amplitudes de carrera que cumplen con un tiempo de strip negativo de 0.12-0.14 segundos para los parámetros de colada serían los menores a 9.4mm, garantizando así una marca de oscilación leve.

n(cpm) / S(mm)	Mould Lead																				
	8.50	8.60	8.70	8.80	8.90	9.00	9.10	9.20	9.30	9.40	9.50	9.60	9.70	9.80	9.90	10.00	10.10	10.20	11.00	11.42	
50	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
60	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
70	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	0.041
80	0.018	0.039	0.065	0.094	0.127	0.163	0.202	0.242	0.285	0.330	0.377	0.425	0.475	0.527	0.580	0.634	0.690	0.746	1.238	1.518	
90	0.362	0.411	0.462	0.515	0.570	0.625	0.683	0.741	0.801	0.861	0.923	0.986	1.050	1.115	1.180	1.247	1.314	1.382	1.953	2.267	
100	0.800	0.862	0.926	0.990	1.056	1.122	1.190	1.258	1.327	1.397	1.468	1.539	1.611	1.684	1.757	1.831	1.906	1.981	2.602	2.939	
105	1.021	1.088	1.156	1.224	1.294	1.364	1.435	1.507	1.579	1.653	1.727	1.801	1.876	1.952	2.028	2.105	2.183	2.260	2.900	3.245	
110	1.238	1.308	1.380	1.452	1.524	1.598	1.672	1.746	1.822	1.898	1.974	2.052	2.129	2.207	2.286	2.365	2.445	2.525	3.180	3.533	
115	1.448	1.522	1.596	1.671	1.746	1.822	1.899	1.976	2.054	2.132	2.211	2.290	2.370	2.450	2.531	2.612	2.694	2.776	3.444	3.804	
120	1.651	1.727	1.804	1.881	1.958	2.037	2.115	2.195	2.275	2.355	2.436	2.517	2.599	2.681	2.763	2.846	2.929	3.013	3.693	4.058	
125	1.846	1.924	2.002	2.082	2.161	2.241	2.322	2.403	2.485	2.567	2.649	2.732	2.815	2.899	2.983	3.067	3.152	3.237	3.927	4.297	
130	2.032	2.112	2.192	2.273	2.355	2.436	2.519	2.602	2.685	2.768	2.852	2.936	3.021	3.106	3.191	3.277	3.363	3.449	4.148	4.522	
135	2.210	2.292	2.374	2.456	2.539	2.622	2.706	2.790	2.875	2.959	3.045	3.130	3.216	3.302	3.388	3.475	3.562	3.650	4.357	4.734	
140	2.380	2.463	2.547	2.630	2.715	2.799	2.884	2.969	3.055	3.141	3.227	3.314	3.401	3.488	3.575	3.663	3.751	3.839	4.554	4.933	
145	2.543	2.627	2.711	2.796	2.882	2.967	3.053	3.140	3.227	3.314	3.401	3.488	3.576	3.664	3.753	3.841	3.930	4.019	4.740	5.122	
150	2.697	2.783	2.869	2.955	3.041	3.128	3.215	3.302	3.390	3.478	3.566	3.654	3.743	3.832	3.921	4.010	4.100	4.190	4.916	5.301	
160	2.987	3.074	3.161	3.249	3.337	3.426	3.515	3.604	3.693	3.782	3.872	3.962	4.052	4.142	4.233	4.324	4.415	4.506	5.241	5.631	
170	3.250	3.339	3.428	3.518	3.607	3.697	3.787	3.877	3.968	4.059	4.150	4.241	4.332	4.423	4.515	4.607	4.699	4.791	5.534	5.927	
180	3.492	3.582	3.672	3.763	3.853	3.944	4.035	4.127	4.218	4.310	4.402	4.494	4.587	4.679	4.772	4.864	4.957	5.050	5.800	6.196	
190	3.713	3.804	3.895	3.987	4.079	4.171	4.263	4.355	4.447	4.540	4.633	4.726	4.819	4.912	5.006	5.099	5.193	5.287	6.041	6.440	
200	3.916	4.008	4.100	4.193	4.285	4.378	4.471	4.564	4.657	4.751	4.844	4.938	5.032	5.126	5.220	5.314	5.408	5.503	6.262	6.663	

Tabla.9.- Tabulación del Mould Lead a diferentes frecuencias y amplitudes



**Fig 44.- Variación Mould Lead vs Frecuencia**

De la gráfica se observa que las amplitudes de carrera que cumplen con un mould lead de 3 a 5mm para los parámetros de colada serían las mayores a 9.1mm, garantizando así que el acero no se pegue al molde.

Como resultado de este análisis, se puede determinar que se debe mandar a fabricar un nuevo casquillo para la excéntrica de colada continua, el cual produzca una amplitud de carrera de 9.1 a 9.4mm, con la cual se obtiene una marca de oscilación leve sin que el acero se pegue al molde.

#### **iv.- AUTOMATIZACIÓN DE LA INYECCIÓN DE ALUMINIO PARA EL MEJOR CONTROL DEL PROCESO**

Actualmente la inyección de aluminio en el molde de colada continua es usada para desoxidar el acero y su regulación se basa en sacar muestra de palanquilla, pero no contempla un descenso o aumento rápido de la velocidad y muchas veces tampoco contempla el aluminio total con la que llega el acero líquido en la cuchara. Se ha hecho simulaciones de la inyección de aluminio en función de la velocidad de colada y el aluminio total presente en el acero luego de su ajuste de composición química.

Este modelo matemático mixto (teórico-estadístico) evaluado en la calidad 1008A2 puede predecir la cantidad de miliAmper (mA) necesario para que el inyector de aluminio adicione el alambre de manera que se consiga el porcentaje de aluminio requerido según la velocidad de línea y el aluminio presente en el acero. Los datos son mostrados en el cuadro posterior.

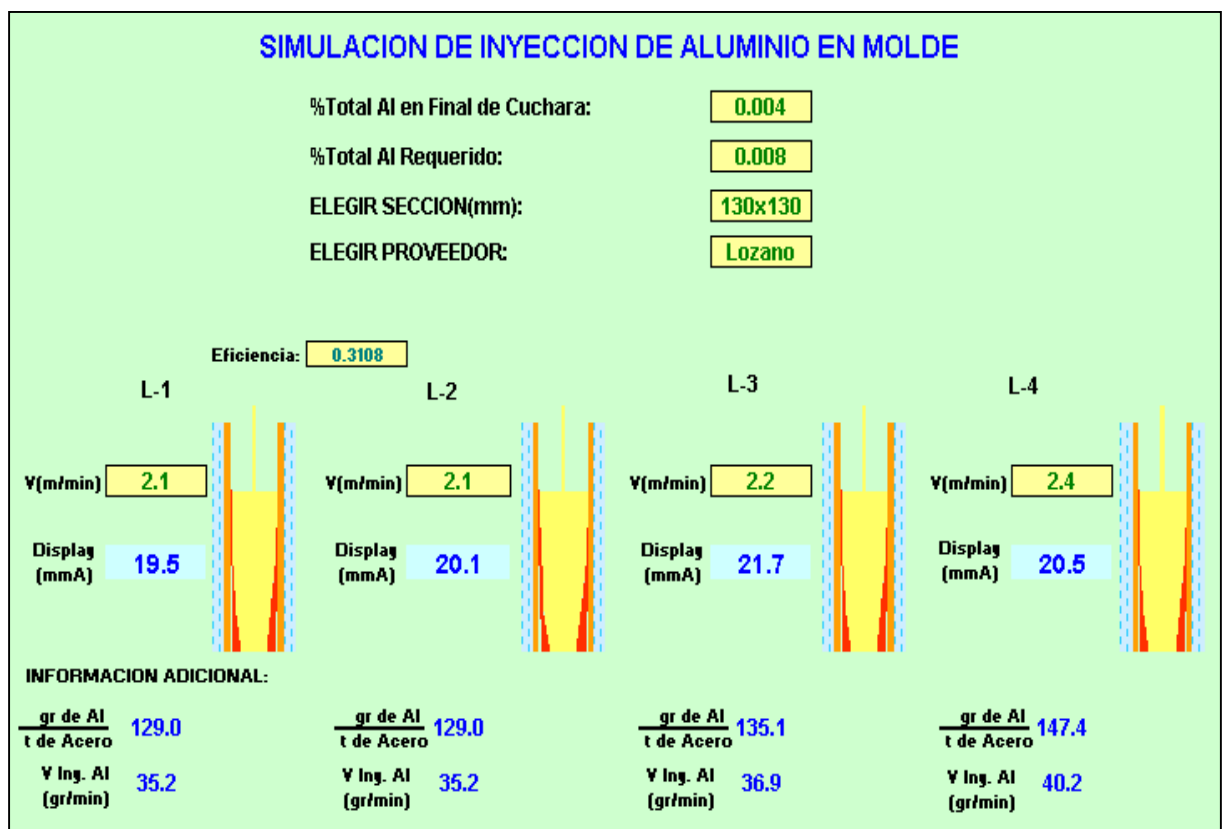
N Colada	%Al FC (Final H cuchara)	%Al Final (Final palanquilla)	%Solubilidad	mmA Posición	Diferencia Al Incremento real Al
189904	0,005	0,008	22,4	22	0,003
189905	0,005	0,009	27,2	22	0,004
189906	0,006	0,009	20,4	22	0,003
189907	0,004	0,010	40,8	22	0,006
189908	0,004	0,009	35,7	21	0,005
189910	0,006	0,010	36,4	17	0,004
189911	0,004	0,008	34,1	18	0,004
189913	0,005	0,009	28,4	21	0,004
189914	0,004	0,009	35,7	21	0,005
189915	0,004	0,008	30,2	20	0,004
189917	0,004	0,008	30,4	20	0,004
190324	0,002	0,008	31,7	26	0,006
190326	0,003	0,008	31,3	25	0,005
190327	0,004	0,008	25,5	24	0,004
190328	0,004	0,010	34,7	26	0,006
190329	0,003	0,007	24,5	25	0,004
190330	0,005	0,010	26,0	26	0,005
190331	0,003	0,009	35,2	25	0,006
190332	0,004	0,010	32,8	26	0,006
190333	0,004	0,010	32,3	25	0,006
190322	0,003	0,007	25,2	23	0,004
190323	0,004	0,010	34,0	24	0,006
190324	0,002	0,008	31,2	26	0,006
190325	0,004	0,010	31,5	27	0,006
190327	0,004	0,010	39,3	24	0,006
190328	0,004	0,009	30,9	24	0,005
190329	0,003	0,009	38,7	24	0,006
190330	0,005	0,010	28,4	24	0,005
190331	0,003	0,010	37,9	25	0,007
190332	0,004	0,011	39,5	25	0,007
190333	0,004	0,008	28,7	22	0,004
190334	0,005	0,008	13,7	23	0,003
190322	0,003	0,007	25,2	23	0,004
190323	0,004	0,010	34,0	24	0,006
190324	0,002	0,008	31,2	26	0,006
190325	0,004	0,010	31,5	27	0,006
190327	0,004	0,010	39,3	24	0,006
190328	0,004	0,009	30,9	24	0,005
190329	0,003	0,009	38,7	24	0,006
190330	0,005	0,010	28,4	24	0,005
190331	0,003	0,010	37,9	25	0,007
190332	0,004	0,011	39,5	25	0,007
190333	0,004	0,008	28,7	22	0,004
190334	0,005	0,008	13,7	23	0,003
190322	0,003	0,007	24,7	23	0,004
190323	0,004	0,008	23,1	24	0,004
190324	0,003	0,010	36,4	26	0,007
190325	0,004	0,010	32,2	26	0,006
190326	0,003	0,009	39,3	24	0,006
190327	0,004	0,008	25,7	24	0,004
190328	0,004	0,010	37,3	25	0,006
190329	0,003	0,008	32,8	24	0,005
190330	0,005	0,010	30,3	24	0,005



Promedio Para $\Delta$ 0.003	18,5
Promedio Para $\Delta$ 0.004	27,9
Promedio Para $\Delta$ 0.005	31,1
Promedio Para $\Delta$ 0.006	34,9
Promedio Para $\Delta$ 0.007	38,0
<b>Promedio Total</b>	<b>31,2</b>

**Tabla.10.- Medición de la Adición de la inyección de aluminio en el molde**

Con este modelo podría automatizarse la inyección de aluminio y además poder registrarlo en el programa de automatización HMI, con el fin de que sea muy flexible, tenga una respuesta automática a los cambios de velocidad y composición química. En Los datos adjuntos se observa que a medida que se necesite incrementar mas el aluminio el rendimiento o solubilidad del aluminio en el acero aumenta. El modelo matemático se presenta en la siguiente imagen:



**Fig 45.- Simulación de la Inyección de Aluminio en el Molde**

## VII. Resultados Obtenidos de las Modificaciones

Con las modificaciones propuestas se han obtenido los siguientes resultados:

1.- Con el correcto ajuste de la composición química en cuanto al calcio y al aluminio y el adecuado ratio, se ha logrado evitar definitivamente el clogging o cierre de buzas y también los descensos de velocidad. Al tener menos descenso de velocidad de línea se tiene menos consumo de buzas intercambiables en el tundish, producto de la acumulación de aluminatos en la buza el tundish. Además se consiguió reducir en 25m el ferrocalcio.

Final de Cuchara			TUNDISH			Palanquilla			ΔCa C-T %	ΔCa T-M %	ΔCa C-M %
Ca	Al	Ca/Al	Ca	Al	Ca/Al	Ca	Al	Ca/Al			
34,6	0	0,87	9,6	0,004	0,14	6,7	0,009	0,07	72	30	14
38,6	0	0,97	16,4	0,004	0,25	12,9	0,009	0,14	58	21	13
21,9	0	0,55	8,5	0,004	0,13	6,4	0,010	0,06	61	25	23
24,3	0	0,81	12,3	0,003	0,25	5,6	0,006	0,09	49	54	21
45,0	0	1,13	14,7	0,004	0,22	11,0	0,010	0,11	67	25	11
27,3	0	0,91	8,9	0,003	0,18	5,6	0,008	0,07	67	37	18
26,2	0	0,87	9,4	0,003	0,19	8,3	0,010	0,08	64	12	19
20,6	0	0,69	9,1	0,003	0,18	9,9	0,009	0,11	56	100	24
39,6	0	1,98	8,1	0,002	0,24	13,5	0,009	0,15	80	100	13
30,0	0	1,00	12,2	0,003	0,24	6,6	0,009	0,07	59	46	78
23,9	0	0,60	10,8	0,004	0,16	7,8	0,010	0,08	55	28	67
31,1	0	0,78	13,6	0,004	0,20	8,7	0,010	0,09	56	36	72
67,5	0	1,69	15,8	0,004	0,24	8,7	0,009	0,10	77	45	87
30,3	0	0,76	16,4	0,004	0,25	11,0	0,009	0,12	46	33	64
70,8	0	1,77	13,8	0,004	0,21	6,1	0,007	0,09	81	56	91
41,1	0	1,03	12,1	0,004	0,18	10,1	0,007	0,14	71	17	75
61,8	0,01	1,24	20,4	0,005	0,24	15,1	0,008	0,19	67	26	76
34,3	0,01	0,69	16,3	0,005	0,20	10,4	0,008	0,13	48	64	70
23,8	0	0,79	11,3	0,003	0,23	7,2	0,007	0,10	47	64	70
29,0	0	0,97	9,7	0,003	0,19	8,8	0,008	0,11	33	91	70
38,5	0,01	0,64	23,0	0,006	0,23	14,1	0,009	0,16	60	61	63
<b>PROMEDIO</b>		<b>0,99</b>			<b>0,21</b>				<b>60,65</b>	<b>46,20</b>	<b>49,49</b>

Tabla.11.- Análisis Químico del Al y Ca total luego de las modificaciones

Del cuadro se puede observar que la relación Ca/Al en el tundish, se ha reducido desde 0.41 a 0.21, aproximadamente el 50%, de manera que se tenga menos calcio libre para dañar las válvulas gavetas de la cuchara, sin perjudicar la colabilidad del acero. Además, se ha conseguido un mejor rendimiento del calcio desde la cuchara hasta el tundish desde 48.2 a 60.65%; es decir un 12%. Esto se consiguió debido a que ya no se da stirring en la colada continua, evitando reacciones y exposiciones del acero con la escoria o el medio. Con este ahorro de 12% es aproximadamente 6m de FeCa, los otros 19m son el ahorro debido a la reducción del ratio Ca/Al.

2.- Usando desulfurantes, aluminatos y cal reactiva se ha logrado reducir la cantidad de poros de 60 a 18 poros en promedio, como se muestra en el gráfico adjunto:

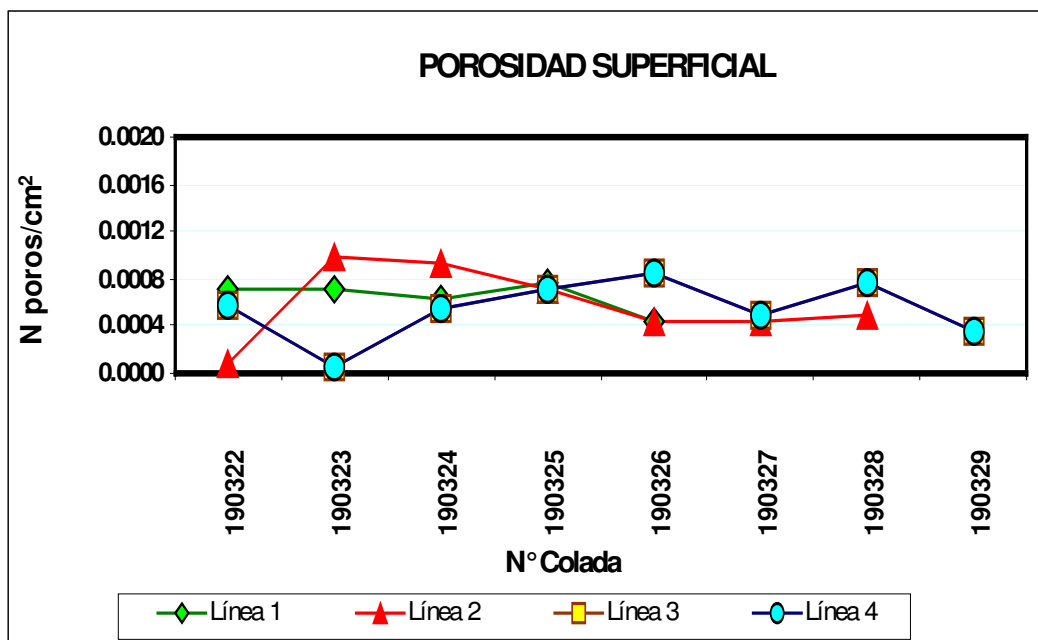


Fig 46.- Gráfica de Porosidad superficial colada a colada

Se observa que la cantidad de poros por  $\text{cm}^2$  en promedio ha disminuido a 0.0006 (equivalente a menos de 20 poros por palanquilla); esta disminución de poros es debido a la eliminación total del uso de aluminio ash nacional el cual tiene de 2.5-3% de humedad y a la eliminación también del uso de cal cálcica para estas coladas, la cual tiene hasta 15% de finos hidratados; además de la disminución de temperatura de sangrado.

En su reemplazo se usó desulfurantes y aluminatos, los cuales contienen  $\text{CaO}$  Y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , granalla de aluminio para desoxidar la escoria y cal reactiva.

Las siguientes muestras fueron tomadas en el horno cuchara con el equipo Hydris.

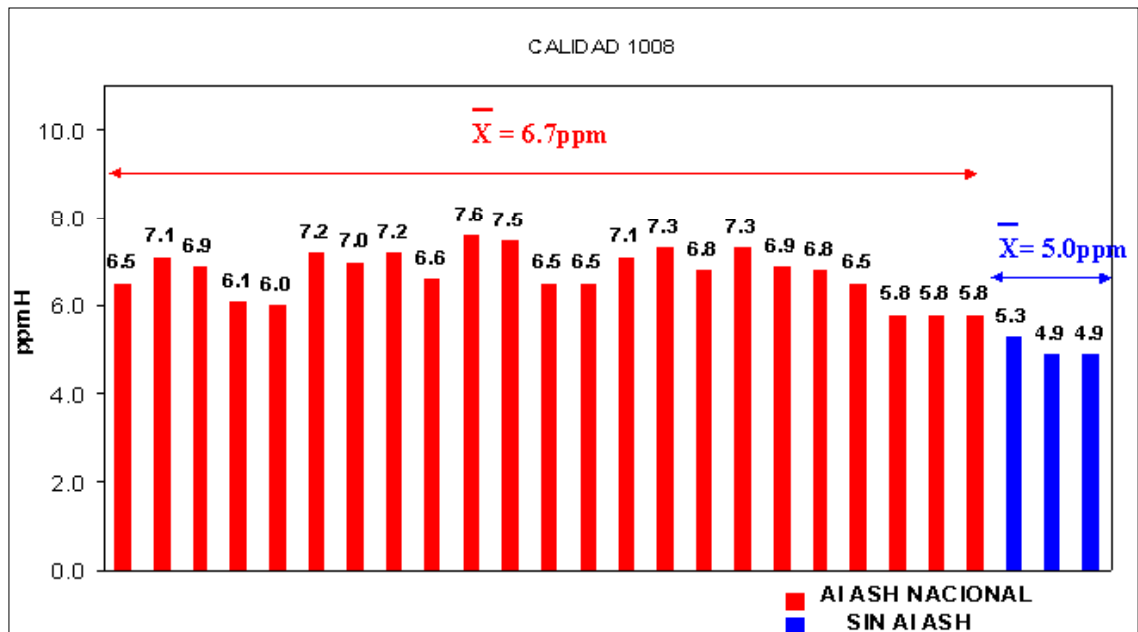


Fig 47.- Influencia de la escoria de aluminio en el Hidrógeno soluble

Se observa claramente que trabajar con residuo de escoria de aluminio eleva las ppm de hidrógeno en 1.7ppm, lo cual aumenta la posibilidad de formación de porosidad.

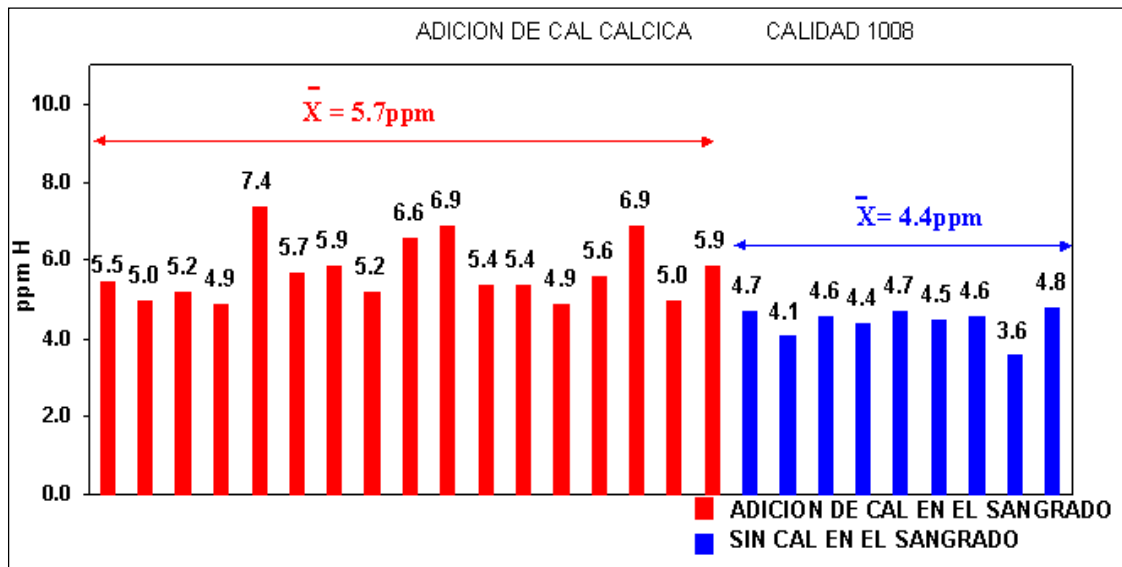


Fig 48.- Influencia de la Cal en el Hidrógeno soluble

Se observa claramente que trabajar con cal cálcica eleva las ppm de hidrógeno en 1.3ppm, lo cual también da origen a la formación de porosidad.

3.- En lo que respecta a la amplitud de carrera de oscilación se ha fabricado el nuevo casquillo de la excéntrica de colada continua con la cual se ha conseguido amplitudes de carrera de 9.4mm, comparado a 11.4mm que es la amplitud anterior, logrando reducir el tiempo de strip negativo de 0.17 a 0.14 segundos en promedio y por lo tanto disminuir la profundidad de las marcas de oscilación, comprobando además que la distancia entre marcas de oscilación se ha disminuido de 2,3cm a 1.9cm, es decir son mas seguidas pero menos profundas.

<b>Actual</b>			<b>Cambio</b>		
A =	11,4	mm	A =	9,4	mm
V/n =	0,0233		V/n =	0,0193	

V	n	NST
m/min	cpm	(s)
0	0	0,000
0,4	17	0,959
0,8	34	0,480
1,2	51	0,320
1,6	69	0,240
2	86	0,192
2,4	103	0,160
2,8	120	0,137
3,2	137	0,120
3,6	154	0,107
4	171	0,096

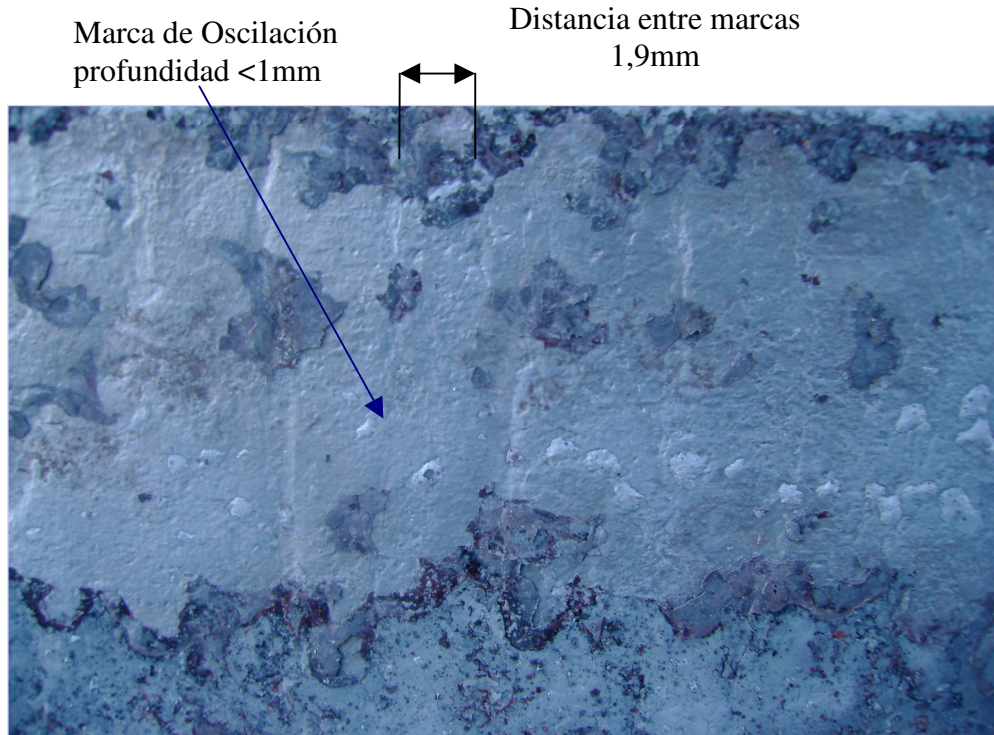
V	n	NST
m/min	cpm	(s)
0	0	0,000
0,4	21	0,791
0,8	42	0,396
1,2	62	0,264
1,6	83	0,198
2	104	0,158
2,4	125	0,132
2,8	145	0,113
3,2	166	0,099
3,6	187	0,088
4	208	0,079

1,9	81	0,202
2,0	86	0,192
2,1	90	0,183
2,2	94	0,174
2,3	99	0,167
2,4	103	0,160

1,9	99	0,167
2,0	104	0,158
2,1	109	0,151
2,2	114	0,144
2,3	119	0,138
2,4	125	0,132

**Tabla.12.- Nueva Fórmula en el programa de automatización**

Esta es la nueva tabla ingresada en el sistema de automatización HMI, se observa con letras de color azul los parámetros usados en el rango de trabajo, es decir para velocidades de línea de 1.9 a 2.3m/min y frecuencias de 90 a 120cpm, notándose que se está trabajando con menor tiempo de strip negativo. En cuanto al mould lead se mantiene en valores de 2.8-3mm, es decir en el límite inferior sugerido, pero no ha mostrado ningún tipo de inconveniente como pegado de acero al molde.



**Fig 49.- Marcas de Oscilación leve. Profundidad Menor a 1mm. Distancia entre marcas 1,9cm.**

4.- Mediante la automatización de la inyección de aluminio, se tiene un mejor control del aluminio total en la palanquilla y un ahorro de análisis de laboratorio y de mano de obra dedicada exclusiva a controlar el aluminio.

## VIII. Evaluación de los resultados de las modificaciones

---

---

*1.- Predicción del calcio y la relación Ca/Al para evitar el taponamiento de buzas y aumento del rendimiento del FeCa.*

- Disminución de 25m de FeCa      Ahorro 0.5\$/t de palanquilla.

Eliminación definitiva de los descensos de velocidad y clogging que retrasan la producción y afectan la calidad de la palanquilla.

*2.- Uso de desulfurantes y aluminatos para la desoxidación y desulfuración.*

- Con la disminución de la cantidad de poros superficiales(además de la eliminación de marcas de oscilación) se ha reducido el costo por acondicionamiento de la palanquilla a solo inspección:

Costo por Acondicionamiento:11 \$/t de palanquilla

Costo de Inspección:                      3 \$/t de palanquilla

Costo Adicional de Nueva

Práctica en el Horno:                      4 \$/t de palanquilla

Ahorro Neto                                      4 \$/t de palanquilla

Ahorro por campaña                      2080 \$ por campaña (13 coladas de 40t)

**Ahorro mensual                              16640 \$ por mes (8 campañas)**



El detalle del Costo adicional por Nueva Práctica con desulfurantes y aluminatos se presenta a continuación:

1 Práctica Convencional								390 kg de Residuo de Esc. Al					
Aditivos	Peso(kg)	Al (kg)	Al2O3 (kg)	CaO (kg)	\$/t	Sang.(kg)	Total HE(\$)	H C (kg)	Al (kg)	Al2O3 (kg)	CaO (kg)	Total HC(\$)	
FeAl	60	22,2	-	-	1620	60	97,2	40	14,8	0	0	64,8	
Granalla de Al	0	-	-	-	3580	0	0,0	0	0	0	0	0	
Residuo de Esc. Al	90	18	45	-	179,6	90	16,2	300	60	150	0	53,88	
Desulfurante EAF	0	-	-	-	500,5	0	0,0	0	0	0	0	0	
Cal Calcica A	400	-	-	348	77,99	400	31,2	300	0	0	261	23,40	
Cal Calcica B	210	-	-	193,2	93	210	19,5	0	0	0	0	0	
FeCa	-	-	-	-	3450	-	164,1	50	-	-	-	172,5	
		<b>40,2</b>	<b>45</b>	<b>541,2</b>					<b>74,8</b>	<b>150</b>	<b>261</b>		
							<b>4,10</b>					<b>7,86</b>	
40 t												<b>TOTAL</b>	
							9,75 Kg de H2O				US\$/t		<b>11,97</b>

2 Práctica Actual (Desulfurante - Aluminato de Calcio)								0 kg de Residuo de Esc. Al					
Aditivos	Peso(kg)	Al (kg)	Al2O3 (kg)	CaO (kg)	\$/t	Sang.(kg)	Total HE(\$)	H C (kg)	Al (kg)	Al2O3 (kg)	CaO (kg)	Total HC(\$)	
FeAl	90	33,3	-	-	1620	90	145,8	30	11,1	0	0	48,6	
Granalla de Al	0	-	-	-	3580	0	0,0	20	20	0	0	71,6	
Residuo de Esc. Al	0	0	0	-	179,6	0	0,0	0	0	0	0	0	
Desulfurante EAF	125	5	32,5	67,5	500,5	125	62,6	75	3	19,5	40,5	37,54	
Cal Calcica A	0	-	-	0	77,99	0	0,0	0	0	0	0	0	
Cal Calcica B	400	-	-	368	93	400	37,2	50	0	0	46	4,65	
Aluminato de Ca	25	1,25	10,5	9,25	774,97	25	19,4	50	2,5	21	18,5	38,75	
FeCa	-	-	-	-	3450	-	-	50	-	-	-	172,5	
		<b>39,55</b>	<b>43</b>	<b>444,75</b>					<b>36,6</b>	<b>40,5</b>	<b>105</b>		
							<b>6,62</b>					<b>9,34</b>	
0 t												<b>TOTAL</b>	
							0 Kg de H2O				US\$/t		<b>15,96</b>

DIFERENCIA 2 - 1	<b>2,52</b>	(Diferencia Actual - Convencional)	<b>4,00</b>
------------------	-------------	------------------------------------	-------------

**Tabla.13.- Cuadros comparativos con la nueva práctica de desoxidación**

**3.-Modificación de la amplitud de carrera de oscilación, para reducir las marcas de oscilación.**

Disminución de la distancia de marcas de oscilación de 2,3cm a 1,9cm.

Disminución de la profundidad de las marcas de oscilación de 2mm a menos de 1mm, reduciendo la posibilidad de grieta transversal en la marca de oscilación.

Mejor calidad superficial, lo que complementa que no se acondicione la palanquilla. El ahorro mensual por este concepto está incluido en el costeo anterior.

**4.-Automatización de la inyección de aluminio para el mejor control del proceso.**

Costo unitario de Análisis de laboratorio	1\$ por análisis
Se eliminó 43 análisis ARL	43\$ por campaña
Ahorro mensual	344\$

Eliminación de la posibilidad de incrustación de escoria por exceso de aluminio o de porosidad por reducción de aluminio.

**EVALUACION ECONOMICA:**

**INVERSION:**

1,- Implementación de Nuevos Casquillos en la mesa de oscilación	\$ 3000
2,- Implementación de Sistema de Automatización de la Inyección de Aluminio	<u>\$ 3560</u>
<b><u>TOTAL:</u></b>	\$ 8640

**BENEFICIOS:**

1,- Disminución de consumo de Ferrocaldio	\$ 260/mes
2,- Eliminación de Acondicionamiento de Palanquilla por pinhole y marca de oscilación profunda	\$ 16640/mes
3,- Reducción de Análisis de Laboratorio por Al	<u>\$ 376/mes</u>
<b><u>TOTAL:</u></b>	\$ 17276/mes

Para una producción de 8 campañas por mes, el retorno de la inversión se produce en 15 días. Es decir el retorno de la inversión se dará luego de una producción de 2080 toneladas de palanquilla 1008A2 (4 campañas).

## IX. Conclusiones

---

**1.-** Adicionarle mayor cantidad de calcio por tener mas aluminio no es necesariamente correcto, ya que el ratio calcio aluminio que garantiza la colabilidad no es lineal, sino una curva de manera que a medida que aumenta el aluminio total, el ratio calcio–aluminio total necesario para evitar el clogging es menor.

**2.-** La reoxidación del calcio actual en el acero esta en el orden del 50.42%, por lo que se debe de tener el doble de calcio en el acero líquido en la cuchara aproximadamente, para que al pasar por las buzas del tundish mantenga la relación calcio aluminio y no afecte la colabilidad ni tenga problemas de clogging.

**3.-** Se observa que la relación calcio aluminio en la palanquilla esta en muchos casos por debajo de lo requerido para evitar la formación del hexaluminato de calcio. La importancia en este caso no es por la colabilidad sino es porque el hexaluminato de calcio es de menor deformabilidad que el dialuminato de calcio, pudiendo perjudicar la trefilabilidad del producto. Por ejemplo, para 0.008-0.010% de aluminio, se necesita un ratio calcio-aluminio mayor de 0.11 para formar preferentemente dialuminato de calcio. Esto es afectado por el bajo rendimiento del calcio y por niveles de aluminio altos o fluctuantes por carecer de un control exacto de inyección de aluminio. Esto sin considerar las microinclusiones formadas por el manganeso y el silicio.

**4.-** Con el uso de desulfurantes y aluminatos de calcio en reemplazo del aluminio ash, se ha logrado disminuir importantemente la porosidad, debido a que estos elementos no contienen hidrógeno, que es el principal causante de la porosidad. Se ha disminuido para este mismo efecto el uso de cal cálcica, que normalmente tiene alto porcentaje de finos (hidróxidos de calcio)

**5.-** El nuevo casquillo colocado en las líneas de colada continua ha reducido la amplitud de carrera permitiendo un tiempo de strip negativo menor (0,14 segundos), obteniendo una mejor calidad superficial al reducir la profundidad de las marcas de oscilación y la posibilidad de grietas transversales en la marca de oscilación.

**6.-** Con la automatización de la inyección de aluminio, se puede eficientemente controlar el aluminio total en la palanquilla de modo de obtener un producto libre de porosidades superficiales o inclusiones. El costo que se podría perder por una mala calidad es incalculable.

## X. Recomendaciones

---

1.- La práctica de acero limpio debe seguir mejorando en esta calidad, en la cual debe de evitarse el paso de escoria del horno eléctrico al horno cuchara, la escasa escoria que logre pasar debe haber sido desoxidada parcialmente con un buen bloqueo, el agujero de la sangría del horno debe ser de 9 pulgadas armada con un tubo central de fierro interno. la piquera reparada y verificada antes de la producción.

2.- Así mismo luego del ajuste de la composición química del acero y de la desoxidación de la escoria, debe de seguir mejorándose la práctica de darle calentamiento al acero líquido en el horno cuchara con un minuto de arco eléctrico sin stirring, para luego evitar agitación en colada continua permitiendo la flotación de las macroinclusiones, disminuyendo la reoxidación del calcio del acero y además de permitir trabajar con un menor superheat o sobrecalentamiento en el tundish.

3.- Se debe en lo posible de adquirir nuevos software de simulación de procesos metalúrgicos, como el Fast Sage o el Termo Calc, que predicen el tipo de inclusiones resultantes en el acero para una composición química de acero y escoria dada, a cualquier temperatura, además de mostrar las temperaturas de fusión de las microinclusiones presentes entre otros casos.

4.- En caso de tener posteriormente stirring electromagnético en los moldes de colada continua, debe de realizarse pruebas complementarias para reducir la cantidad de aluminio inyectado en el acero, debido a que el EMS(Electro Magnetic Stirring) al romper los brazos dendríticos eliminará parcialmente los gases atrapados, lo cual induciría un nuevo equilibrio de gases, según la ley de Sievert.

5.- Los valores registrados de la inyección de aluminio deben ser cargados en el programa de automatización HMI, para su registro y control. Además debe cargarse en el OWS de Colada Continua el porcentaje de aluminio requerido para esta calidad y en otras, de manera de que el PLC ejecute teniendo como objetivo de nivel de aluminio estos valores y los display en las pantallas del HMI.

6,- La automatización y mejora de la inyección de aluminio puede y debe ser usada en otras calidades en la cual se necesite como las calidades 1008BCC, 10B06, 70S6, las calidades 1020P3-1, entre otros, para lo cual deberá hacerse nuevos estudios de la cantidad de aluminio que se solubiliza en el acero y que parte se transforma en escoria debido a la desoxidación y formación de alúmina.

7,- Para mejorar aún mas en la calidad superficial de la palanquilla 1008A2 sería necesario equipar la colada continua con un sistema de buza sumergida, barra tapón y polvo colador, evitando la reoxidación del acero y la inyección de aluminio en el molde, obteniendo un acero limpio de inclusiones y poder cargarlo en caliente a la planta de laminación.

## Bibliografía

---

- 1.-“Curso de Software Termocalc” – Porto Alegre Brasil 2006.
- 2.-“Re-oxidation of low-carbon aluminum-killed steel before and after Ca-treatment” - Y. Wang,A. Gomez, C. Cicutti, A.W. Cramb, S. Sridhar,14th IAS Steelmaking Conference, San Nicolás, Argentina, 2003.
- 3.-“Curso Cobre Afino y Colado de Productos de Calidad- Instituto Argentino de Siderurgia” - Argentina 2000.
- 4.-“Arc Furnace and Continuous Casting Technology with Energy Conservation and Recycling Consideration” - TEXBOOK Japan 1999.
- 5.-“Control de Microinclusiones en aceros calmados al aluminio y tratados con calcio” - C.E.Cicutti,J.Madías,J.C.Gonzales,1997.
- 6.- “Steel contamination. influence on inclusion composition and castability” - Philippe Guillo,Vesuvius Research, Feignies,France - José Simões, Vesuvius International, Kraainem,Belgium.1991.
- 7.- “Manejo de la Limpieza Inclusionaria en el Horno cuchara y la Colada Continua” - Jorge Madías, Cristian Genzano, Diego Martín. IAS Buenos Aires.1991
- 8.-“Control de la Reoxidación del acero y cierre de buzas en Colada Continua” - M.Nadif,M.Burty,H Soulard, Arcelor, Francia.1990
- 9.-”Equilibrio en el sistema Fe-Ca-Al-O aplicado a aceros pseudoefervescentes” - V.Paglianio, J.Madías, E.Varela, H.Reggiardo, ACINDAR S.A.1987



10.- “Calcium Clean Steel” – Autor: Tohei Ototani  
Editorial Springer-Japan 1986.


11.- “Metallurgical Thermochemistry” - O. Kubachewski and C.B. Alcock, 5th  
Edition, Pergamon Press, Oxford, 1983.

12.-“Hydrogen contents of low and high alloy liquid steels as measured by  
Hydris system” - R.P.Stone - Electro-nite Co., D.A.Vensel -Armco Research  
and Technology. E.T.Turkdogan – Consultant,1991, Steel Making  
Conference.

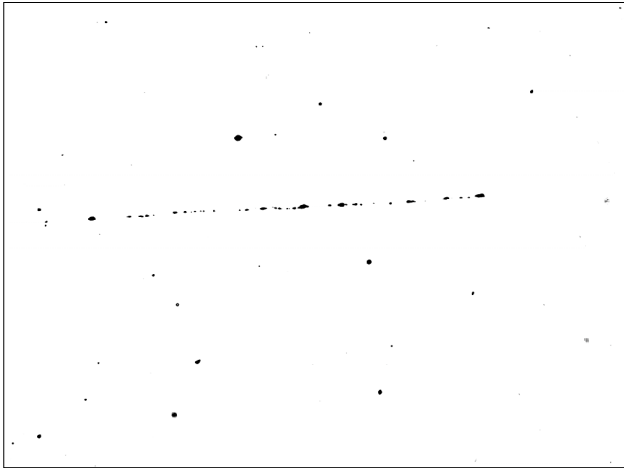
13.-“Improvement of surface quality of continuously cast billet by high cycle  
mold oscillation” - Hiroyuki Yasunaka, Toshiharu Mori, Takanori Kominami –  
Kobe Steel LTD.1986.

## **ANEXOS**

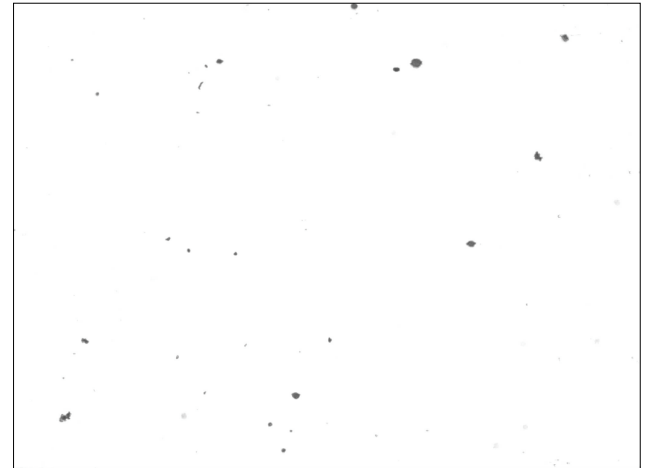
*i.i Metalografía del Alambroón para electrodos 1008A2:*

 <p><b>ACEROS AREQUIPA</b></p>	<b>DEPARTAMENTO DE METALURGIA</b>  <b>LABORATORIO METALOGRAFICO</b>						
	<b>REGISTRO DE MEDICION DE TAMAÑO DE GRANO Y NIVEL DE INCLUSIONES</b>						
PRODUCTO : ...	Alambroón para Electroodos	O. F. : .....	222066 N° 02-2006				
CALIDAD : .....	1008 A2	FECHA DE RECEP. : ...26-01-2006.....	FECHA EMISION 27-01-2006				
DIAMETRO : .....	5.5 mm	* Tamaño de grano según ASTM E112					
ANALISTA : .....	Tec. A.Tello.	* Nivel de inclusiones según ASTM E45					
ITEM	N° Rollo	N° COLADA	Tamaño de Grano G	Nivel de Microinclusiones	Propiedades Mecánicas		
					L. Fluencia (Kg/mm²)	R.Tracción (Kg/mm²)	Alargam (%)
1	M-014-1	183339	16,03	C-1-F/D-2-F			
2	M-014-2	183356	15,2	C-1-F			
3	M-014-3	183511	15,21	C-1-F/D-1-F			
4	M-014-4	183516	14,02	C-1-F/D-2-F			
5	M-014-5	183517	14,26	C-2-F/D-1-F			
6	M-014-6	183524	17,32	C-3-F/D-2-F			
7	M-014-7	185064	15,44	C-2-F/D-2-F			
8	M-014-8	185070	14,97	C-1-F/D-1-F			
9	M-014-9	185074	14,83	C-1-F/D-1-F			
10	M-014-10	185273	15,09	C-2-F/D-1-F			
11	M-014-11	185274	13,64	C-1-F/D-2-F			
12	M-014-12	185275	14,41	C-1-F/D-2-F			
13	M-014-13	185276	16,15	C-1-F/D-1-F			
14	M-014-14	185277	15,97	C-1-F			
15	M-014-15	185278	15,21	D-1-F			
16	M-014-16	185280	13,78	C-1-F/D-1-F			
17	M-014-17	185281	12,87	C-1-F			
18	M-014-18	185282	13,93	C-2-F/D-1-F			
19	M-014-19	185283	17,59	C-2-F			
20	M-014-20	185284	19,46	C-2-F/D-1-F			
21	M-014-21	185285	17,82	C-2-F/D-1-F			
22	M-014-22	185286	11,68	C-1-F/D-1-F			
23	M-014-23	185464	15,01	C-1-F			
24	M-014-24	185475	15,32	C-1-F/D-1-F			
25							
26							
27							
28							
29							
OBSERVACIONES : .....							

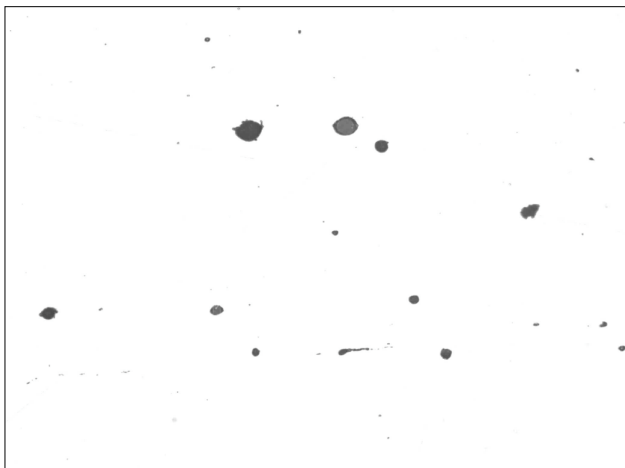
***i.ii.- Muestras de alambón Liso para Electroodos  $\phi$  5.5 mm  
calidades 1008 A2.Pulido sin ataque a 100X***



**SILICATOS Nivel 1 – F    OXIDOS Nivel 1 - F**



**SILICATOS Nivel 1 – F    OXIDOS Nivel 1 - F**



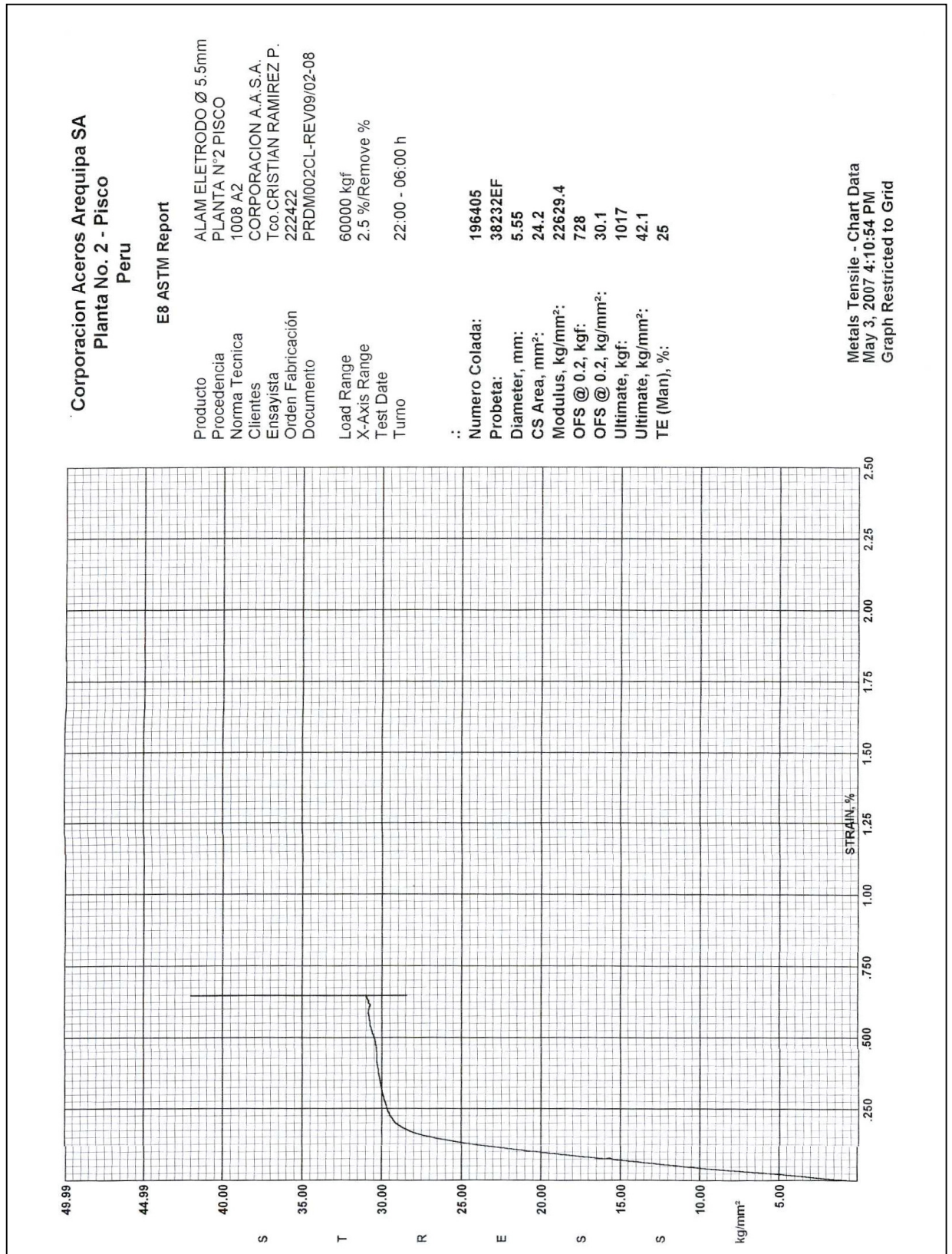
**SILICATOS Nivel 2 – F    OXIDOS NIVEL 2 - G**

<b>Detalles del Ensayo o Análisis</b>	
<b>Operador:</b>	Tecnico
<b>Ensayo/Análisis:</b>	Limpieza del Acero
<b>Sección analizada:</b>	Longitudinal
<b>Preparación:</b>	Pulido espejo
<b>Ataque químico:</b>	No Aplica
<b>Magnificación:</b>	100X

**F = inclusiones finas menores a 8 micrones  
G = inclusiones mayores a 8 micrones**

La teoría de trefilación dice que un acero no debe exceder el Nivel 3 en la limpieza inclusionaria.

ii.- Curva Esfuerzo - Deformación del Alambroón para electrodos 1008A2:



**iii.- BALANCE SIMPLIFICADO DE ENERGIA HORNO ELECTRICO 45t**

TABLA I							
	Carga	Rendimiento		Pesos		1 t Ac.L	1 t Ac. L
				Metalicos	Acero Liquido		
Acero	80%	Chatarra	90%	36,36	32,73	0,82	0,91
Líquido - t	20%	Hierro Eesponja	80%	9,09	7,27	0,18	0,23
40,00	88%	Total			40,00		1,14
		Peso Metalicos - t		45,45			

TABLA II		
Peso de escoria	180,00	kg/t
Temperatura de fusión	1.540	°C
Tempratura de Vaciado	1.650	
Entoces tenemos que calentar	110	
Calor especifico del Acero Liquido	0,2333	kWh/t°C

TABLA III		
Fusión y calentamiento del Acero a 1520 °C	340,00	kWh/t
Fusión y calentamiento Hierro Esponja a 1520 °C	588,3	
$E = 1437 + 25 - G \times 9,43$ $G = 90\%$		
Energía para Fundir óxidos es de 35% a mas que Chatarra	459,00	
Energía de Perdidas	120,00	

TABLA IV						
<b>DATOS DE ENERGIA E OXIGENO</b>						
Consumo de Oxígeno na Fusão	65%	Fusión	819	Nm3/colada	20	Nm3/t AL
Consumo de Oxígeno no Refino	35%	Afino	441	Nm3/colada	11	Nm3/t AL
<b>Consumo Total de Oxígeno (Lanz)</b>			<b>1.260</b>	<b>Nm3/colada</b>	<b>30</b>	<b>Nm3/t AL</b>
Datos de Fuentes de Energía						
Oxigeno		3,50	kWh/Nm3			
Gas Natural		8,00	kWh/Nm3			
		9,30	Kcal/Nm3			
		GN	2,40	Nm3/t		
		O2 p GN	1,00			
		O2 Puerta	15,00			
		O2 Danieli	12,00			
		O2 Post Combustión	2,00			

TABLA V					
<b>CÁLCULO DE GASTOS ENERGÉTICOS</b>			kWh/t	kWh/40 t	
Fusión de Chatarra a1540 °C			278,18	11.127,27	
Fusión de DRI a 1540 °C			106,96	4.278,55	
Energía para formar Escória			82,62	3.304,80	
Energía para Calentar el Acero Liquido desde 1540 °C hasta 1650 °C (110 °C)			25,66	1.026,52	
Energía para Calentar la Escoria desde 1540 °C hasta 1650 °C (110 °C)			6,24	249,44	
Energía de Perdidas Diversas			120,00	4.800,00	
TOTAL			619,66	24.786,58	
				-	
ENERGIA DE FUSION			Total	468	18.710,62 kWh
			Via O2	68	2.730,00 kWh
			Via GN	15	614,40 kWh
			Via Eletrica	384	15.366,22 kWh
				-	
ENERGIA DE AFINO			Total	152	6.075,96 kWh
			Via O2	37	1.470,00 kWh
			Via Eletrica	115	4.605,96 kWh
Energía electrica por colada			499,30	19.972,18	
			kWh/t	kWh/colada	

**iv.i.- BALANCE SIMPLIFICADO DE CARGA HORNO ELECTRICO 45  
TONELADAS**

MATERIA PRIMA	CARGA ( t )		48	Rendimiento: 90%	
	t/año	% carga	t / colada	% SiO2	t SiO2
Chatarra Frag. Nacional	204.000	41,64	19,99	0,5	0,10
Chatarra Frag. Importada	125.869	25,69	12,33	0,5	0,06
Charrata Pesada	24.000	4,90	2,35	1,0	0,02
Chatarra Frontera	36.000	7,35	3,53	1,0	0,04
<b>DRI a Carbón</b>	80.000	<b>16,33</b>	7,84	4,5	0,35
Perdigones	10.000	2,04	0,98	5,0	0,05
Chatarra propia	10.000	2,04	0,98	1,0	0,01
<b>Total M Prima</b>	<b>489.869</b>		<b>48,00</b>		<b>0,63</b>

INSUMOS	Ratio (kg/t)		kg/colada	% SiO2	t SiO2
Cal cálcica	17.321	39,4	1700,62	3,7	0,06
Antracita Gruesa	24.444	50,0	2400,00	20,0	0,48
<b>Total Insumos</b>	<b>41.766</b>		<b>4,10</b>		<b>0,54</b>
Total					1,11

Aire de Post-Combustión	43.991	t/año	4,5	t/colada
<b>TOTAL ENTRADAS</b>	<b>575.626</b>	t/año	<b>57</b>	t/colada

PRODUCTO				
Acero Líquido	440.882	t/año	43,37	t/colada

DESECHOS				
Escoria	50.655	t/año	5,0	t/colada
Gases (CO <sub>2</sub> )	75.289	t/año	7,4	t/colada
Polvos	8.800	t/año	0,9	t/colada
<b>Total DESECHOS</b>	<b>134.744</b>	t/año	<b>13,2</b>	t/colada

**iv.ii.- ESQUEMA DE BALANCE DE CARGA SIMPLIFICADO PRODUCCION  
ANUAL 440 000 t DE ACERO LIQUIDO**

