

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

**Facultad de Ingeniería
Geológica Minera y Metalúrgica**



**Estudio de la Desoxidación
del Acero Efervescente - 08 B**

Informe de Ingeniería

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

Wilder Jaime Quiroz Cubas

PROMOCION 1981 - I

LIMA - PERU

1992

INTRODUCCION

En la fabricación del acero efervescente, el grado de oxidación del acero es uno de los principales factores responsables en la obtención de lingotes de buenas características superficiales.

En un lingote de acero muy oxidado, las burbujas tubulares se presentan muy próximas a la superficie, originando fisuras en planchas y defectos superficiales en el producto terminado.

Si el acero estuviera muy oxidado, el espesor de la piel aumentaría pero presentaría microburbujas y poros, que cuando están muy cerca de la superficie del lingote son también responsables del apareamiento de defectos de superficie en el producto final. Por tanto, para acierto tipo de acero efervescente y determinadas condiciones de lingoteamiento existe un nivel óptimo de oxidación del baño para el cual la región compacta de la piel sólida se presenta suficientemente gruesa para las exigencias posteriores en laminación, observar fotografías No. 1, 2 y 3.

Este control de oxidación es particularmente importante para los aceros destinados a la fabricación de planchas y bobinas, laminadas en frío, donde son mayores las exigencias de superficie; tal es el caso de los aceros efervescentes:

O7E, O8B destiandos al estampado medio.

El presente estudio tiene como objetivo mostrar un análisis teórico de los fenómenos que ocurre en la desoxidación hecha con Al-Mn del acero efervescente O8B, con el fin de obtener una base para la mejor comprensión del mecanismo de desoxidación de este acero producido en los hornos eléctricos de SIDERPERU.

I N D I C E

Introducción

CAPITULO I

ASPECTOS GENERALES DEL ACERO EFERVESCENTE

	Pág.
I.1. Definición	05
I.2. Características del acero efervescente	05
I.3. Tipos de acero efervescente	07
I.4. Variables que inciden sobre la acción efervescente	09
I.5. Tecnología del tapado del acero efervescente	12

CAPITULO II

PROCESO DE FABRICACION DEL ACERO EFERVESCENTE OBE EN SIDERPERU

II.1. Horno eléctrico - Nave de colada	16
--	----

CAPITULO III

FUNDAMENTOS TERMODINAMICOS Y CINETICOS DE LA DESOXIDACION DEL ACERO

III.1. Introducción	21
III.2. Termodinámica de la desoxidación del acero por Al - Si - Mn	23
III.3. Cinética de la desoxidación del acero	30

CAPITULO IV

CALCULO DE LAS ADICIONES EN CUCHARA

IV.1.	Condiciones de equilibrio del baño-escoria	36
IV.2.	Cálculo de adición de desoxidantes	36

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS

V.1.	Conclusiones	39
V.2.	Sugerencias	39
BIBLIOGRAFIA		41

CAPITULO I

ASPECTOS GENERALES DEL ACERO EFERVESCENTE

I.1. DEFINICION

Se puede definir en forma práctica al acero efervescente como aquel cuyo estado de oxidación es tal, que la reacción de descarbonación, con desprendimiento de CO, y que pequeñas cantidades de CO₂ continúa después de colado.

Dicho desprendimiento gaseoso y el movimiento del acero líquido en las lingoteras (EFERVESCENCIA) da lugar a la formación de lingote muy particular cuyas principales características veremos a continuación.

I.2. CARACTERISTICAS DEL ACERO EFERVESCENTE

Considerando el lingote desde su exterior, hacia el centro, se encuentran sucesivamente las siguientes formaciones:

a) Una zona de solidificación casi instantánea, con una composición química idéntica al acero líquido, de muy poco espesor.

b) Una zona muy pura, piel, producida por el efecto de "barrido" que efectúan los gases en su camino ascendente, cuyo espesor depende de varios factores,

c) Una zona de sopladuras primarias, producida como consecuencia del efecto combinado del avance del frente de solidificación, la presión ferrostática y el descenso paulatino

de la velocidad de reacción del carbono con el oxígeno.

d) Una zona central de segregación, creciente hacia el centro del lingote, con una elevada concentración de las impurezas, óxidos y sulfuros principalmente.

Esta segregación hacia el corazón del lingote es producida por la circulación convergente del acero líquido desde la periferia hacia arriba, y del centro hacia abajo por la acción efervescente.

La estructura del lingote efervescente le confiere propiedades específicas al producto, tales como:

- . Una superficie apta para usos en los que se requiere una buena base para pintar o esmaltar, con una buena resistencia a la corrosión, dada su pureza.
- . Propiedades distintas desde la base hasta el tope del lingote.
- . Una ductilidad que lo hace apto para grandes deformaciones.

La compatibilización de estas características y su regulación durante la fabricación del lingote, y su posterior procesamiento con relación al uso final constituye un extenso campo de acción para el acerista.

Más adelante se enumeran las principales variables que ejercen influencia sobre la acción efervescente y las características del lingote. Conviene señalar de que manera se evalúa la acción efervescente. En este aspecto existen diversos criterios, sin embargo, en general, puede decirse que, si bien se da distinta importancia relativa a cada uno de ellos, según sea el procedimiento posterior, así como el

uso final. La acción efervescente es calificada por :

- Demora en comenzar, luego del llenado del molde.
- Intensidad evaluada por la altura de la onda.
- Duración de la efervescencia.
- Descenso, ascenso o mantenimiento del nivel de llenado del molde.

1.3. TIPOS DE ACERO EFERVESCENTE

En función de la forma en que se produce la interrupción de la efervescencia, los aceros efervescentes pueden clasificarse en:

3.1. Efervescente en molde abierto

Es aquel acero colado, por boca o fuente, en lingoteras abiertas. Se permite la evolución de la efervescencia por un período de 15 a 20 minutos, luego de la cual se sella el tope por medio de una tapa pesada, o chapas delgadas, o un fuerte desoxidante (FeSi en polvo o aluminio en granallas) y agua.

3.2. Acero Tapado

Básicamente se trata de un acero al cual se permite una evolución de la efervescencia entre 1 a 3 min. según se requiera. Dependiendo del tipo de sellado puede ser colado en molde de botella o en molde abierto clásico. En el primer caso se efectúa un tapado mecánico; en el segundo se realiza un tapado químico, mediante el agregado de un desoxidante fuerte (FeSi o Aluminio).

El tapado mecánico clásico se logra colando un

acero remontante de tal manera que, pasados de 1 a 3 min. de llenado, se logra el sellado entre el acero que asciende y la tapa del molde botella. Dado que se trata de un acero remontante, tendrá un espesor muy fino de piel en el tercio inferior y será un lingote sumamente difícil de procesar sin producir grandes degradaciones de material por efectos superficiales.

Un posterior desarrollo con respecto al colado en molde botella es el "splashed capped", que consiste básicamente en colar un acero nivelado (ni descendente ni remontante) hasta el comienzo del cuello de la botella, y luego del tiempo prefijado, recolar el mismo y colocar la tapa produciendo así el sellado.

Las ventajas que ofrece este método es el logro espesor de piel en el tercio inferior que el "capped" clásico, con las facilidades de su tratamiento posterior en laminación lo cual disminuirá el nivel de rechazo.

3.3. Acero Estabilizado

Se trata de un acero colado como efervescente, que luego de un tiempo prefijado (3 a 5 min), es calmado, introduciéndose aluminio al corazón del lingote, se obtiene así un acero con la piel de un efervescente, y las propiedades de no envejecimiento de un calmado. La práctica de colado consiste en llenar la lingotera hasta el borde inferior de la mazarota, dejar producir la acción efervescente y transcurridos 3 a 5 min., recolar la zona de mazarota, a la vez que mediante un artificio se introduce una

cantidad suficiente de aluminio en forma de granallas o alambre.

Este acero ofrece mayor comparado con el acero calmado al aluminio, y permite su reemplazo, por ejemplo en las calidades de embutidos que sufren un posterior tratamiento en enlozado.

I.4. VARIABLES QUE INCIDEN SOBRE LA ACCION EFERVESCENTE

Dado que la acción efervescente es consecuencia del desprendimiento gaseoso, durante cierto tiempo, desde la zona de acero líquido, tienen influencia sobre la acción efervescente todas las variables que afecten los fenómenos de formación y desprendimiento de los gases, así como a los fenómenos de solidificación del lingote. Las principales son las siguientes:

4.1. Contenido de Oxígeno y Carbono

La reacción entre el oxígeno y el carbono para formar CO está influenciado por la concentración de los mismos en la masa de acero líquido. El efecto del oxígeno sobre el comportamiento del acero en el molde fue experimentado por Mc Nair (1948). En base a adiciones decrecientes de mineral y crecientes de aluminio en los moldes obtuvo una completa de lingotes que van, desde un acero efervescente con un importante descenso en moldes, consecuencia de una acción efervescente violenta, hasta un acero típicamente calmado, pasando por los diversos estados intermedios.

El efecto del carbono fue experimentado por Duflet y Richard (1958). En este caso al mismo acero base colado, altamente descarburado, se adicionaron cantidades crecientes de carbono en polvo, produciéndose una gama de lingotes desde un típico semicalmado con tope convexo, pasando por un efervescente remontante, hasta lograr un efervescente nivelado o descendente.

En la práctica para lograr ésto una buena acción efervescente se busca llegar a la cuchara con el carbono más bajo posible y con un elevado grado de oxidación.

4.2. Contenido de Manganeso

El tenor de manganeso ejerce una acción importante, ya que disminuye la oxidación relativa del acero, su contenido debe restringirse al mínimo posible. Los valores óptimos de carbono y manganeso son los siguientes:

C = 0.05/0.10 % Mn = 0.25/0.40 %

4.3. Contenido de Azufre

Existe un marcado efecto del azufre en el espesor de la piel, así como de la forma y tamaño de la burbujas.

Muy bajos valores de azufre, según estudios recientes, disminuye la proporción de lingotes remontantes con la consiguiente disminución de defectos superficiales por bajo espesor de piel.

Este fenómeno es explicado, según algunas publicaciones por el efecto favorable al desprendimiento gaseoso causado por el incremento de viscosidad, consecuencia del menor tenor de oxígeno. Asimismo se ha verificado que, a

tenores decrecientes de azufre, las burbujas primarias disminuyen de tamaño y su forma se alarga y disminuye la sección. Esto sería causado por la dificultad de crecimiento en volumen producido por el aumento de la viscosidad del acero líquido a menores tenores de azufre.

4.4. Temperatura de Colada

La temperatura de colada, o más precisamente la temperatura del acero en la cuchara durante la colada tiene un efecto importante en la acción efervescente y en las características del lingote, es decir, sobre el espesor de piel y grado de segregación.

Temperaturas bajas causan elevación de la acción efervescente, buen espesor de piel y segregaciones importantes. Por contrario, temperaturas por encima de la óptima, producen aceros con efervescencia retardada (síntoma evidente de bajo espesor de la piel en el tercio inferior).

4.5. Temperatura de Lingoteras

Cuando las lingoteras están a temperaturas superiores a los 120°, se produce un efecto adverso sobre la acción efervescente, lo que puede de alguna manera, asimilarse al efecto de una elevada temperatura de colada sobre la citada acción efervescente.

4.6. Velocidad de Ascenso en Lingotera

Otro de los factores tecnológicos de gran importancia es la velocidad de ascenso del nivel del acero líquido en el molde, ya que produce un gradiente de la presión ferrostática que incide sobre el desprendimiento

gaseoso.

Como práctica corriente, en el colado por la boca, se tiende a colar con el menor diámetro de buza posible y comenzar el llenado inferior a medio corro, efectuando las adiciones de agentes efervescentes durante el llenado del tercio inferior del molde.

4.7. Tamaño del Lingote

Se han efectuado numerosos estudios acerca de la incidencia del tamaño del lingote sobre las características del lingote producido. En general existe coincidencia sobre los siguientes conceptos:

- A mayor tamaño, por lo tanto mayor sección y menor viscosidad de ascenso, mayor espesor de piel.
- A medida que se incrementa el tamaño del lingote, aumenta la segregación, especialmente la del azufre, además la zona de mayor segregación se encuentra más baja (hacia el pie del lingote).

I.5. TECNOLOGIA DEL TAPADO DEL ACERO EFERVESCENTE

Puesto que la eficiencia principal del acero efervescente se origina por el mezclado del metal en la lingotera y el mezclado por el desprendimiento activo de los gases, interrumpiendo o decelerando artificialmente el desprendimiento se puede impedir el mezclado y disminuir el grado de heterogeneidad del lingote de acero efervescente. En la práctica con dichos fines se aplican los métodos tecnológicos:

5.1. Taponamiento Mecánico

La congelación artificial de la parte de la cabeza del lingote es lograda cubriendo con losas metálicas denominadas tapas.

Como regla el lingote se cubre con la tapa una vez terminada la formación de la tercera zona de cristalización, agregándole agua, con el fin de ayudar el enfriamiento.

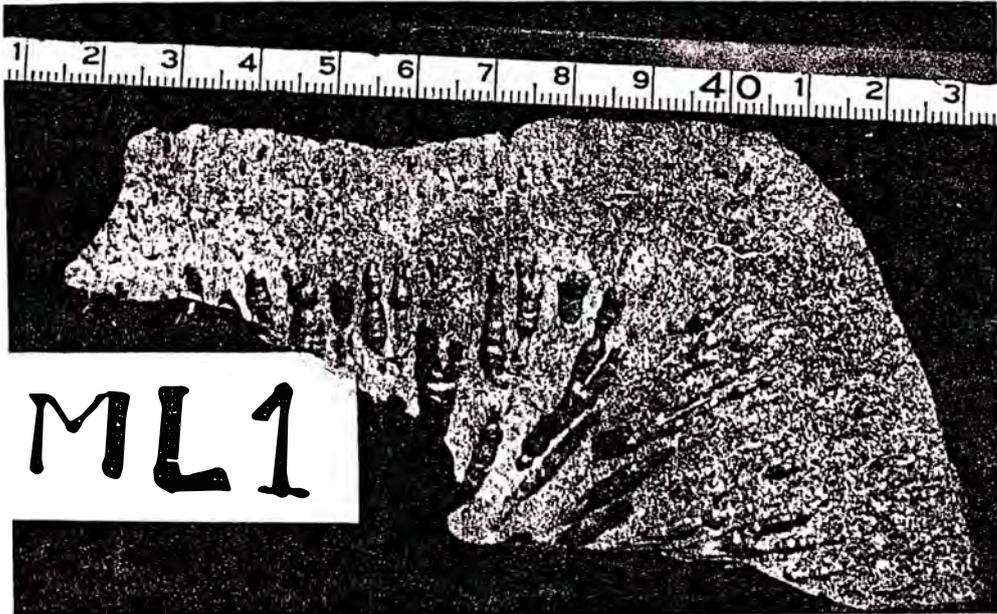
La transmisión del calor de la parte superior del lingote a la tapa maciza provoca la solidificación rápida de la costra superior del lingote, parece que el lingote queda cerrado con tapón por si mismo, la presión en el lingote aumenta bruscamente y la reacción carbono con el oxígeno (CO), cesa; ya que las burbujas de monóxido formadas durante la reacción no puede vencer la presión exterior en el lingote taponado.

Fuesto que termina el desprendimiento de los gases, también el metal líquido deja de mezclarse con intensidad, disminuyéndose el grado de heterogeneidad del lingote.

5.2. Taponamiento Químico

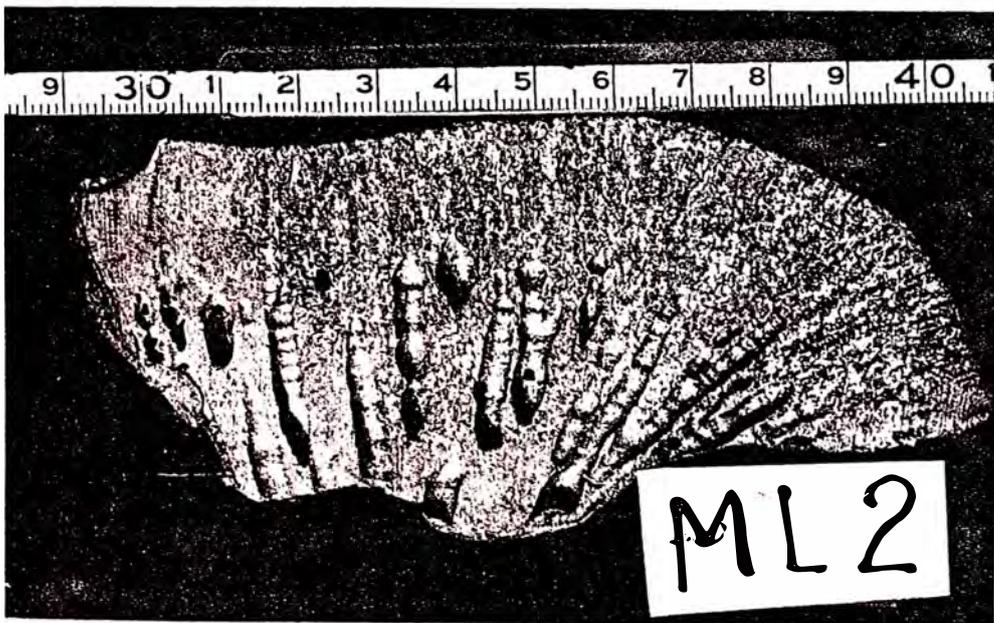
La desoxidación de la parte de la cabeza del lingote se realiza introduciendo (por lo general, en el momento en que termina la formación de la tercera zona de cristalización) los desoxidantes fuertes, el aluminio por ejemplo. Una vez introduciendo el desoxidante fuerte, disminuye el grado de desoxidación del metal, deja de transcurrir, respectivamente la reacción de $C + O = CO$,

termina el mezclado energético del metal líquido y por consiguiente disminuye el grado de heterogeneidad del lingote.



Fotomacrografía No 1

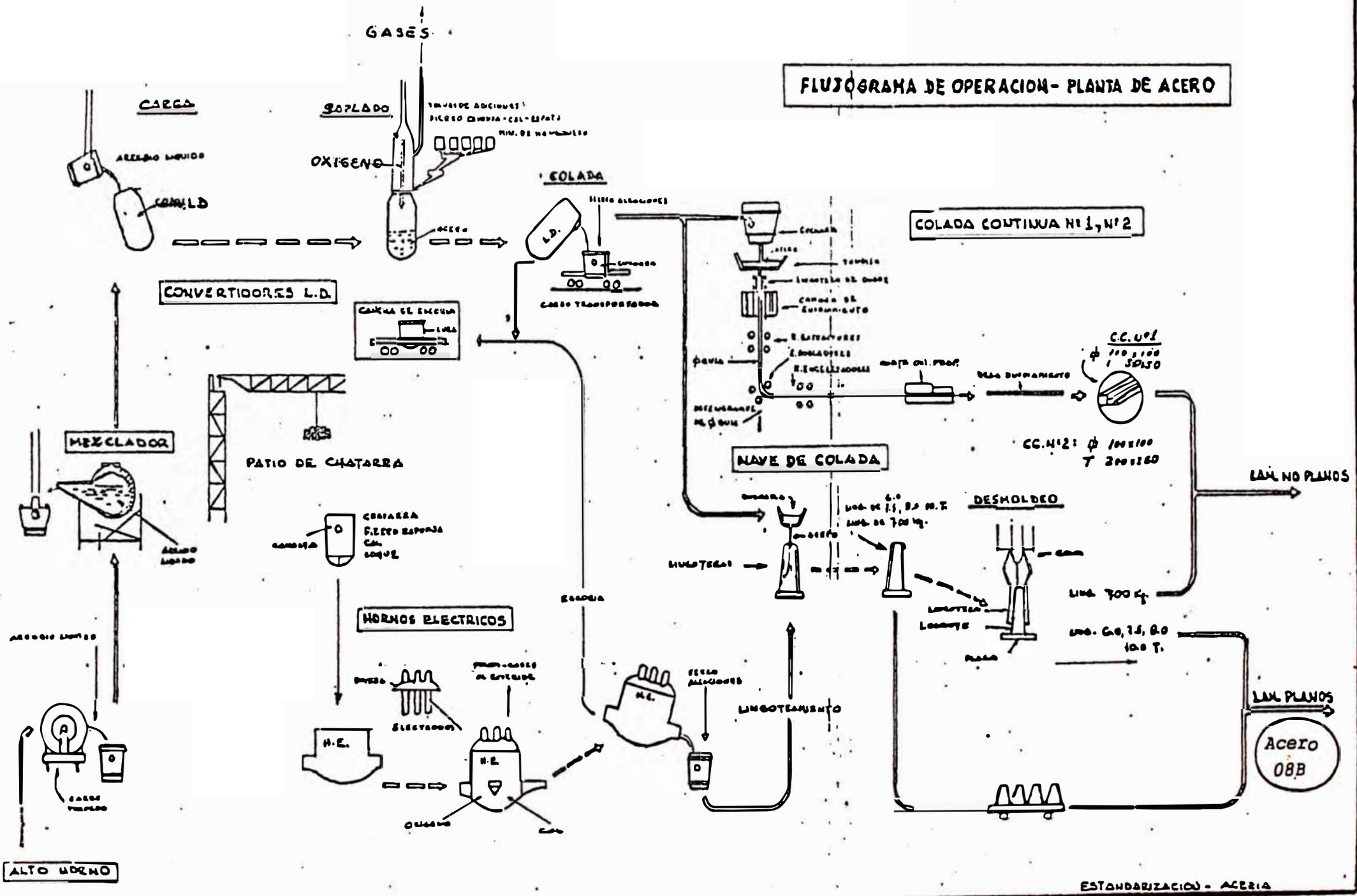
Sopladuras medianas y porosidades finas en la piel



Fotomacrografía No 2

Porosidades finas en la piel

FLUJOGRAMA DE OPERACION - PLANTA DE ACERO



FABRICACION DEL ACERO FERVESCENTE 08B

CAPITULO II

PROCESO DE FABRICACION DEL ACERO EFERVESCENTE OBB EN SIDERPERU

En Siderperú la fabricación del acero efervescente, calidad OBB se realiza mediante dos vías:

- Convertidor LD - Nave de Colada
- Horno Eléctrico - Nave de Colada

Ambos métodos orientados a lograr la especificación requerida de una composición final de :

% C	0.05 - 0.10	% Si.....	-	% S	0.045 máx.
% Mn	0.25 - 0.40	% P			0.040 máx.

Residuales en % máximos :

% Cu.....	0.18	% Ni.....	0.08	% Cr.....	0.08
% Sn.....	0.05	% Mo.....	0.040		

Una apreciación del camino que sigue el proceso de elaboración del acero OBB nos da la figura No. 1.

Después de su elaboración, los lingotes de acero son transportados a la planta de laminación planos. Los lingotes son laminados por dos caminos : Laminación Directa y Laminación Normal. Si el lingote tiene la composición y estructura adecuada es laminada directamente; en caso contrario, si el lingote tiene una composición dentro del rango exigido, pero presenta algunas deficiencias en su

estructura son transportados a la planta de laminación para su tratamiento preliminar en los hornos de foso a fin de que se regenere su estructura cristalina para su posterior laminación.

A continuación se detalla la práctica Standard de fabricación existente en SIDERPERU :

II.1 HORNO ELECTRICO - NAVE DE COLADA

2.1. Carga

La carga metálica es la necesaria para obtener el peso de acero líquido programado. La cal es agregada según requerimientos para obtener una basicidad de 1.5 a 2.0. El mineral de manganeso, si hace falta para cumplir con el % Mn mínimo.

2.2. Composición Química

La composición química preliminar debe estar con los rangos siguientes :

- El carbono a fin de fusión en 0.10 % mínimo.
- El carbono antes de colar, 0.05 - 0.08 %, en caso de estar por debajo de 0.05 % será necesario recarburar.
- El contenido de azufre antes de colar debe ser de 0.045 % máximo.
- En cuanto al FeO y Mn de colar deben ser:

% FeO 15.0 mínimo

% Mn \geq 0.08

2.3. Temperaturas

Los rangos de temperatura, tanto antes de colar

como en cuchara son:

Antes de colar	:	1610	-	1620	°C
En cuchara	:	1550	-	1560	°C

2.4. Afino

Se debe realizar un buen escoriado del baño y el afinado posterior se hace con el oxígeno y/o escamas de laminación.

En el caso de que el azufre sea mayor al especificado para el fin de fusión, se debe realizar la desulfuración, mediante el siguiente proceso :

- Evacuar la mayor parte de escoria del horno.
- Se prepara una mezcla reductora conteniendo proporcionalmente cal (300 Kgs), coque (50 Kgs), Ferrosilicio (50 Kgs), espato (30 Kgs) y se agrega al baño.
- Se pone arco para remover la mezcla en el baño y se eleva la temperatura a 1650 °C.
- Se evacúa la escoria y se toma muestra.
- Mientras el resultado es esperado se continúa agregando nueva mezcla reductora.
- Luego una oxidación del baño a fin de conseguir el óxido ferroso mínimo.

2.5. Condiciones de Cuchara

Debe estar caliente y sin fondo metálico. El diámetro de la tobera debe ser de 37 mm.

2.6. Tiempo de colada

El colado normalmente dura de 3' a 5', teniendo cuidado de vaciar el mínimo de escoria a la cuchara (máx., 500

kgs).

2.7. Adiciones a la Cuchara

Se agrega el coque si es necesario. El ferromanganeso es agregado entre $1/3$ y $2/3$ del nivel del acero en la cuchara. El aluminio es agregado en forma de barras, señalaremos que esta adición difiere en las acerías No. 1 y 2, dependiendo del nivel de oxidación del baño, y del contenido de carbono antes de colar.

TABLA No. 2

ADICIONES DE ALUMINIO A LA CUCHARA

ACERIA No. 1		ACERIA No. 2	
% Antes de Colar	Al kgs	%C antes de colar	Al kgs
0.05	3	0.05	7
0.06	2	0.06	6
0.07	1	0.07	4
0.08	0	0.08	3

Finalmente se cubre el acero con dos bolsas de aislante térmico.

En las operaciones de ~~h~~ave de colada se debe tener en cuenta que las lingoteras del tipo programado estén tibias y en buenas condiciones, usando los tubos y láminas de protección para la salpicaduras. El fluoruro de sodio NaF , se agrega para activar la efervescencia, en caso de ser lenta o retardada; las granallas de aluminio para lograr un tope sin ascenso ni descenso en caso de que se observe una efervescencia excesiva. Posteriormente se hace el tapado con.

placa y se agrega agua, cuando el anillo tenga un 1/3 máximo.

El movimiento de la plataforma con las lingoteras, se hace después de 30' del tapado del último lingote.

A continuación se muestran las descripciones técnicas de los componentes agregados a la cuchara para obtener el acero OBB.

ALUMINIO

Composición Química :

% Al	95-97.5	
% Cu	1.5	(Promedio)
% Zn	1.8	(")
% Mg	0.3	(")

Forma de Suministro :

Barra : 1 kg

Granalla: 1/8 a 3/8" (bolsas de 100 grs)

FERROMANGANESO STANDAR

Composición Química :

% Mn	76.4
% C	7.00
% S	0.016
% Si	0.94
% Fe	14.9

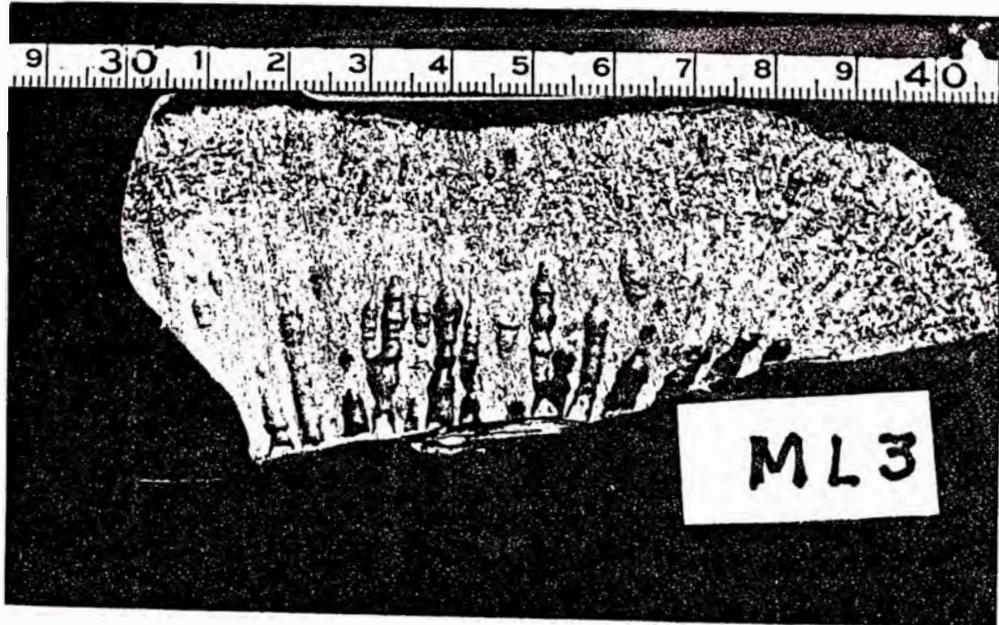
Granulometría :

Tamaño standar aceptable : 1" - 2 1/2"

COQUE (FINOS)

% M.V.	3.47
% CF	71.05

% S	0.40
Cenizas	...



Fotomacrografía No 3

Sopladuras medianas y porosidades finas en la piel

CAPITULO III

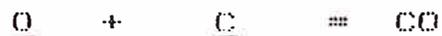
FUNDAMENTOS TERMODINAMICOS Y CINETICOS DE LA DESOXIDACION DEL ACERO

III.1 INTRODUCCION

Las condiciones oxidantes en las que se efectúa la fundición del acero, la presencia de las escorias oxidantes así como la interacción del metal con la atmósfera durante la sangría y colada, todo esto tomado en conjunto conlleva a que el oxígeno disuelto en el acero posee cierta actividad, con frecuencia elevada, en el momento de colar el acero.

La operación tecnológica que garantiza la disminución de la actividad del oxígeno hasta los límites necesarios se llama desoxidación. Si el acero desoxidado se solidifica en las lingoteras de manera tranquila y si casi no desprende gases, este acero lleva el nombre de CALMADO.

Si la desoxidación no se efectúa en el acero que se enfría lentamente en la lingotera, se verifica la reacción entre el oxígeno disuelto en el metal y el carbono:



(g)

Las burbujas de monóxido de carbono que se forma en este caso, se desprenden del lingote en cristalización. El metal en la lingotera se mezcla enérgicamente, su superficie se agita. Este acero se llama EFERVESCENTE.

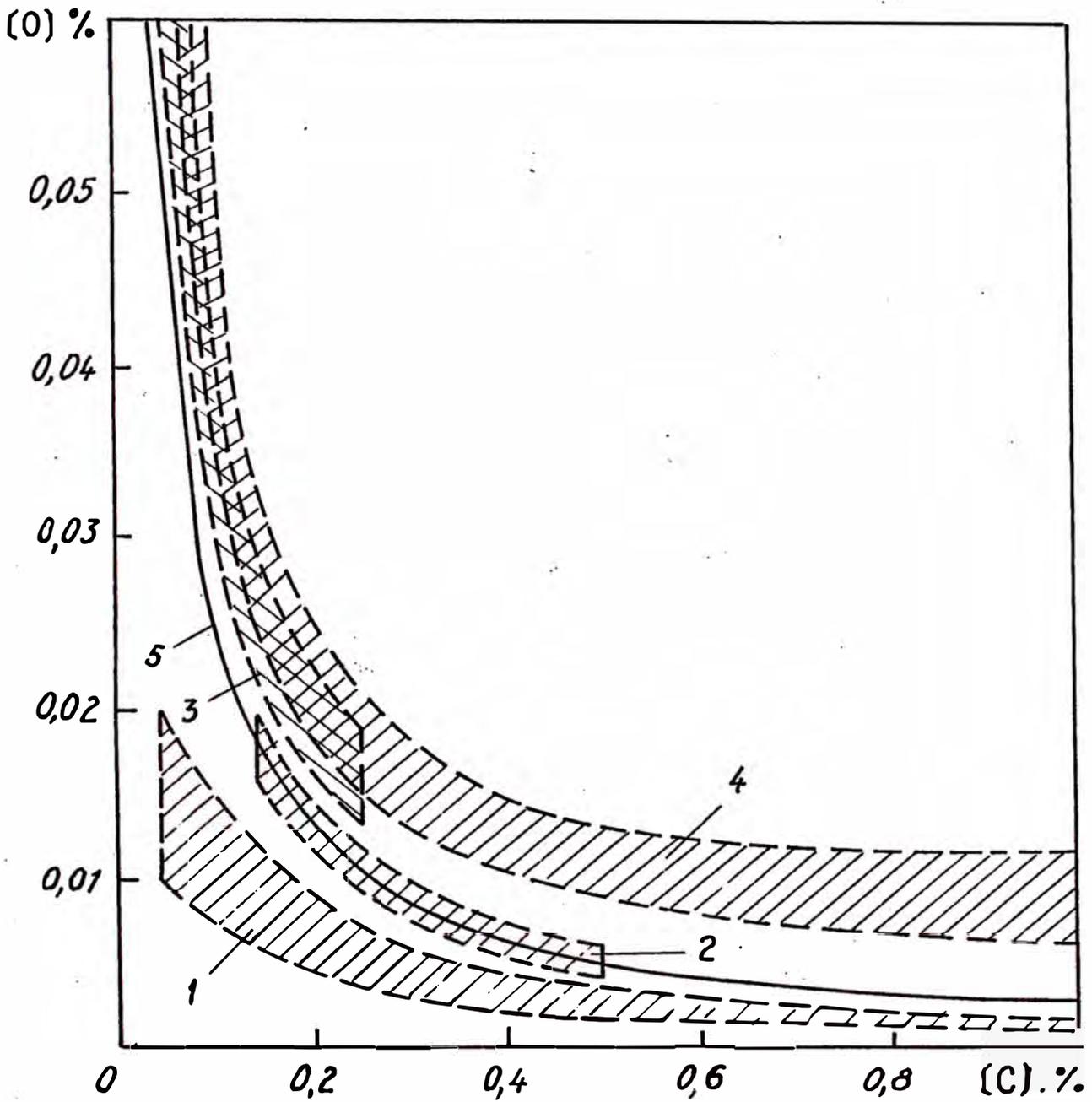
En la Figura No. 3, se aducen las curvas que reflejan los niveles de la oxidación del acero después de la oxidación. De acuerdo con este esquema la desoxidación del acero efervescente proporciona tan solo cierta disminución del contenido de oxígeno en el metal (nivel de oxidación queda mayor que el de equilibrio con el carbono); con mayor frecuencia ello se asegura introduciendo cierta cantidad de manganeso, (en ocasiones al metal también se le añade pequeñas cantidades de silicio y aluminio). Como regla el acero efervescente contiene de 0.3 a .4 % de manganeso. La desoxidación del acero semicalmado se asegura por la disminución del grado de oxidación hasta el nivel aproximadamente igual al de equilibrio con el carbono. Más frecuentemente esto se logra también introduciendo además del manganeso, cierta cantidad de silicio. El acero calmado por lo común tiene de 0.4 a 0.5 % de Mn y de 0.08 a 0.12 % de Si. Durante la desoxidación del acero calmado el nivel de oxidación del metal es considerablemente inferior al de equilibrio con el carbono.

Así pues, prácticamente todo el acero fundido se somete a la desoxidación en uno o otro grado; con ello la actividad de oxígeno disuelto en el metal se reduce hasta los límites requeridos.

La disminución de la actividad de oxígeno en el metal se puede conseguir por dos métodos:

- 1) Disminuyendo el contenido de oxígeno
- 2) Ligando el oxígeno en los compuestos estables.

FIGURA Nº 3



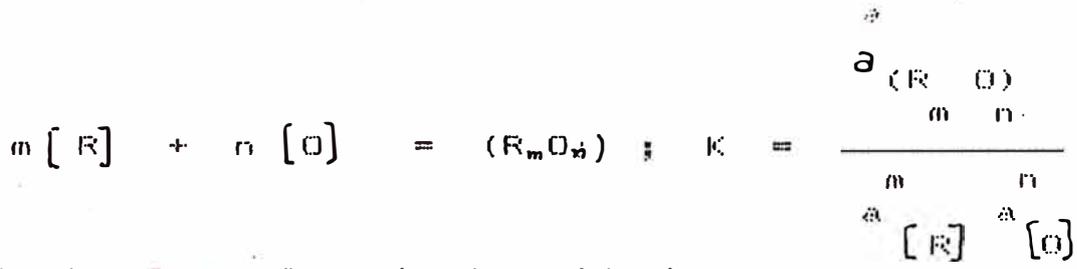
- 1.- A. CALMADOS
- 2.- A. SEMICALMADOS
- 3.- A. EFERVESCENTES

III.2 TERMODINAMICA DE LA DESOXIDACION DEL ACERO POR Al-Si-Mn

Este método consiste en que el oxígeno disuelto en el acero se hace pasar al óxido insoluble, introduciendo en el metal determinado elemento desoxidante. Este debe poseer mayor afinidad con el oxígeno que el hierro. Como resultado de la reacción se forma el óxido poco soluble en el metal cuya densidad es menor que la del acero.

El precipitado obtenido de esta manera asciende a la escoria. Con frecuencia este procedimiento también se llama profundo, ya que los desoxidantes se introducen en la profundidad del metal. Como desoxidantes se acostumbra utilizar el manganeso (como ferromanganeso), el silicio (como ferrosilicio), el Aluminio, etc.

La forma general de la reacción de desoxidación por precipitación se puede anotar de la siguiente manera:



Donde R = elemento desoxidante.

Por ser R y O muy pequeños, se establece que :

$$a_{[R]} \approx R \quad \text{y que} \quad a_{[O]} \approx O$$

Todas las reacciones transcurren con el desprendimiento de calor. Esto significa que a medida que baja la temperatura de acero las reacciones de desoxidación continúan y se forma cada vez mayor cantidad de óxidos a los que se le

da tiempo para emerger y evacuarse del metal. Este método de desoxidación no permite obtener el acero exento de las inclusiones no metálicas, en lo cual consiste su deficiencia. No obstante este procedimiento es de uso muy amplio por ser sencillo y barato.

Al añadir al metal un elemento desoxidante la actividad del oxígeno disuelto en el metal disminuye, el valor de la actividad del oxígeno, correspondiente a determinada concentración del elemento desoxidante con la que éste se encuentra en equilibrio con oxígeno a la temperatura dada, se llama poder desoxidante del elemento. Al variar la temperatura el poder desoxidante cambia a veces, muy considerablemente. La comparación del poder desoxidante de los elementos desoxidantes se realiza, por lo común a la temperatura de 1600°. Ver figura N°4. Los mejores resultados para este tipo de desoxidación se obtienen cuando el elemento desoxidante se disuelve rápidamente en el metal y los productos de la precipitación se separan rápidamente del metal para ser atrapados por la escoria. Deben cumplirse las siguientes condiciones :

- . La densidad del óxido que se forma debe ser lo más baja posible.
- . Es preferible que se forme un óxido líquido que adopte una forma globular que pueda ir creciendo en tamaño.
- . El óxido debe tener una baja temperatura de fusión.
- . La diferencia de tensión superficial entre el óxido y el metal debe ser máxima y las partículas deben tener el máximo

diámetro posible.

FIGURA N° 4

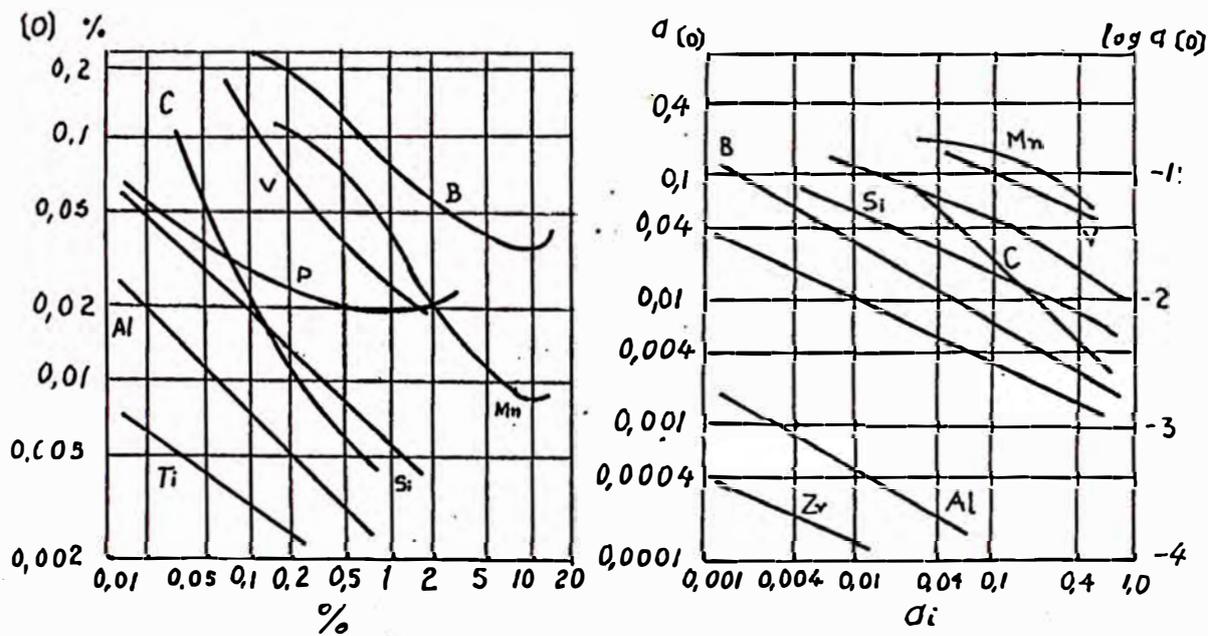
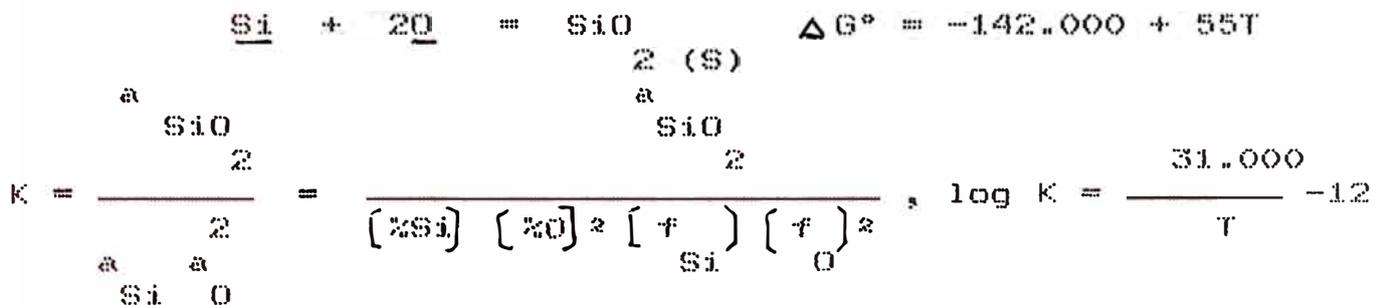


TABLA N° 3
PRODUCTOS DE DESOXIDACION

SUSTANCIA	T °C fusión	DENSIDAD gr/cc
FeO	1369	5.8
MnO	1785	5.4
SiO ₂	1713	2.5
Al ₂ O ₃	2053	4.0
Al ₂ O ₃ · SiO ₂	1545	3.05
MnO · SiO ₂	1200	4 - 5
Cr ₂ O ₃	2275	5.0
TiO ₂	1840	4.2
ZrO ₂	2700	5.75

2.1. Desoxidación con Silicio

Al introducir el silicio en el metal líquido, se forman los silicatos de hierro líquidos o la sílice.



Si la escoria está saturada de SiO₂, la $a_{\text{SiO}_2} = 1$.

si el Si y el oxígeno cumplen la ley de Henry:

$$K' = \frac{1}{[\%Si] [\%O]^2} \quad [\%Si] [\%O]^2 = 2.8 \times 10^{-5} \quad (T = 1600 \text{ } ^\circ\text{C})$$

La figura No. 4 muestra que el silicio es el desoxidante más fuerte que el manganeso. En la escoria básica, la SiO_2 formada después de la adición del silicio reacciona con los óxidos básicos de la escoria; al mismo tiempo que el valor de a_{SiO_2} se hace muy pequeño y, respectivamente, aumenta el poder desoxidante del silicio.

Si la a_{SiO_2} baja, es más fácil eliminar el oxígeno con el silicio. Si el metal desoxidado con silicio contiene cierta cantidad de manganeso, en la composición de los silicatos formados también habrá óxidos de manganeso, por ejemplo TEFROITA ($2\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$), cuya temperatura de fusión son pequeñas.

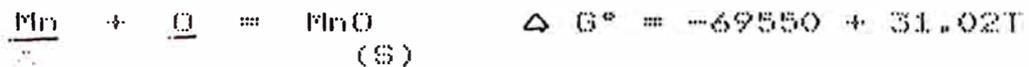
2.2. Desoxidación con Manganeso

El manganeso es un desoxidante relativamente débil y no garantiza la disminución del grado de oxidación hasta los límites necesarios, no obstante, mayor o menor cantidad de manganeso se agrega al metal durante la fabricación de muchas marcas de acero. Esto se explica por una serie de ventajas del manganeso:

- . Papel positivo en la lucha contra la acción nociva del azufre;
- . Influencia positiva sobre la capacidad de calcinarse el acero y sobre su resistencia;

Un valor pequeño de la tensión interfacial en el límite metal-inclusión de MnO formada, lo que facilita las condiciones para la separación de las inclusiones y aumenta la velocidad de desoxidación.

La reacción de desoxidación es la siguiente:



$$K = \frac{a_{\text{MnO (S)}}}{[\% \text{Mn}] [\% \text{O}] \left[f_{\text{Mn}} \right] \left[f_{\text{O}} \right]} ; K^* = [\% \text{Mn}] [\% \text{O}] = 0.046 \quad (T = 1600 \text{ }^\circ\text{C})$$

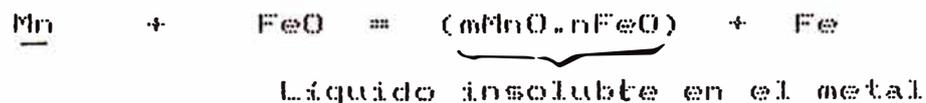
La constante de desoxidación K^* rige cuando el grado de oxidación del metal es bajo. Cuando es alto se considera:



donde :

$$K^* = \frac{a_{\text{MnO (l)}}}{[\% \text{Mn}] [\% \text{O}] \left[f_{\text{Mn}} \right] \left[f_{\text{O}} \right]}$$

Al introducir el manganeso en el hierro puro, pero que contiene oxígeno, se forma el óxido manganeso MnO, que crea con FeO una cadena ininterrumpida de las disoluciones: $m\text{FeO} \cdot n\text{MnO}$, según la reacción siguiente:



El manganeso se añade al metal al final de la hornada, con frecuencia en la cuchara, como ferromanganeso.

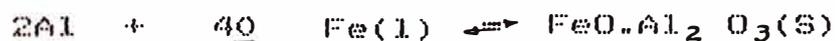
2.3. Desoxidación con Aluminio

El aluminio es un desoxidante más fuerte que el silicio. Si se introduce el aluminio, en el metal queda una cantidad ínfima de oxígeno disuelto. Cuando se introduce una cantidad excesiva, el aluminio puede reaccionar no sólo con el oxígeno disuelto en el metal, sino también con los óxidos de los desoxidantes más débiles (MnO , SiO_2).

Al añadir el aluminio al hierro que contiene oxígeno, el principal producto de reacción es la alúmina (Al_2O_3), pero bajo ciertas condiciones se puede formar Espinelas dobles $(Fe, Mn) Al_2O_4$, con composiciones variando desde la hercinita pura ($FeAl_2O_3$) hasta la galaxita pura ($MnAl_2O_4$).

Es decir, existe un valor crítico de oxígeno, $[%O]_{cr}$, para la transición alúmina-hercinita.

Cuando el oxígeno disuelto, $[%O]$, es mayor que el $[%O]_{cr}$ la hercinita será el producto estable; de acuerdo a la siguiente reacción de equilibrio:

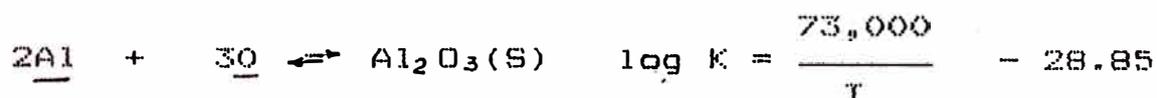


$$73.036$$

$$\log K = \frac{73.036}{T} - 23.96$$

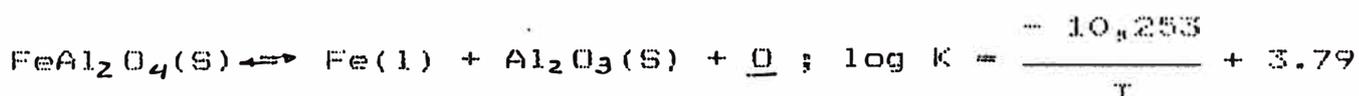
Esta reacción de equilibrio procede cuando el $[%O]$ es mayor que 0.06 (600 ppm) o cuando la cantidad de aluminio es muy pequeña, menor que 1 ppm. Esto para 1600 °C.

Cuando el producto de desoxidación es alúmina el equilibrio Al-O, está dado por:



Esta reacción ocurre cuando $[\%O] < [\%O]_{cr}$, o cuando $[\text{Al}] > 1 \text{ ppm}$; esto a 1600 °C. Podemos concluir respecto a este punto que cuando se agrega aluminio gradualmente a la cuchara, primero se formará hercinita y luego alúmina ya que el $[\%O]$ disminuye.

El valor crítico de oxígeno disuelto, para la transición alúmina/hercinita está dado por la ecuación de equilibrio.



Luego, cuando $[\%O] > [\%O]_{cr}$, la reacción tiende ir a la izquierda, donde la hercinita es el producto estable.

III.3. CINÉTICA DE LA DESOXIDACIÓN DEL ACERO

Mientras que las consideraciones sobre el equilibrio son importantes, el tipo y composición final de las inclusiones son muchas veces determinadas por los factores cinéticos como: nucleación de los productos de desoxidación, velocidad de desoxidación y precipitación de las inclusiones.

3.1. Nucleación de los productos de Desoxidación

Debido a la alta tensión interfacial entre el hierro líquido y inclusiones de óxidos y silicatos, una supersaturación de los reactantes en el metal como es establecido de la teoría de la nucleación homogénea. Por ejemplo, consideremos la desoxidación del acero por silicio y

manganeso produciendo un silicato de manganeso fundido de composición $MnSiO_3$:



La energía interfacial de el silicato líquido y el hierro líquido es del orden de 800 a 1000 ergs/cm² del cual el valor de la razón de supersaturación K_s/K es estimado a estar dentro del rango de 500 a 4000.

Ahora consideremos que el acero conteniendo inicialmente 0.05 % O va a ser desoxidado por adición de 0.43 %Mn y 0.10 % Si. A partir de datos de equilibrio los residuales siguientes son estimados a permanecer en la solución al final de la desoxidación a 1600 °C : 0.40 % Mn, 0.08 % Si y 0.017 % O . De estos valores

$$K_s = \frac{(\%Mn \times \%Si \times [\%O]^3)_S}{(\%Mn \times \%Si \times [\%O]^3)_e} = 34$$

Es obtenido para la supersaturación en el baño. Esto está muy por debajo de la supersaturación crítica de aproximadamente 500 necesitados para la nucleación espontánea del silicato de manganeso fundido. Es decir, la nucleación homogénea no es posible. Para la energía interfacial del sistema hierro líquido-Alúmina o Circonio es mucho más alta, es decir 1000 a 2000 ergs/cm²; la supersaturación necesaria para nucleación homogénea de alúmina o circonio es del orden de 10^6 a 10^{10} .

Para estimar la probable razón de supersaturación

bajo condiciones prácticas, solución homogénea de desoxidantes en el acero fue asumida. Sin embargo, la disolución de los desoxidantes agregados en el acero líquido toma una duración finita de tiempo por lo que es probable que ciertas regiones del baño serán muy ricas en concentración de soluto; en estas regiones la solución es suficientemente supersaturada para nucleación homogénea del producto de desoxidación. Debido a la agitación en la cuchara, el núcleo así formado es considerado a estar distribuido en el baño, rápidamente después de la adición de desoxidantes.

Otra fuente de nucleación es, por supuesto, el espesor de la capa en la superficie de la partícula del desoxidante sólido agregado al acero.

3.2. Velocidad de desoxidación, crecimiento y precipitación de inclusiones

Una apreciación generalmente aceptada es que las reacciones de desoxidación a temperaturas de elaboración de acero son relativamente rápidas a otros procesos de velocidad controlada, responsables del crecimiento y precipitación de inclusiones.

Este fenómeno de la velocidad en desoxidación es compleja, debido a los efectos de lado causados por el interjuego de diversas variables, lo cual no puede rápidamente ser consideradas por una simulación matemática, de el proceso de desoxidación. Sin embargo ciertas deducciones importantes puede ser hechas de los resultados de diversos análisis conceptuales basados en modelos simplificados y esos de

observaciones experimentales.

1. El número de núcleos formados en el tiempo de adición de desoxidantes es del orden de $Z = 10^7 / \text{cm}^3$ ó más.
2. La difusión controlada de la reacción de desoxidación es esencialmente completa dentro de unos cuantos segundos cuando $Z = 10^6 / \text{cm}^3$.
3. La reacción de desoxidación puede cesar prematuramente en partes de el acero disminuido de núcleos o inclusiones de óxidos.
4. El tamaño de la inclusión durante la desoxidación está en el rango de 1 a 40 μm .
5. En experimentos de laboratorio con baños movidos inductivamente (5 cm profundidad) la mayoría de inclusiones (óxidos) flotaron fuera del baño en 5 a 10 minutos.
6. El crecimiento por colisión y coalescencia de inclusiones ascendentes no parecen posibles bajo las condiciones de experimentos de laboratorio con baños inmóviles o moderadamente movibles.

Estas observaciones no son mutuamente consistentes. Una posible explicación es tal vez que los núcleos formados en el tiempo de la disolución del desoxidante son desigualmente distribuidos en el acero.

Bajo condiciones prácticas de desoxidación durante el llenado a la cuchara, hay suficiente movimiento que el crecimiento de algunas inclusiones puede tomar lugar por colisión y coalescencia; también el movimiento podría

pegarse a la superficie del retractario de la cuchara o ser cogidas por la capa de escoria.

Otro intrincado aspecto del crecimiento de inclusiones es la formación de "racimos" de alúmina. Algunos lingotes de acero calmado con aluminio contienen grandes "racimos" de cristales de alúmina en una forma dendrítica; también la obstrucción de la buza del tundish por "racimos" de alúmina es frecuentemente experimentado en colada continua.

Es claro, de esta breve revisión que el crecimiento de inclusiones y su separación de el acero líquido es un proceso complejo.

3.3. Reoxidación del Acero

Como el acero desoxidado es vaciado de la cuchara al tundish o al molde, la reoxidación del acero por estar expuesto al aire es inminente. La cantidad adicional estimada de óxidos formados estuvieron en el rango de 1 a 4 kgs por tonelada.

La cantidad de oxígeno captado es difícil de estimar; esto depende mucho de las condiciones de flujo y del tipo de colado practicado.

3.4. Reacciones durante la solidificación del acero

Oxígeno y azufre en el acero son los únicos elementos que pueden reaccionar con los otros solutos cuando sus concentraciones llegan a ser suficientemente altos en el enriquecido líquido interdendrítico durante la solidificación.

Cuando el contenido de carbón de el líquido interdendrítico es alto, reaccionará con el oxígeno formando monóxido de carbono. Similarmente, en concentraciones altos de hidrógeno y nitrógeno en el líquido enriquecido habrá evolución de gas.

Las reacciones durante la solidificación incluye la formación de inclusiones de sulfuros. Asumiendo que no hay partículas de escoria atrapadas en la corriente del acero líquido, las inclusiones de sulfuros o oxisulfuros encontrados en el lingote se debe únicamente por la ocurrencia de reacciones en el líquido interdendrítico en la última etapa de solidificación.

CAPITULO IV

CALCULO DE LAS ADICIONES EN CUCHARA PARA LA OBTENCION DEL ACERO O8B

IV.1. CONDICIONES DE EQUILIBRIO DEL BAÑO - ESCORIA

En la desoxidación del acero líquido por Al-Mn, los productos de desoxidación son: FeO, MnO y Al₂O₃, de acuerdo a las siguientes reacciones:



A la temperatura promedio de cuchara: T = 1555°C (1828°K)

Se obtiene:

$$K_{\text{Fe}} = 6.2209 \quad K_{\text{Mn}} = 26.4875 \quad K_{\text{Al}} = 1.2144 \times 10^4$$

IV.2. CALCULO DE LA ADICION DE DESOXIDANTES

Siendo ΔO la cantidad de oxígeno que se desea eliminar, para la obtención de un acero de determinada composición, las proporciones de este oxígeno eliminadas por el ferromanganeso y aluminio serán:

$$\Delta O = \Delta O_{\text{Fe}} + \Delta O_{\text{Mn}} + \Delta O_{\text{Al}}$$

Siendo Mn_f el contenido de Mn final del baño y Mn_i su contenido inicial, la cantidad de manganeso que se adicionará, será de :

$$\text{Mn} = \text{Mn}_f - \text{Mn}_i + \text{Mn}_e$$

La adición de ferromanganeso, entonces será :

$$\text{Fe Mn} = \frac{\text{Mn f} - \text{Mni} + \text{Mne}}{0.76 \times R} ; \quad R = \text{Rendimiento del ferromanganeso}$$

Considerando que, prácticamente la totalidad de aluminio adicionado va a la escoria y si éste tiene 100 % deberá ser:

$$\text{PAI} = \frac{54}{48} \cdot \Delta \text{OAl}$$

Para obtener un acero de 0.08 % C al que le corresponda un Of = 350 ppm., 0.33 % Mn y Al = 1.2. ppm.

Se determinó los siguientes valores:

Para la Acacia No. 01

$$\text{Mne} = 1.3556 \cdot \Delta \text{O}$$

$$\text{PAI} = 0.49912 \cdot \Delta \text{O}$$

Para la Acacia No. 2

$$\text{Mne} = 1.1458 \Delta \text{O}$$

$$\text{PAI} = 0.6058 \Delta \text{O}$$

Ejemplo del Cálculo

Para un acero (antes de colar) 0.06 % C y 0.10 % Mn, el contenido de oxígeno promedio es (Celo x II), 551 ppm.

$$\text{Luego: } \Delta \text{O} = \text{Oi} - \text{Of} = 551 - 350 = 201 \text{ ppm.}$$

$$\text{Es decir: } \Delta \text{O} = 0.201 \text{ Kg/Ton}$$

a) Manganeso que va a la escoria :

$$\text{Mne} = 1.3556 \times 0.201 = 0.2725 \text{ Kg/Ton}$$

b) Ferromanganeso empleado : (colada de 30 Ton.)

$$\text{FeMn} = \frac{3.3 - 1 + 0.2725}{0.76 \times 0.609} \times 30 = 167 \text{ Kg.}$$

c) Aluminio empleado:

$$\text{PAI} = 0.49912 \times 0.201 \times 30 = 3 \text{ Kg}$$

Después de realizar cálculos de este tipo, para baños de

acero de diferente composición, se elaboró las siguientes tablas de adiciones en cuchara.

% C A.C.	% Mn A.C.	Fe Mn Kgs	Al Kgs
.05	0.06	203	4.8
	0.08	190	
	0.10	177	
	0.12	165	
	0.14	152	
	0.16	139	
	0.18	126	
	0.20	113	
.06	0.06	193	3.0
	0.08	180	
	0.10	167	
	0.12	154	
	0.14	141	
	0.16	128	
	0.18	115	
	0.20	102	
.07	0.06	185	1.7
	0.08	172	
	0.10	159	
	0.12	146	
	0.14	133	
	0.16	120	
	0.18	107	
	0.20	94	
.08	0.06	180	
	0.08	166	
	0.10	154	
	0.12	141	
	0.14	128	
	0.16	115	
	0.18	102	
	0.20	89	

Hornos Eléctricos 1 y 2

% C A.C.	% Mn A.C.	Fe Mn Kgs	Al Kg
.05	0.06	240	8.6
	0.08	226	
	0.10	210	
	0.12	197	
	0.14	181	
	0.16	166	
	0.18	152	
	0.20	137	
.06	0.06	228	5.9
	0.08	213	
	0.10	198	
	0.12	184	
	0.14	169	
	0.16	154	
	0.18	139	
	0.20	124	
.07	0.06	220	4.0
	0.08	205	
	0.10	190	
	0.12	175	
	0.14	160	
	0.16	145	
	0.18	130	
	0.20	116	
.08	0.06	213	2.7
	0.08	198	
	0.10	184	
	0.12	169	
	0.14	154	
	0.16	139	
	0.18	124	
	0.20	109	

Hornos Eléctricos 5 y 6

CONCLUSIONES

1. El consumo de los desoxidantes en los Hornos Eléctricos No. 1 y 2, es menor que en los hornos No. 5 y 6 (Ver Gráficos No. 7 y 8), como consecuencia de tener un baño de acero menos oxidado.
2. Son varios los factores que gobiernan el proceso de desoxidación del acero efervescente que no han sido tomados en consideración; uno de ellos, es la disminución de O, debido al enfriamiento del acero en la cuchara, lo que da lugar a que aumente la formación de Mn O y Al₂O₃, habiendo como consecuencia una ligera variación con los resultados obtenidos en cuanto al consumo de desoxidantes.
3. Del estudio realizado se tiene que: el contenido del oxígeno en el baño, es función del % C, % Mn y la temperatura.
4. Las acerías No. 1 y 2, tienen sus particularidades de operación, por lo que, tanto en el horno como en cuchara al acero, se les debe dar los tratamientos más adecuados en cada caso.

RECOMENDACIONES

1. Se debe dar más apoyo al Departamento de Investigaciones, con el objeto de mejorar los procesos de fabricación.
2. Se debe evitar, eotar con exceso de escoria a la cuchara, ya que ello reoxida al baño, bajando el rendimiento de las

ferroaleaciones adicionadas.

3. Mejorar los tiempos de reporte de los análisis del Laboratorio Químico, para evitar la puegta de arco eléctrico más de 3 minutos, ya que con ello se altera la composición química del baño, siendo tales reportes no representativos.
4. En las caladas con efervescencia anormal, disificar mejor el uso de granallas de aluminio y/o fluoruro de sodio, de tal modo que se logre activar o desactivar la efervescencia, según lo requerido.

BIBLIOGRAFIA

1. Joao Luis Rezende Pimenta, Marcos José Mundim.
"Desoxidacao do aco efervescente por Al - Mn"
Metalurgia ABM. Vol 30. No. 201 Agosto 1974
2. V.A. Kudrin.
"Metalurgia del acero"
Editorial MIR Moscú
3. AIME.
"Bof steelmaking" Volume two theory.
American Institute of Mining, Metallurgical.
4. Debabrata Sukumar Ghosh.
"Termodinámica de la desoxidación del acero por
aluminio"
Metalurgia ABM. Vol 37. No. 284. Julio 1981

RELACION: %C - A(0) PPM

ANTES DE COLAR. ACERIA: N° 1

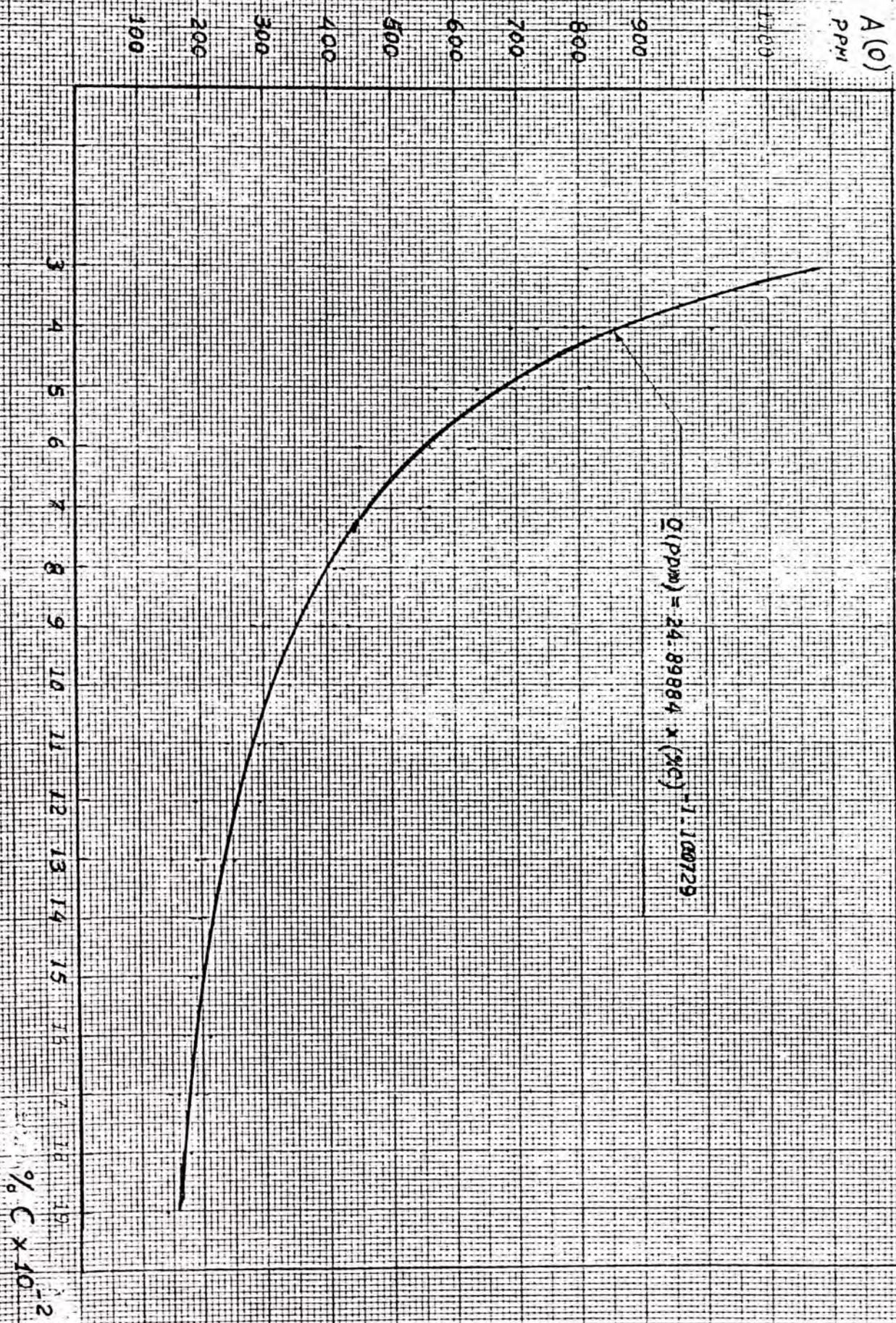


FIGURA N° 7

ADICION DE FERROMANGANESO (CUCHARA)

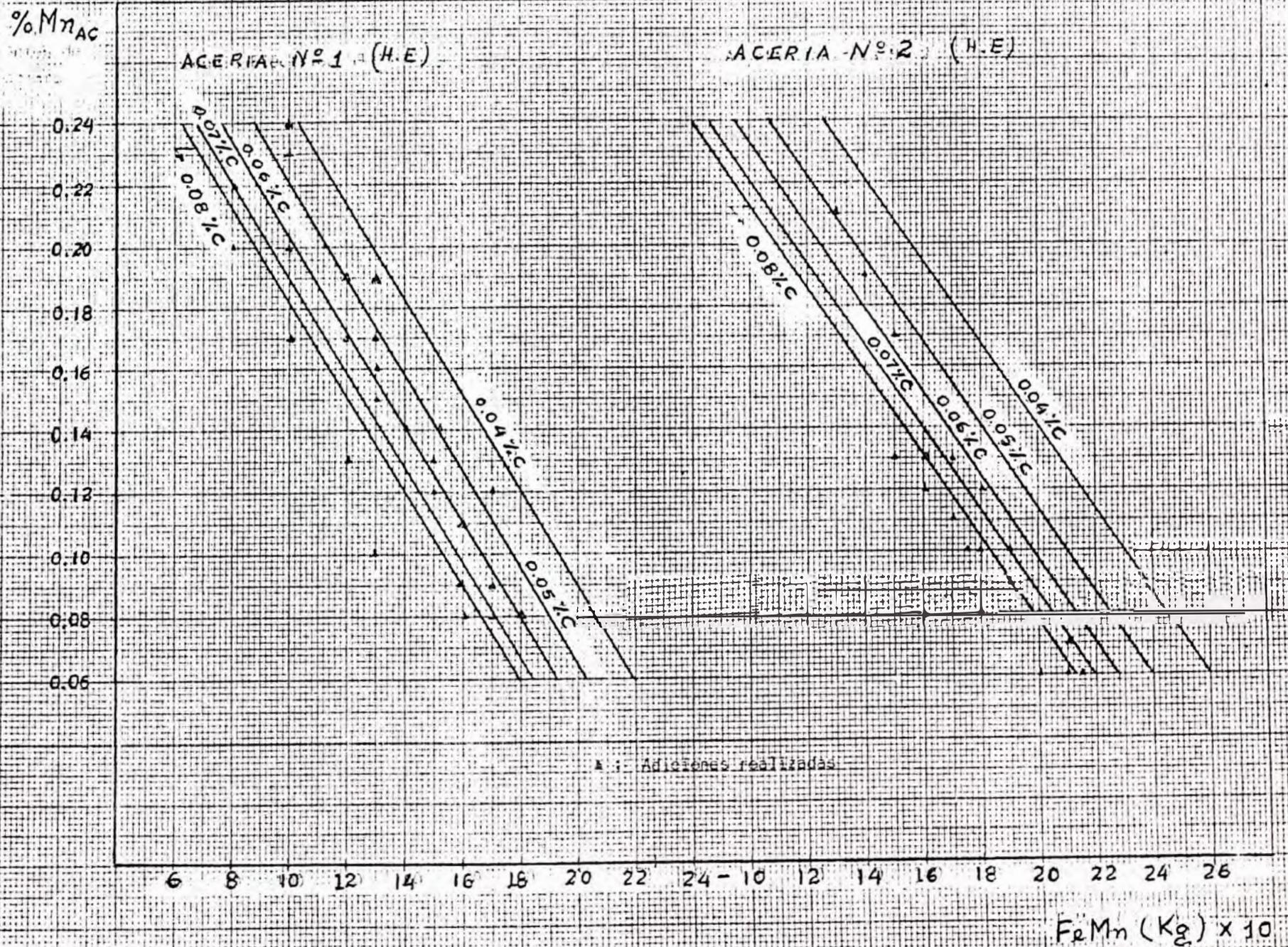
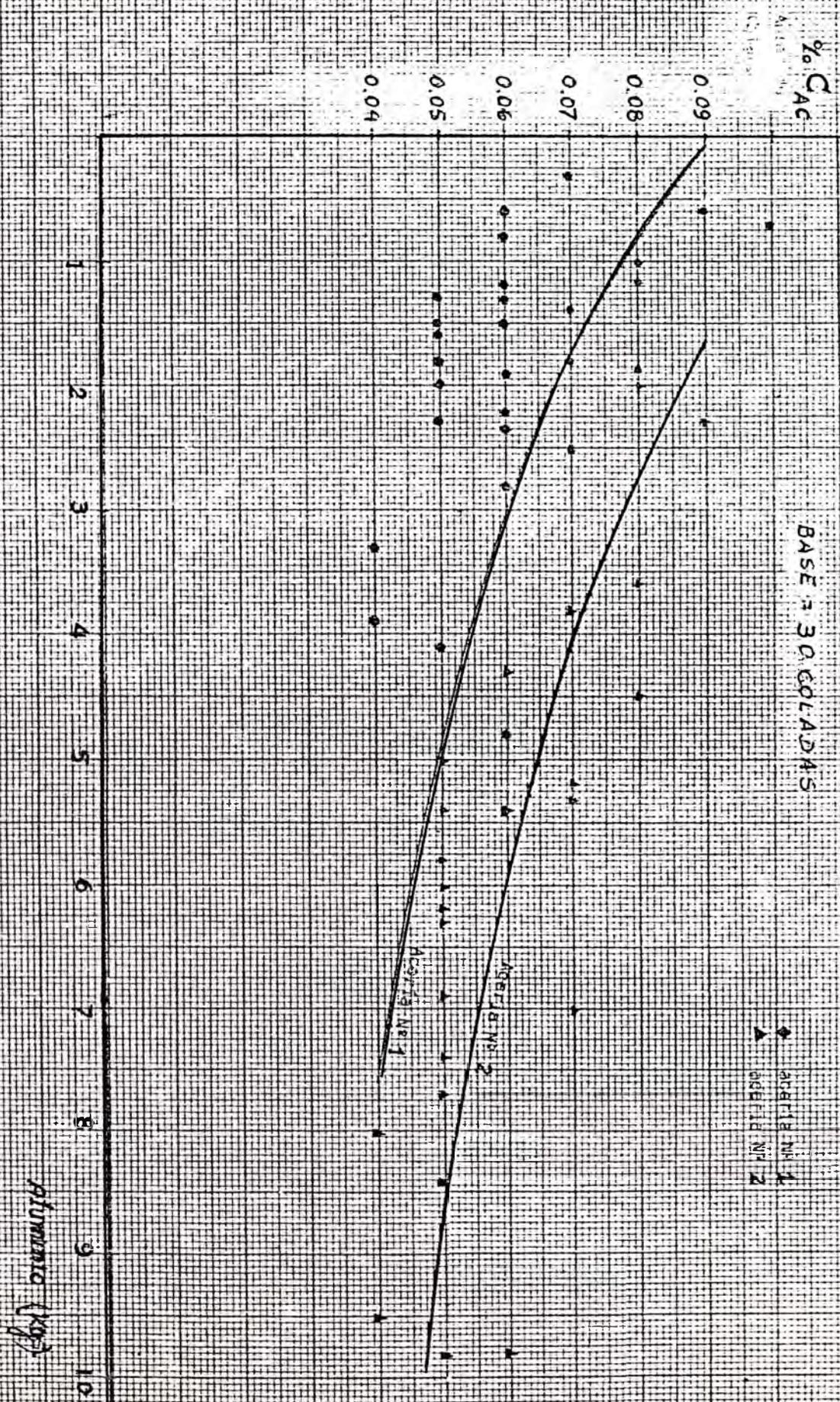


FIGURA Nº 8
 ADICIONES DE ALUMINIO - REALES (KUCCHARA)

BASE = 30 GOLLADAS



Aluminio (kg)