

T
669.142
SAN

ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA DEL LITORAL

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

"Estudio de la Elaboracion de Acero en un
Convertidor LD"

TESIS DE GRADO

Previa a la obtencion del Titulo de:

INGENIERO MECANICO

Presentada por:

GONZALO SANCHEZ LEON

GUAYAQUIL - ECUADOR
1982

A G R A D E C I M I E N T O

Al Ing. IGNACIO WIESNER, Di
rector de Tesis, por su ayu
da y colaboración para la
realización de este trabajo.

A handwritten signature in dark ink, appearing to read 'Ignacio Wiesner', is written over a horizontal dotted line. The signature is stylized and cursive.

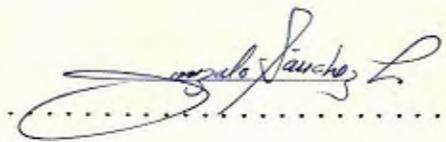
ING. IGNACIO WIESNER

Director de Tesis

DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestas en esta tesis, me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Exámenes y Títulos profesionales de la
ESPOL).

A handwritten signature in dark ink, appearing to read "Gonzalo Sanchez Leon", written over a horizontal dotted line.

GONZALO R. SANCHEZ LEON

RESUMEN

El proceso se lleva a cabo en un recipiente con revestimiento básico de forma similar a un convertidor Thomas, pero sin toberas en el fondo.

La operación es relativamente sencilla. Comienza inclinando el aparato para recibir el arrabio. Después se introduce la cal o caliza y se coloca una lanza de oxígeno vertical refrigerada por agua. Esta consiste de tres tubos concéntricos; por el del centro circula el oxígeno y por los dos restantes el agua. En su extremo inferior lleva una boquilla con agujeros dispuestos a 60° con una inclinación de 15° respecto a la vertical.

Colocando la lanza a distancia apropiada del nivel del baño se procede a soplar el oxígeno a una presión de 40 psi. Durante los primeros minutos del proceso se observa la presencia de llamas y humos espesos. Luego las llamas cambian de color haciéndose más brillantes hasta el momento en que se produce un descenso de la misma en la boca del convertidor. En este instante el contenido de carbono es de 0.05% habiéndose consumido 6 m^3 de oxígeno comercial. A continuación se agregan las ferroaleaciones y aluminio para desoxidar el material. Finalmente se bascula y se procede a colar.

INDICE GENERAL

	Pág.
Resumen	II
Indice General	III
Indice de Figuras	IV
 CAPITULO I	
Introducción	1
 CAPITULO II	
Importancia del proceso LD	3
2.1. Generalidades	3
2.2. Proyecciones	18
2.3. Ventajas	24
 CAPITULO III	
Principios Físicos Químicos	27
3.1. Introducción	27
3.2. Reacciones de Oxidación-Reducción	39
3.2.1 Ajuste de Ecuaciones	49
3.2.2 Oxidantes y Reductores	54
3.3. Proceso de la conversión	55
3.3.1 Composición de la fundición base	58
3.3.2 El Convertidor	60
a).- Control de Temperatura.	67
b).- Caudal de oxígeno	70

	Pág.
3.4 Evolución del baño durante el soplado	73
3.4.1 Silicio	73
3.4.2 Carbono	73
3.4.3 Fósforo	82
3.4.4 Manganeso	85
3.4.5 Azufre	85
3.4.6 Escoria	89
3.5 Refractarios	95
3.5.1 Magnesita	96
3.5.2 Dolomita	97
3.6 Control Metalúrgico	103
3.6.1 Análisis químico.	104
3.6.2 Efecto de Impurezas	106

CAPITULO IV

TRABAJO EXPERIMENTAL

4.1 Introducción	108
4.2 Elaboración de la fundición base	122
4.2.1 Selección de materias primas	124
4.2.2 Cálculo de cargas para cubilote	125
4.2.3 Control de composición química	126
4.2.4 Aceración	127
4.2.5 Desoxidación	128
4.3 Muestreo para ensayos de laboratorio	129
4.4 Control de calidad	140

	Pág.
4.4.1 Análisis químico	144
4.4.2 Ensayo de dureza	144
4.4.3 Microscopía	145
4.4.4 Ensayo mecánico sin tratamiento térmico .	146
4.4.5 Ensayo mecánico con tratamiento térmico ..	155
CAPITULO V	
DISCUSION DE LOS RESULTADOS	156
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	168
APENDICE	
BIBLIOGRAFIA	

IV

INDICE DE FIGURAS

N°	<u>T I T U L O</u>	Pág.
1	Croquis de un convertidor LD	11
2	Proceso KALDO	12
3	Fenómenos mecánicos durante el soplado de un baño con un chorro de gas	14
4	Cambio en la fabricación de acero en Ale- mania	20
5	Representación estadística de composición y propiedades de chapas de acero efervesce <u>n</u> te para embutición profunda	22
6	Composición y Propiedades de la producción de chapas de acero calmado L-D para embuti <u>i</u> ción profunda	23
7	Efecto de la temperatura sobre el equilibrio entre monóxido, dióxido de carbono y oxígeno en hierro líquido	41
8	Variación con la temperatura del equilibrio entre hidrógeno y oxígeno en hierro líquido. . .	42
9	Variación con la temperatura del equilibrio entre monóxido, dióxido de carbono y carbón re en hierro líquido	45

N°	<u>T I T U L O</u>	Pág
10	Comparación de los valores de la constante de equilibrio para la reacción entre carbón y oxígeno en hierro líquido.	46
11	Curva carbono vs. consumo por tonelada de oxígeno	57
12	Planta L D de 275 Toneladas	62
13	Partes importantes de una planta L D	63
14	Corte transversal de un convertidor de 300 toneladas mostrando el revestimiento de ladrillos de magnesita	65
15	Convertidor de 350 toneladas en BRUCKHAUSEN Thussen Hütte	68
16	Convertidor LD (LACKAWANNA).	69
17	Remoción de elementos en el proceso L D	72
18	Remoción de Silicio durante el tiempo de soplado	74
19	Semejanza entre los procesos LD y OLP durante la descarburización	76
20	Remoción del carbono durante el tiempo de soplado	77
21	Representación esquemática de la rapidez de escarburización en el proceso LD	79
22	Típica curva de la tasa de descarburización	79

Nº	<u>TITULO</u>	Pág.
23	Relación entre el contenido de <u>car</u> bono y oxígeno entre el horno <u>Mar</u> tin y acero al oxígeno	81
24	Remoción de fósforo durante el <u>tiem</u> po de soplado	84
25	Remoción de Manganeso durante el tiempo de soplado	86
26	Remoción de Azufre durante el <u>tiem</u> po de soplado	88
27	Cubilote de 50 cm. de diámetro <u>in</u> terior	110
28	Esquema de lanza de oxígeno	112
29	Lanza de oxígeno construída, <u>refri</u> gerada por agua	113
30	Convertidor experimental de 100 Kg. de capacidad	114
31	Botellas de oxígeno comercial	118
32	Moldes para muestreo	119
33	Colocación de arrabio en el <u>conver</u> tidor	121
34	Barras para ensayo de doblado	129
35	Obtención de muestras	131
36	Colado de piezas	132

N°	<u>T I T U L O</u>	Pág.
37	Influencia del oxígeno en e- acero	133
38	Preparación de la lanza de oxígeno	137
39	Inicio de la inyección de oxígeno	140
40	Incremento de la llama y cambio de coloración de los humos	141
41	Descenso de la llama en la boca del convertidor	142
42	Microestructura del metal obtenido en la 2da. experiencia (100 aumentos)	146
43	Microestructura del metal obtenido en la 2da. experiencia (200 aumentos)	147
44	Microestructura del metal obtenido en la 3ra. experiencia (200 aumentos). . . .	148
45	Microestructura del material de parti da correspondiente a la 4ta. experien cia (100 aumentos).	149
46	Microestructura del acero obtenido en la 4ta. experiencia (100 aumentos)	150
47	Microestructura del acero obtenido en la 4ta. experiencia (200 aumentos)	151
48	Microestructura del acero obtenido en la 4ta. experiencia (100 aumentos)	152
49	Curvas correspondientes a los ensayos de tracción	154

Nº	TITULO	Pág.
50	Microestructura del acero obtenido en la cuarta experiencia (100 aumentos) tal como sale del convertidor.	165
51	El mismo material de la figura 50 a 200 aumentos.	166
52	Acero obtenido pero con tratamiento térmico de recocido a 1000°C. durante tres horas y enfriamiento en el horno.	167

INDICE DE TABLAS

Nº	<u>T I T U L O</u>	Pág.
I	Afinidad del oxígeno para los elementos a eliminar	51
II	Resultados de los análisis químicos de las experiencias realizadas	143
III	Ensayos de dureza	144
IV	Ensayos de tracción	155

S I M B O L O G I A

A, a	Area, actividad.
atm	atmósfera
BOF	Horno básico al oxígeno
BOS	Acero al oxígeno
C	Carbono
$^{\circ}\text{C}$	Grados centígrados
C_f, C_i	Calor másico final, calor másico inicial
Ca	Calcio
CFM	Pie cúbico por minuto
cm	Centímetro
D, D_I	Diámetro del convertidor
d	densidad
dm	decímetro.
f, f_o	Fugacidad, fugacidad en estado de referencia.
Fe	Hierro
g	gas.
G	Energía libre.
gr.	gramo
H	Entalpía
h, h' , h_I	Altura del convertidor, altura del nivel de baño, altura de tronco de cono.
J	Jouls.

CAPITULO I

I N T R O D U C C I O N

Se reconoce mundialmente al acero como el material que implica desarrollo industrial de los pueblos: como tal es importante el hecho de que se conozcan las tecnologías de su fabricación, para productos terminados y semielaborados, tales como, piezas moldeadas para repuestos de maquinaria industrial y palanquillas para manufacturas de acero industrial.

El creciente desarrollo tecnológico e industrial y la disponibilidad de materias primas han sido las razones decisivas para el desarrollo de nuevos procedimientos de fabricación de acero o para mejorar los ya existentes.

En el Ecuador existe solo una fábrica dedicada a la fabricación de palanquilla, "FUNASA", con una producción anual alrededor de 30.000 Ton. usando la técnica de horno eléctrico básico y tiene comprometida toda su producción para abastecer 1/3 de la capacidad de laminación de "ANDEC".

La demanda de piezas moldeadas de acero de empresas dedicadas a la fabricación de cemento, ingenios azucareros y otras no están atendidas por ninguna industria de fundición. Una de las causas por lo cual ocurre -

esto es el costo inicial de los hornos eléctricos de inducción o de arco con los que se podría suplir esta necesidad. Otro factor que se asocia en forma directa es la deficiencia tecnológica en el campo de acería en las fundiciones existentes.

Frente a estas circunstancias la producción de acero moldeado a partir de convertidores LD representa una solución técnica y económica de soprendentes ventajas.

Se demuestra en esta tesis que usando arrabio de cubilote de composición normal para piezas de hierro gris, bajos en carbono y Silicio, se puede fabricar acero con un contenido de carbono totalmente bajo usando la técnica LD (Linz Donawitz).

CAPITULO II

IMPORTANCIA DEL PROCESO LD

2.1 GENERALIDADES

Los aceros se obtienen a partir de arrabios blancos denominados arrabios de afino. Estos arrabios contienen siempre más de 2.5% de carbono y como que los aceros ordinarios contienen menos del 1.4%, la obtención de un acero a partir de un arrabio consiste, pues, esencialmente en la eliminación de una gran parte de su carbono. Esta eliminación se realiza por una oxidación, en la que el carbono se transforma en óxido de carbono y en gas carbónico.

Es evidente que la acción del oxígeno no se ejerce únicamente sobre el carbono; algunos constituyentes del arrabio: Manganeso, Silicio, fósforo y azufre también se oxidan y se eliminan en parte o por completo.

Finalmente, también el hierro se oxida parcialmente; pero esta oxidación es indeseable, ya que se reduce el rendimiento de la operación, además, la presencia de óxido de hierro en un acero disminuye sus propiedades mecánicas. Así, pues, es necesario preveer, después de las oxidaciones iniciales, una reducción del óxido de

calidad. A esto se añade la demanda de acero agravándose los problemas en cuanto a chatarra y combustible, disminuyendo además los suministros de mineral de bajo y medio fósforo.

Como es sabido los factores que afectan la calidad de los aceros son el elevado contenido en nitrógeno y, en menor grado, el contenido de fósforo. Esto condujo a experimentos para disminuir la absorción de nitrógeno acortando el tiempo de contacto entre el aire y el metal, haciendo que el baño fuese de poca profundidad y aumentando la superficie de las toberas. Así mismo se efectuaron adiciones refrigerantes de chatarra, piedra caliza y mineral, o mezclas de éstos, ya que se observó que el nitrógeno aumentaba con las temperaturas más altas del baño final. Dichos métodos tuvieron algún efecto sobre el contenido de nitrógeno, reduciendo la cantidad, aunque no eran comparables con las cifras del Martin - Siemens.

Luego de probar con viento enriquecido con oxígeno y con mezclas de éste y vapor de agua, o ácido carbónico, tampoco se consiguió una mejora apreciable de la calidad ya que los dos últimos consumen una gran cantidad de calorías en la fusión de la chatarra, y no en las reacciones parcialmente endotérmicas de las nuevas sustancias que acompañan al oxígeno.

Sumado a todo esto la gran demanda de mejores y mayores cantidades de acero, factor predominante en el desarrollo de los pueblos, surgió en

Austria un nuevo proceso de fabricación de acero que consistía en inyectar oxígeno casi puro, directamente sobre la superficie del baño metálico.

Aunque no se niega que la revolución de la fabricación del acero del siglo XX empezó en Linz en Austria, y que fue adoptado casi al mismo tiempo en Donawitz, que también formó parte de la Vereinigte Osterreichische Eisen - Und Stahl Werke AG (VOEST), el significado de la contracción LD ha sido muy cuestionado. Se ha sugerido tal vez graciosamente, la exhibición del LD por Linz-Duseverfahren - el proceso de boquilla de Linz, aunque hay quienes lo atribuyen a Linz-Donawitz.

En Europa occidental, Japón y en algunos otros países, el nombre más usado es el LD, pero en otras partes del mundo el convertidor tiene difrentes designaciones. En los Estados Unidos frecuentemente se refieren a BOF (hornos básicos al oxígeno), mientras en UK se lo llama también - convertidor LD o BOS (acero básico al oxígeno). A menos que las circunstancias demanden de otro modo, nos referiremos en adelante como LD.

El origen exacto de los procesos no están claros, pero es interesante - anotar que H.F de Linz, en la introducción de "Tres años del acero LD Voest 1953, 1956, que se refiere a experimentos en hornos al oxígeno en 1931 en Maxhutte en Vavaria, y también al consejo del profesor Durrer - para eliminar Nitrógeno de los altos hornos porque esto arriesga toda rentabilidad. Porque si se sopla por el fondo con oxígeno puro, le cau-

sará problemas al refractario.

El primer examen o prueba en Linz fue hecha soplando oxígeno puro sobre un baño de metal caliente en un crisol.

Los sucesos de estos experimentos y el proceso subsiguiente fue en recipientes de unas 15 toneladas y luego de 30 toneladas, para pruebas en plantas extranjeras de fabricación de acero como por ejemplo Dominion Foundries and Steel Ltd., de Hamilton, Canadá, Mc Louth Steel Corporation, Detroit, USA y Bouchumer Verein, Alemania.

Otras plantas fueron mientras tanto examinando rutas alternativas. por ejemplo: el soplado por vapor-oxígeno instalado por Richard - Thomas Spencer Works. El proceso Kaldo desarrollado por el profesor Kalling en Suecia, y el proceso Rotor de Graef en Oberhausen, Alemania.

Al momento la ruta LD es dominante, pero no se asumiría que esta situación no va a cambiar. Es al momento considerablemente exitante, particularmente en América el nuevo soplado de oxígeno por el fondo/ruta de combustible gaseoso conocida como Q-BOP. Entonces - de nuevo hay discusión acerca de la nomenclatura, e incertidumbre para ambos, tanto para el origen como para la importancia del nuevo proceso.

+ El proceso LD parece especialmente adaptado para las acerías de moldeo que parten de la fusión de cubilote de una fundición de bajo fosforo partiendo a su vez de una carga compuesta de chatarra y retornos de fabricación. Este proceso ha sido concebido para efectuar el afino de los arrabios demasiados pobres en silicio como para ser tratados al Bessemer y demasiado pobres en fósforo para serlo en el Thomas. Se adapta particularmente al afino de los arrabios hematites - que contienen 0.1 a 0.3% de P.

El proceso se lleva a cabo en un recipiente con revestimiento básico de forma y tamaño igual al convertidor Thomas, pero sin toberas.

El oxígeno con 98% de pureza cuando menos, se sopla verticalmente en el baño de metal fundido, por medio de una lanza refrigerada por agua que está formada por 3 tubos concéntricos; el tubo interior sirve para el paso del oxígeno que es inyectado a una presión de 6 a 12 bars y cuyo consumo promedio es de $60\text{m}^3/\text{ton.}$ de acero. Los otros 2 permiten la circulación del agua a un caudal de $140\text{m}^3/\text{h.}$

El extremo de la lanza contiene una boquilla de cobre con 3 agujeros a 120° unos con relación a otros, e inclinados 15° sobre la vertical, cuya extremidad dista de 30 a 100 cm. de la superficie del baño, reaccionando rápidamente la superficie y estableciéndose una circulación intensa por la diferente densidad del metal. La circulación se establece en la forma en que se muestra en la figura número uno, lo que asegura la homogeneidad del metal tratado, que se mantiene -

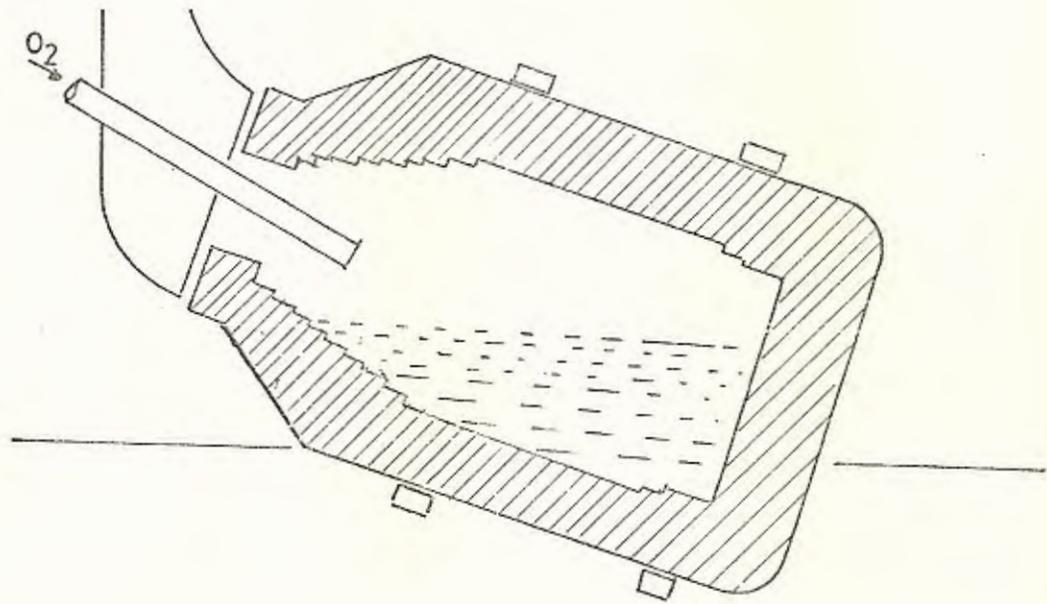


Figura 2
Proceso Kaldnes

caliente, y conteniendo al final 0.02 a 0.04% de oxígeno.

El proceso de soplado y la formación de escoria espumosa son afectados por la variación de la distancia existente entre la boca de la lanza y la superficie del baño calculada teóricamente.

Fenómenos Mecánicos durante el soplado de un baño con un chorro de oxígeno.

Los fenómenos mecánicos en el soplado vertical de un líquido con un chorro de oxígeno están representados en la Fig. 3.

El chorro de gas al salir de la lanza, se mezcla por turbulencia con la masa de gas que la rodea y arrastra a éste en su camino. Como consecuencia se ensancha el chorro en forma de cono al aumentar la distancia a la boca de la lanza, por lo que disminuye la velocidad hacia la periferia y con ella la presión de choque contra la superficie del baño.

Cuando el chorro incide sobre el líquido, desplaza por su impulso a un cierto volumen del último y forma una huella cóncava sobre la superficie. La forma de esta huella está determinada por el perfil de las líneas de la presión de choque, es decir, la profundidad es máxima en el eje del chorro y disminuye hacia los bordes. Dentro de esta huella se invierte la dirección del chorro y se produce por fricción una corriente de líquido. Cuando la velocidad alcanza un valor determinado,

FENOMENOS MECANICOS DURANTE EL SOPLADO DE UN
BANO CON UN CHORRO DE GAS

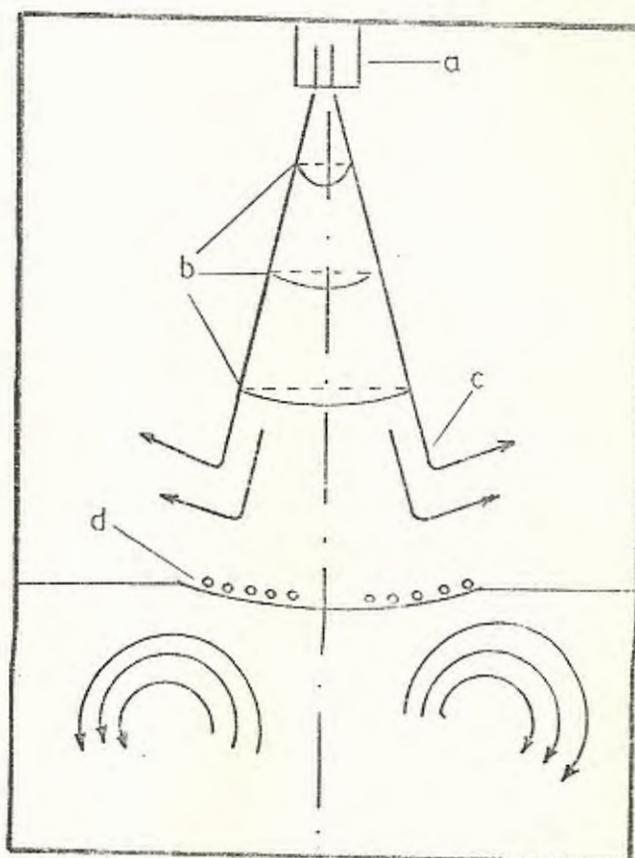


Figura 3

a) Lanza. b) Distribución de la presión
en el chorro. c) Cambio de dirección. d)
Líquido pulverizado del chorro

la energía del chorro es suficiente para que, al invertirse la dirección, pueda incluso pulverizar el líquido en gotitas lanzadas al espacio que queda encima del líquido. Este fenómeno lo llamaremos pulverización. Si se sopla una cantidad de gas constante, se forma una huella ancha y poco profunda cuando es grande la distancia existente entre la boca de la lanza y el nivel del líquido. Al disminuir esta distancia, la huella se hace más profunda y su diámetro más pequeño. Simultáneamente aumenta la pulverización.

Durante el afino del arrabio se asocian a estos fenómenos mecánicos transformaciones químicas en el chorro de gas y en el líquido de la zona de choque del oxígeno que influyen en el curso de la reacción de afino. Cuando la lanza está en posición baja, el mecanismo del afino es parecido al del convertidor THOMAS por reacción directa entre la fase gaseosa y el baño, gastándose tanto oxígeno en la reacción de descarburación que sólo puede formarse suficiente cantidad de óxido ferroso para lograr una escoria fluída y reactiva cuando esa reacción pierde intensidad. Si la lanza está a mayor altura, la presión de choque es más pequeña y el oxígeno se emplea preferentemente en escorificar el hierro. El afino se produce ahora principalmente por transferencia de oxígeno desde la escoria formada al baño y con éste soplado suave se hace tan lenta la descarburación que es posible la formación temprana de una escoria fluída, rica en hierro.

La eficiencia térmica del proceso es de un 70-75% en vez del 55% que co

cuyo revestimiento básico está constituido por una capa permanente de la drillos prensados de dolomía alquitranada (con 65% o más de MgO), con una capa intermedia de mezcla apisonada de dolomía y alquitrán, ó bien solo una capa de dolomía alquitranada, permitiendo efectuar 250 - 350 - coladas, si el tubo de oxígeno está bien centrado en el eje del conver tidor.

La operación es relativamente sencilla. La carga es similar a la del con vertidor corriente: comienza inclinando el aparato para recibir la chata rra que representa un 25-30% de la carga total, cargando a continuación el hierro fundido y pequeñas cantidades de cascarilla de laminación y cal que constituye 50-70 Kg/Ton. Después de introducir la caliza y el tu bo en posición vertical a distancia apropiada comienza el soplado que du ra unos 18 minutos. Al comenzar el soplado, tiene lugar la reacción con producción de FeO, parte del cual va a la escoria, difundiéndose en el baño la otra parte.

El óxido de carbono que se desprende, origina enérgico hervido en toda la carga, desarrollándose en la zona central de reacción temperaturas - próximas a la de ebullición del hierro, lo que aumenta la solubilidad - del oxígeno y acelera la difusión del FeO en el baño dando lugar a un rá pido proceso de oxidación. La reacción del carbono, disminuye rápidamente el FeO contenido en la escoria. El final del proceso se conoce clara mente por una franca debilitación de la llama que indica que la descarbu ración alcanzó hasta 0.05% y el fin del período de afinado.

1.969.

 Las reacciones de oxidación en el convertidor básico al oxígeno - son idénticas a las que se producen en el horno Siemens-Martin. La diferencia principal entre los dos procesos es la velocidad a la que se producen estas reacciones. En el convertidor son mucho más rápidas que en el horno Siemens-Martin debido a que la superficie de reacción es mucho mayor.

El acero obtenido en convertidores básicos al oxígeno equivale a un acero Martin pero como su precio es menor, ello explica el rá pido desarrollo de esta modalidad de fabricación en detrimento - del procedimiento Martin.

En la Fig. 4 se indica el cambio en la fabricación de acero en Alemania desde 1.960 en adelante. El horno de Siemens-Martin que dominaba anteriormente, la producción está siendo reemplazado po co a poco por convertidores L-D. Los convertidores Bessemer han desaparecido por completo o, en algunos casos, han sido cambiados a convertidores de oxígeno soplados por el fondo (proceso Q - BOP Y LWS).

La utilización del horno Bessemer ha bajado desde el 47% en 1.960 a menos del 10%, siendo producido actualmente más del 70% del ace ro por el procedimiento L-D.

un convertidor de 200 toneladas, el área de metal y escoria disponible para la reacción es de 150.000 pie². Esto explica la razón de que una colada de acero pueda afinar en solo 25 minutos en un convertidor, lo que en el horno Martin-Siemens demoraría 6 a 12 horas.

La eficiencia térmica del proceso es de un 70 a 75% en vez del 55% que corresponde al Bessemer básico. Esto abarca con lo referente al consumo de refractario que es menor y sobre todo en lo que respecta al fondo del recipiente que no es intercambiable por el mínimo desgaste que soporta. En consecuencia el costo medio de fabricación del acero L-D es de un 55% del que corresponde al proceso Martin (Herbert Trenkler y H.P. Hauttmann).

En resumen, y desde el punto de vista de las propiedades conseguidas en el nuevo acero, se llama la atención en lo siguiente:

- El acero L-D, presenta menos segregaciones que un acero Martin - Siemens de análoga composición.
- La aptitud respecto a la deformación en frío del acero L-D, es excelente, siendo superior al acero Martin-Siemens, para la fabricación de hojalata y alambre.
- El acero L-D es igualmente superior al Martin-Siemens en lo que respecta a la fractura frágil.
- La susceptibilidad a la corrosión es muy débil en el citado acero L-D.

- Bajo costo inicial.
- Es posible construir localmente.
- Su tamaño puede ser tan pequeño como para tratar 100 kg. y tan grande como para 200 toneladas.

CAPITULO III

PRINCIPIOS FISICOS QUIMICOS

3.1. INTRODUCCION

Este capítulo muestra cómo las técnicas de elaboración de los metales que han sido creadas por la experimentación pueden ahora ser justificadas por un razonamiento fundado en la termodinámica. Y para ello se hará un estudio de conceptos básicos sobre el tema y su aplicación en las reacciones del convertidor.

LA ENERGIA LIBRE Y EL EQUILIBRIO

Todos los cambios de la naturaleza se deben a la tendencia de los sistemas por alcanzar una condición de máxima estabilidad, esto es, el equilibrio. En este estado desaparece la propensión a otro cambio posterior y decimos que el sistema es estable. Conforme nos alejamos de la condición de estabilidad, la tendencia hacia el equilibrio, es tanto mayor cuanto lo es la separación del sistema de dicho estado. Además se efectúa un trabajo cuando existe aparejada una oposición al logro del equilibrio y en esta última condición

ningún sistema puede realizar un trabajo, pero sí lo hay cuando dicho sistema se aproxima al equilibrio. La cantidad de trabajo útil recuperable, depende tanto de la naturaleza como de la forma en que el sistema realiza el cambio. Sin embargo, para cada proceso particular hay una cantidad máxima de trabajo que el sistema puede llevar a cabo, y este se toma como una medida de la tendencia del sistema en cuestión a realizar el cambio.

Para que el trabajo asociado a estas variaciones sea máximo es necesario que se efectúen reversiblemente; si no es así, la cantidad de trabajo producido es siempre menor que la máxima alcanzable, y la diferencia entre los trabajos máximos de los estados inicial y final, puesto que representa la mayor energía posible que tiende a aparecer en forma utilizable, como resultado del proceso. Si dicha energía aparece o no, depende solo de la manera en que se conduce el proceso, y de ninguna forma afecta la conclusión de que el trabajo máximo que un proceso puede realizar, si se lleva a cabo adecuadamente, es la medida de la tendencia impulsora subyacente en el proceso.

ENERGIA LIBRE

Sea un sistema en contacto con un medio exterior cuya temperatura constante tiene por valor T .

Si H y S designan respectivamente la entalpía y la entropía de este sis

tema, la función $G = H - TS$ se llama entalpía libre.

En una transformación efectuada a la temperatura constante T , la variación de G está bien determinada:

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S$$

Considerando una transformación efectuada a temperatura constante y bajo una presión igualmente constante. Si la transformación es reversible la termodinámica demuestra que el trabajo suministrado por el sistema, menos el trabajo de las fuerzas de presión, es igual a la disminución de la entalpía ó energía libre:

$$-W_{\text{rev}} = G_1 - G_2$$

Si la transformación es irreversible, el trabajo suministrado es más pequeño:

$$-W_{\text{irr}} < G_1 - G_2$$

Si el sistema no está sometido más que a fuerzas de presión tenemos que,

$$W_{\text{irr}} = 0, \text{ de aquí que:}$$

$$G_2 < G_1$$

El sistema no puede evolucionar más que en el sentido de una disminución de G . Por lo tanto, se puede decir que una reacción total prevista tiene lugar si la variación de energía libre correspondiente es negativa.

Si $(\Delta G)_T < 0$, la reacción puede tener lugar

Si $(\Delta G)_T = 0$, el sistema está en equilibrio químico.

Si $(\Delta G)_T > 0$, la que puede producirse es la reacción inversa.

La regla preveé la tendencia de la evolución de un sistema, pero no da ningún dato sobre la velocidad de evolución.

Así, para la reacción $C + O_2 \rightarrow CO_2$ $(\Delta G)_T$ es siempre francamente negativa; sin embargo, se sabe que una pila de carbón puede permanecer largo tiempo al aire libre sin arder. La acción prevista por la regla no ocurre más que a una temperatura elevada en la que la velocidad de reacción toma un valor notable.

Si la reacción es termodinámicamente imposible porque $(\Delta G)_T$ es positivo, se puede tratar de disminuir suficientemente ΔG para hacerla negativa; sea modificando las condiciones de reacción ó bien obrando sobre T .

ESTADO TIPO O DE REFERENCIA

Es aquel en que cada cuerpo o elemento está en el estado puro y bajo una presión de 1 atm. En estas condiciones se puede escribir:

$$(\Delta G^\circ)_T = (\Delta H^\circ)_T - T (\Delta S^\circ)_T$$

y $(\Delta G^\circ)_T$ se llama variación de Energía libre de referencia para la reacción considerada a la temperatura T.

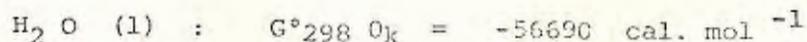
LAS ENERGÍAS LIBRES TIPO DE FORMACION

A causa de la relación directa entre ΔG° y las condiciones que prevalecen en equilibrio, la evaluación del cambio de energía libre tipo de una reacción es un problema capital de físico-química.

De esta manera, la energía libre de formación de un compuesto se define como el cambio que acompaña a la formación del mismo con una actividad-unidad desde sus elementos con igual actividad. La ecuación:



nos da el cambio de energía libre de formación de un molde de $\text{H}_2 \text{O} (\text{l})$ con una actividad igual a la unidad. Si suponemos ahora arbitrariamente, que las energías libres de formación de los elementos en su estado tipo a 25°C son cero, el valor de ΔG° anterior es la energía libre tipo de formación del agua líquida desde los elementos, y podemos escribir simplemente que:



CONSTANTE DE EQUILIBRIO

Considérese el caso más general donde el metal y el óxido no están en estado puro, pero están disueltos en otro metal y en otro óxido respectivamente, y la presión de oxígeno en equilibrio es menor a 1 atm. En equilibrio la energía de reacción para la ecuación $2M + O \rightarrow 2Mo$ está dada por:

$$\Delta G = 2G_{Mo} - 2G_M - G_{O_2}$$

mientras que, cuando todas las sustancias están en sus estados standards normales:

$$\Delta G^\circ = 2G^\circ_{Mo} - 2G^\circ_M - G^\circ_{O_2}$$

restando esta ecuación de la primera y recordando que en equilibrio

$$\Delta G = 0$$

$$-\Delta G^\circ = 2(G_{Mo} - G^\circ_{Mo}) - 2(G_M - G^\circ_M) - (G_{O_2} - G^\circ_{O_2})$$

sustituyendo de la ecuación $G = G^\circ + RT \ln a$ para ΔG para los dos primeros términos en paréntesis y de la ecuación $\Delta G = G - G^\circ =$

$RT \ln \frac{f}{f_0}$ para el tercer término, entonces:

$$-\Delta G = 2RT \ln a_{Mo} - 2RT \ln a_M - RT \ln f_{O_2} \quad \text{ó}$$

$$\Delta G = -RT \ln \left[\frac{a_{Mo}^2}{a_M f_{O_2}} \right]$$

Debido a que en alguna temperatura ΔG° tiene un valor numérico preciso, el término en corchetes debe ser constante a esa temperatura y es independiente de la concentración, con tal que el sistema esté solamente en equilibrio termodinámico. La cantidad encerrada en corchetes se la designa como "constante de equilibrio", y es representada por el símbolo K . Por tanto:

$$\Delta G^\circ = - RT \cdot \ln K$$

ó

$$\Delta G^\circ = - 19.14T \cdot \log K$$

En el caso general, para la reacción entre v moles de A , w moles de B , etc., para producir x moles de C , Y moles de D , etc., es decir:



la constante de equilibrio está dada por

$$\frac{\Delta G^\circ}{19.14 T} = - \log K = - \log \frac{a_C^x \cdot a_D^y}{a_A^v \cdot a_B^w}$$

Se ha demostrado que cuando el estado estándar es escogido como el componente puro, la actividad de la sustancia en una solución ideal es igual a la fracción molar o atómica. La extensión de la desviación idealmente puede ser medida en términos de un coeficiente de actividad γ

sentada por la ecuación química:



Las temperaturas inicial y final tienen el mismo valor T . En estas condiciones, la realización de la reacción Total es acompañada de una variación de energía libre de reacción bien determinada.

Trataremos esta magnitud en dos casos particulares:

Primer Caso. - Supongamos que los cuerpos del primer miembro reaccionan para dar los del segundo, estando todos los cuerpos en "el estado de preferencia", es decir, que cada uno de ellos está en el estado puro y a una atm. de presión: en estas condiciones se puede escribir:

$$(\Delta G)_T^\circ = (\Delta H)_T^\circ - T(\Delta S)_T^\circ$$

y ΔG_T° se llama "variación de energía libre de referencia" para la reacción considerada a la temperatura T .

Se ha demostrado por termodinámica que:

$$(\Delta G)_T^\circ = -RT \ln K_P$$

donde K_P es la constante de equilibrio, que tiene por expresión

de temperatura. La variación con la temperatura puede expresarse por la relación

$$\log [a_O] = - \frac{6320}{T} + 2.70$$

En la mayoría de los elementos solubles el valor del coeficiente de actividad es relativo al hierro puro.

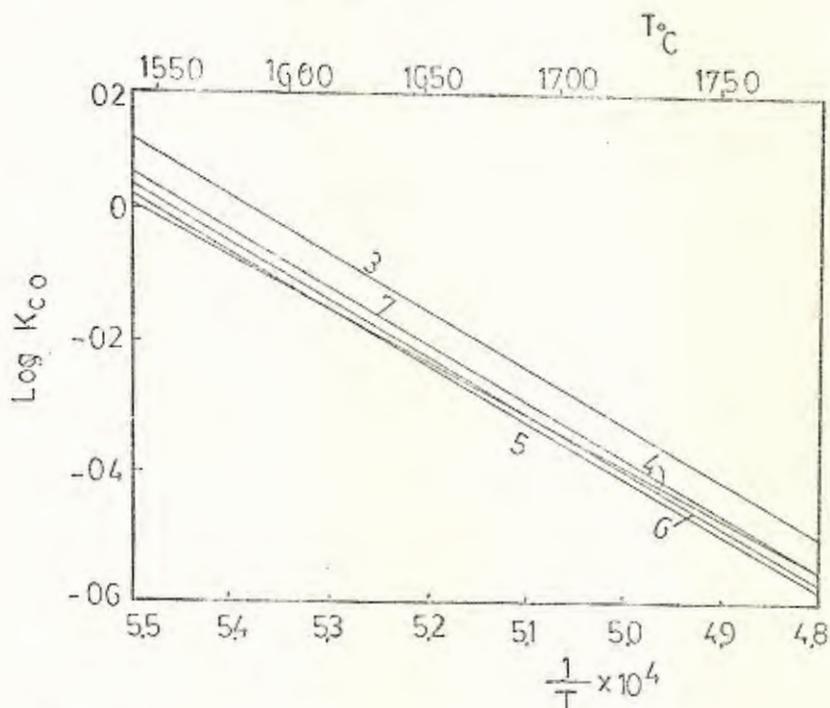


Figura 7. El efecto de la temperatura en el equilibrio entre el monóxido, dióxido de carbono y oxígeno en hierro líquido. Los números se refieren a las ecuaciones siguientes.

	ΔG° J/mol	$\log K_{CO}$
(3)	$-161500 + 86.7T$	$\frac{8443}{T} - 4.53$
(4)	$-154700 + 84.9T$	$\frac{8088}{T} - 4.438$
(5)	$-164700 + 90.1T$	$\frac{8610}{T} - 4.72$
(6)	$-166800 + 91.2T$	$\frac{8718}{T} - 4.762$
(7)	$-161600 + 87.7T$	$\frac{8448}{T} - 4.58$

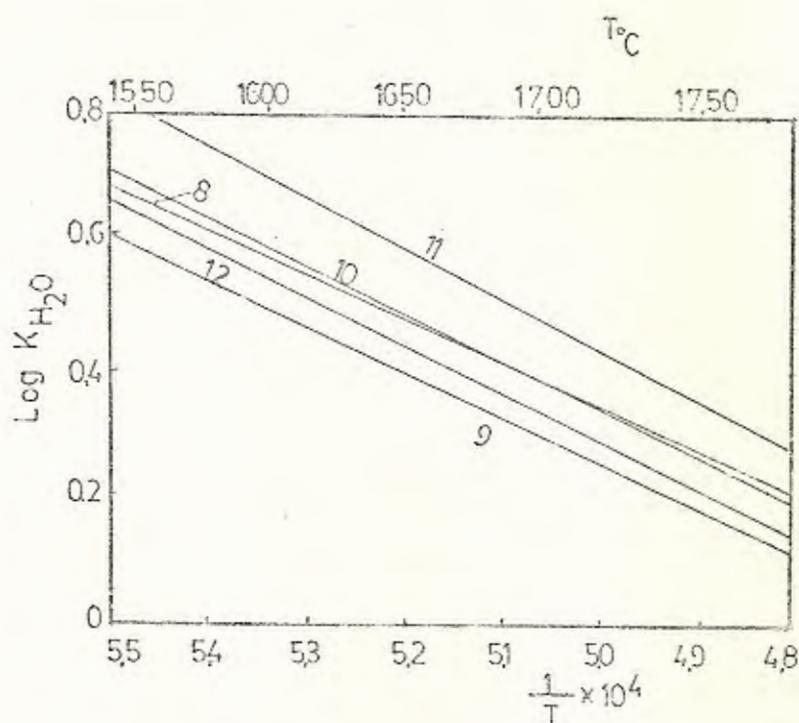


Figura 8. Variación con la temperatura del equilibrio entre hidrógeno y oxígeno en hierro líquido. Los números se refieren a las siguientes ecuaciones:

ΔG° J/mol	$\text{Log } K_{\text{H}_2\text{O}}$
(8) - 134900 + 61.2T	$\frac{7050}{T}$ - 3.20
(9) - 130300 + 60.2T	$\frac{6810}{T}$ - 3.14
(10) - 143100 + 65.3T	$\frac{7475}{T}$ - 3.41
(11) - 134900 + 58.4T	$\frac{7050}{T}$ - 3.05
(12) - 141300 + 65.1T	$\frac{7380}{T}$ - 3.40

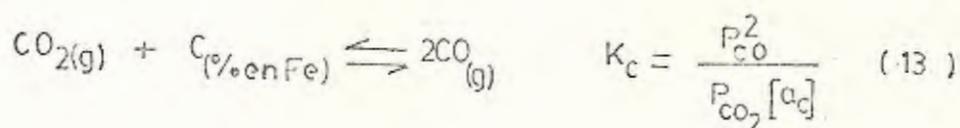
La actividad del oxígeno del metal en equilibrio con algo de escoria para la cual la actividad del óxido ferroso es conocida puede determinarse por la relación:

$$\frac{[a_o]_{act.}}{[a_o]_{sat}} = \frac{a_{FeO act}}{a_{FeO puro}} = a_{Fe act}$$

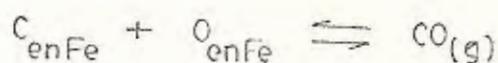
donde el estado standar del FeO se coge como el del óxido líquido puro.

LA OXIDACION DEL CARBONO

Las reacciones entre carbono y oxígeno disuelto en el hierro líquido son las de mayor importancia, de las que ocurren en la fabricación del hierro y acero y, consecuentemente, esto ha sido el objeto de un gran número de investigaciones. En la mayoría de los casos, condiciones de equilibrio se han determinado por la relación:



para la reacción de interés



$$K_{C-O} \frac{P_{CO}}{[a_C] [a_O]} = \frac{P_{CO}}{[\%C][\%O] f_o}$$

Son entonces obtenidos por ecuaciones adicionales

$$\log K_{C-O} = \log K_{CO} + \log K_c$$

Valores típicos de la variación con la temperatura de $\log K_c$ (ecuaciones 14 a 18) y $\log K_{C-O}$ (ecuaciones 19-24) se muestran en la Fig. 9 y 10 respectivamente.

Oxidación de otros elementos

En contraste a la oxidación del carbono, la mayoría de los elementos restantes oxidados durante el refinamiento son removidos según que los productos de las reacciones sean líquidos o sólidos. En tales casos la concentración de equilibrio de un elemento en el metal en una temperatura dada esta dependiente de la actividad del oxígeno disuelto en el metal y de la actividad de los productos de la reacción. La reciente actividad debe ser alta y terminar en unidad si esto se formó en el metal como un sólido o como un líquido que sea inmiscible con el metal. Esto sería también elevado, en la escoria si la escoria está por terminar de saturarse con productos de la reacción como por ejemplo, cuando silicio es oxidado desde el metal cubierto por una escoria saturada de sílice. Más comúnmente, los productos de la reacción son inmiscibles en el metal, pero esto es soluble en una relativamente actividad baja en la escoria. La reacción puede entonces avanzar a la interfase metal-escoria después dentro de la masa de metal.

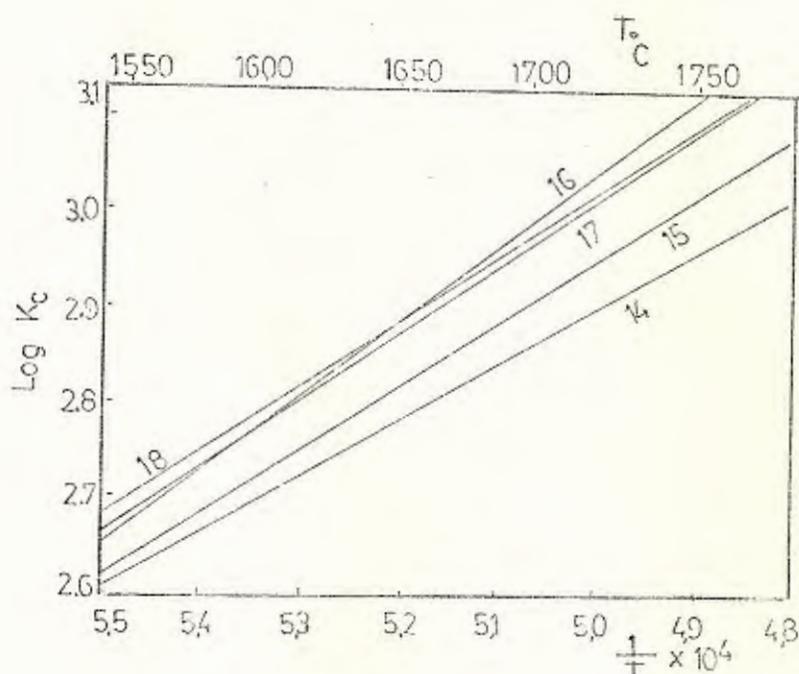


Figura 9. Variación con la temperatura del equilibrio entre el monóxido de carbono, dióxido de carbono y carbón en hierro líquido. Los valores de las relaciones son como sigue:

	$\Delta G^\circ \text{Joules}$	$\log K_c$
(14)	$110600 - 110.7T$	$-\frac{5778}{T} + 5.784$
(15)	$123600 - 118.2T$	$-\frac{6460}{T} + 6.175$
(16)	$144300 - 130.0T$	$-\frac{7540}{T} + 6.79$
(17)	$139300 - 127.3T$	$-\frac{7580}{T} + 6.65$
(18)	$134900 - 125.1T$	$-\frac{7050}{T} + 6.538$

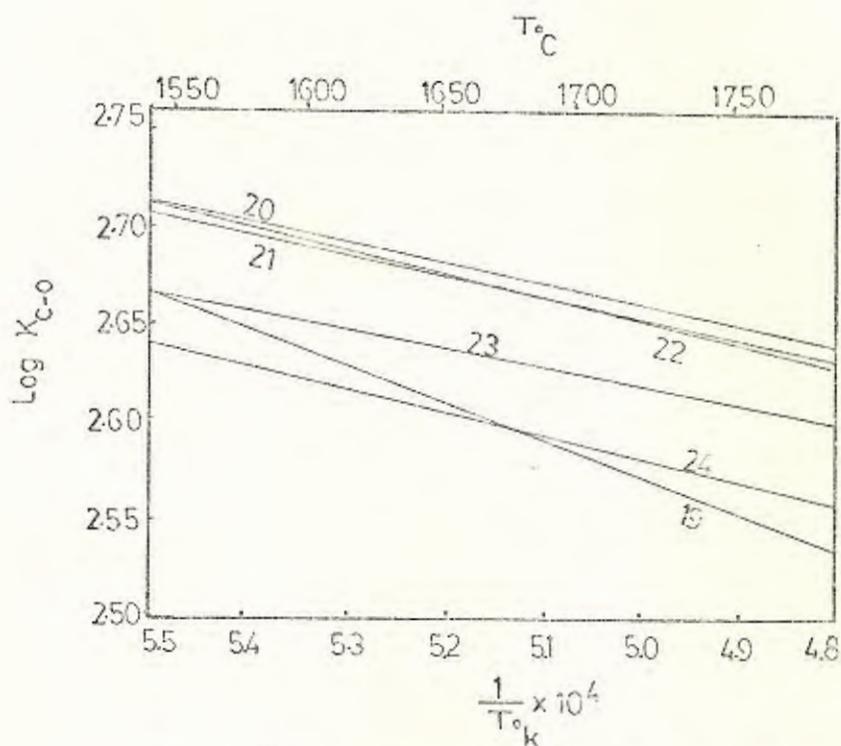


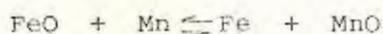
Figura 10 . Comparación de los valores de las constantes de equilibrio para la reacción entre carbono y oxígeno en hierro líquido. Los números se refieren a las siguientes ecuaciones:

	ΔG° Joules	$\log K_{C-O}$
(19)	- 35600 - 31.45T	$\frac{1860}{T} + 1.643$
(20)	- 20200 - 40.79T	$\frac{1056}{T} + 2.131$
(21)	- 20000 - 40.79T	$\frac{1045}{T} + 2.131$
(22)	- 22400 - 39.6T	$\frac{1168}{T} + 2.07$
(23)	- 17900 - 41.19T	$\frac{935}{T} + 2.152$
(24)	- 22200 - 38.34T	$\frac{1160}{T} + 2.003$

- C.- Concentración de los diversos elementos. Estando el hierro en proporción elevada, el oxígeno se dirige ante todo sobre este elemento para dar el óxido ferroso (Fe O); este puede ser reducido por elementos reductores del arrabio, y juega así el papel de transportador del oxígeno.
- D.- Facilidad de eliminación del óxido formado. Siendo reversibles las reacciones de oxidación de las impurezas del arrabio, serán tanto más fáciles de realizar cuanto que el óxido formado se elimine más fácilmente. La escoria puede absorber más o menos fácilmente un óxido que acaba de formarse, y por consecuencia obrar sobre la eliminación del elemento correspondiente. Así, una escoria básica favorece la oxidación de los elementos que dan anhídridos de ácido, y una escoria ácida favorece la oxidación de los elementos que dan óxidos básicos.
- 2º- La Reducción permite la separación del azufre, y la desoxigenación del óxido ferroso que resta al final de la fase precedente.
- A.- Desulfuración. Una buena desulfuración exige esencialmente la obtención de una temperatura elevada; porque por una parte, la escoria calcárea necesaria es muy refractaria y, por otra parte, una reducción enérgica, pero económica, no puede ser operada más que por el carbono que obra tanto más eficazmente cuanto que la temperatura sea más elevada. Así se renuncia a una desulfuración a fondo, salvo en el horno eléctrico de arco.

B.- Desoxidación del óxido ferroso. La fase de oxidación suministra - un metal cargado de óxido de hierro, y la reducción de este óxido es absolutamente indispensable, por una parte porque el óxido no es forjable, y por otra parte para evitar un desprendimiento gaseoso - importante durante la solidificación que podría originar proyecciones de metal fuera de la lingotera.

Generalmente, esta desoxigenación del óxido de hierro se hace el man ganeso (introducido bajo forma de ferroaleación) que obra según la reacción reversible:



El óxido MnO insoluble en el acero y de pequeña masa volumétrica tiene tendencia a subir a la superficie del baño; pero una buena DECAN TACION necesita un tiempo de reposo prolongado, y de hecho, solamente se elimina las partículas suficientemente gruesas. Prácticamente si el óxido de hierro es reducido, el baño no es totalmente desoxigenado; pero el oxígeno que resta está en forma de impurezas (inclusiones) mucho menos nocivas que el FeO.

La reducción del óxido de hierro del baño metálico puede hacer igualmente por medio del SILICIO, introducido en forma de ferroaleación, o del carbono (EN EL HORNO ELECTRICO).

3.2.2 OXIDANTES Y REDUCTORES

Los agentes oxidantes son elementos que su acción depende directamente de la valencia y de su concentración. El poder oxidante aumenta del Yodo al flúor.

Existe una gran variedad de sustancias que actúan como oxidantes - así tenemos como ejemplo el ácido nítrico, agua regia, agua oxigenada, permanganato de Potasio, etc.

En nuestro caso daremos más importancia al efecto de oxidación que realiza el oxígeno sobre el hierro y los elementos constituyentes del acero en el momento en que se efectúa la inyección de oxígeno sobre la superficie del baño metálico.

Agentes reductores son aquellos elementos cuya acción se debe a una transformación iónica. El empleo de metales y de Hidrógeno - como reductores, se basa en la transformación del metal y del Hidrógeno, neutros en cationes. La transformación requiere un aumento en el número de oxidación, o sea una pérdida de electrones cuyo número depende de la valencia del metal.

En los primeros días de la industria, carbón de leña o carbón mi

neral fue utilizado como agente reductor para recuperar el hierro de los minerales y la fabricación de hierro fue por lo tanto centralizada en regiones de bosques donde el carbón de madera pudiera ser obtenido fácilmente. Posteriormente, cuando el coque fue introducido, este trajo el agente reductor común para la recuperación del hierro, sin embargo, antracita ha sido usada en algunos casos.

En el proceso de fabricación de acero, el exceso de oxígeno incorporado en el metal en forma de óxidos es eliminado añadiendo al final del proceso elementos adecuados, de tal manera que den óxidos más estables que el hierro.

Los oxidantes o reductores más usados comúnmente son Aluminio, Manganeso y Silicio o combinados con algún otro elemento; así por ejemplo puede usarse ferrosilicio y ferromanganeso. El vanadio y Titanio son los más ideales pero así mismo resultan muy costosos.

3.3 PROCESO DE LA CONVERSION

Mediante una apropiada conducción, se consiguen siempre bajos contenidos de fósforo y azufre a lo que se llega incluso antes de finalizar la reacción de descarburación. Para lograrlo es de especial importancia la pronta formación de escorias fluidas y reactivas.

Un aspecto importante para el proceso de soplado es la formación de

de la pureza del oxígeno. Si se emplea oxígeno de 98% de pureza, el contenido en nitrógeno oscila entre 0.003 y 0.007% pero desciende a la escala 0.002 - 0.005% cuando se usa gas de 99.1% de pureza.

El fósforo final es de 0.010 - 0.025%.

Generalmente se obtiene a partir de un arrabio de 0.2% de fósforo y 0.04% de azufre, un acero dulce de 0.026% de fósforo, 0.02% de S y O y 0.003% de nitrógeno.

Una característica del proceso tal como se lleva a cabo en Austria es el Manganeso residual que resulta de un contenido alto inicialmente. Este suele ser, generalmente, de 0.3 a 0.40% y, en consecuencia, no se precisa ninguna adición para la desoxidación. El remanente sube de 0.30- a 0.45% conforme aumenta la cifra original de 1.4 a 2.2%.

Como se ha descrito, los primeros trabajos sobre el proceso L-D y los equipos de producción establecidos hasta la fecha, se han basado en arrabios bajos en fósforo hasta un máximo de 0.3 - 0.4%. Se considera que hasta el 0.5% de fósforo puede ser tratado con este proceso, ofreciendo poca dificultad, aunque si se emplean contenidos más altos en fósforo - la velocidad del proceso es entonces tal que el carbono quedará eliminado antes que el fósforo, debido principalmente a que el tiempo de soplado no es lo suficientemente largo para producir una escoria fluida con contenido de cal lo cual es un pre requisito de la eliminación del fósforo.

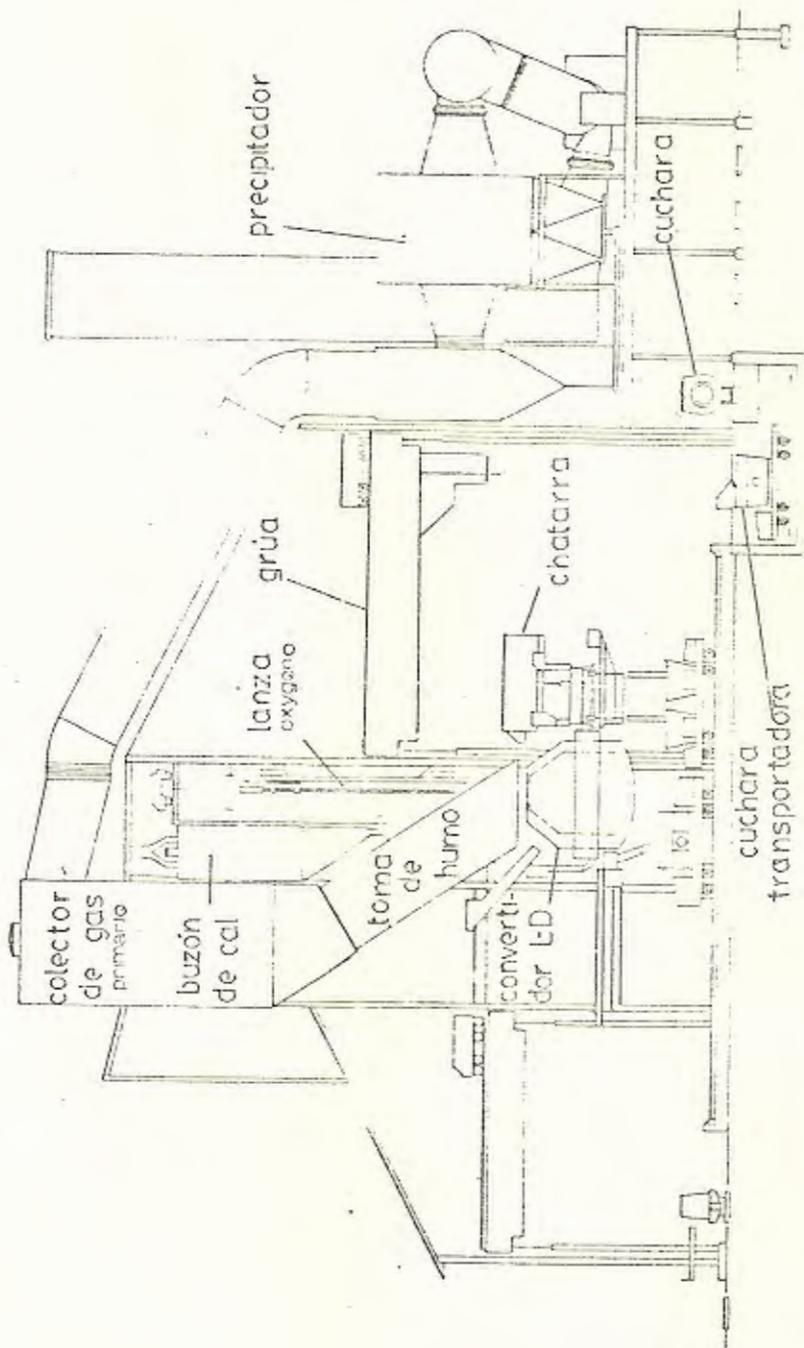


Figura 12. Planta L D de 275 Ton.

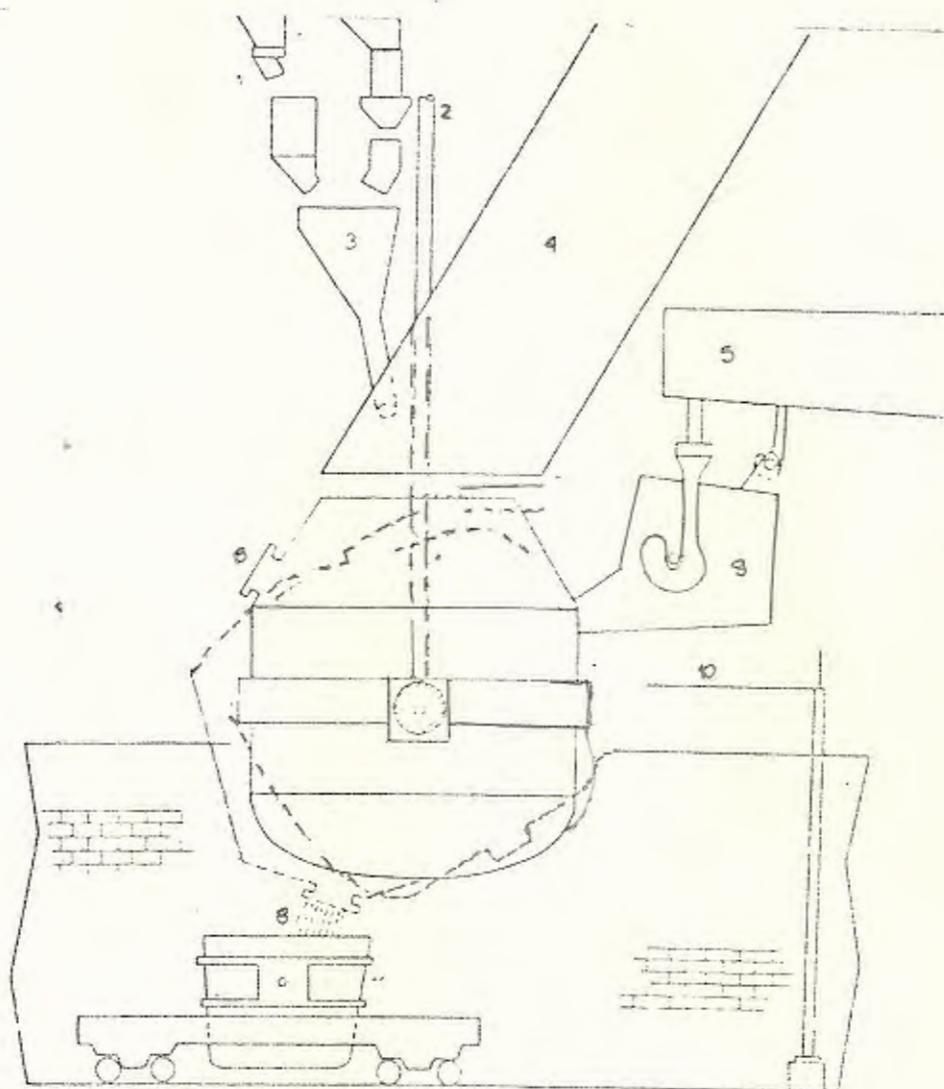


Figura 13. Partes principales de una planta LD

1. Tolvas para adición de materiales.
2. Lanza de oxígeno.
3. Tolva de mezcla de adicionantes.
4. Campana de gases de escape.
5. Recipiente de metal caliente.
6. Posición de afino.
7. Posición de carga.
8. Posición de descarga.
9. Cargadora de metal.
10. Soporte o base
11. Carros transportadores de acero.

toneladas en Tobata en 1962. Este proceso tiene algunas ventajas, por ejemplo, reduce el gasto del volumen de oxígeno alrededor de 1/6, mediante un ducto colector muy pequeño. Esto reduce grandemente los costos de la planta LD. Los costos de operación son también mucho menores y el gas disponible puede ser quemado en hornos de secado, en foso de recalentamiento, o dentro de calderas.

El primer recipiente LD fue en su mayor parte diseñado para soplar de 15 a 60 toneladas de metal, pero eso se desarrolló muy rápido para unidades de 100-200 toneladas y ahora convertidores de 300 - 400 toneladas no son inusitados.

Existe una tendencia general para que la relación altura diámetro del convertidor decrezca ligeramente con la capacidad. Por ejemplo, el convertidor grande es más redondo que el pequeño. En la figura 14 se ha hecho un corte en un convertidor de 300 toneladas, en donde se ve la colocación del revestimiento. Este puede convenientemente dividirse en el fondo (hogar), la cuba o barril y el cono (o sección convergente) que comienza alrededor del tragante.

El fondo.- Ciertos convertidores en el continente son equipados con fondos renovables. Aunque esto es una herencia del proceso Thomas, en que el aire era soplado a través de toberas en un hogar con tapones, este tiene características muy valiosas que pueden resultar nuevamente si

La figura 15 y 16 muestran un convertidor en BRUCKHAUSEN (Alemania) de 350 toneladas y un convertidor Lackawanna (USA) que puede considerarse lo como un típico convertidor grande.

El cono.- Se nota que la sección del cono semejante a la de un convertidor Thomas es simétrica. Se emplea ladrillos chaflanados para dar una superficie interior lo más lisa posible pero algo curvada que es lo más usual.

El tragante.- Existen varios caminos para hacerlos. El procedimiento más común consiste en usar una serie de ladrillos seccionados prefabricados que pueden estar ligados a una barra y colocados en el lugar por amasamiento o aprisionamiento entre ellos y el revestimiento. Cuando se termina esto, se coloca un tubo para limpiar los agujeros y ensanchar el tiro (lugar por donde se realiza el vaciado).

a).- CONTROL DE TEMPERATURA

El control de la temperatura es muy útil; pues no hay que olvidar que la operación se efectúa sin otro aporte de calorías que las suministradas por los propios elementos acompañantes del hierro.

La temperatura es lo suficientemente alta como para vaporizar una cierta cantidad de Fe y Mn que reaccionan con el oxígeno en exce-

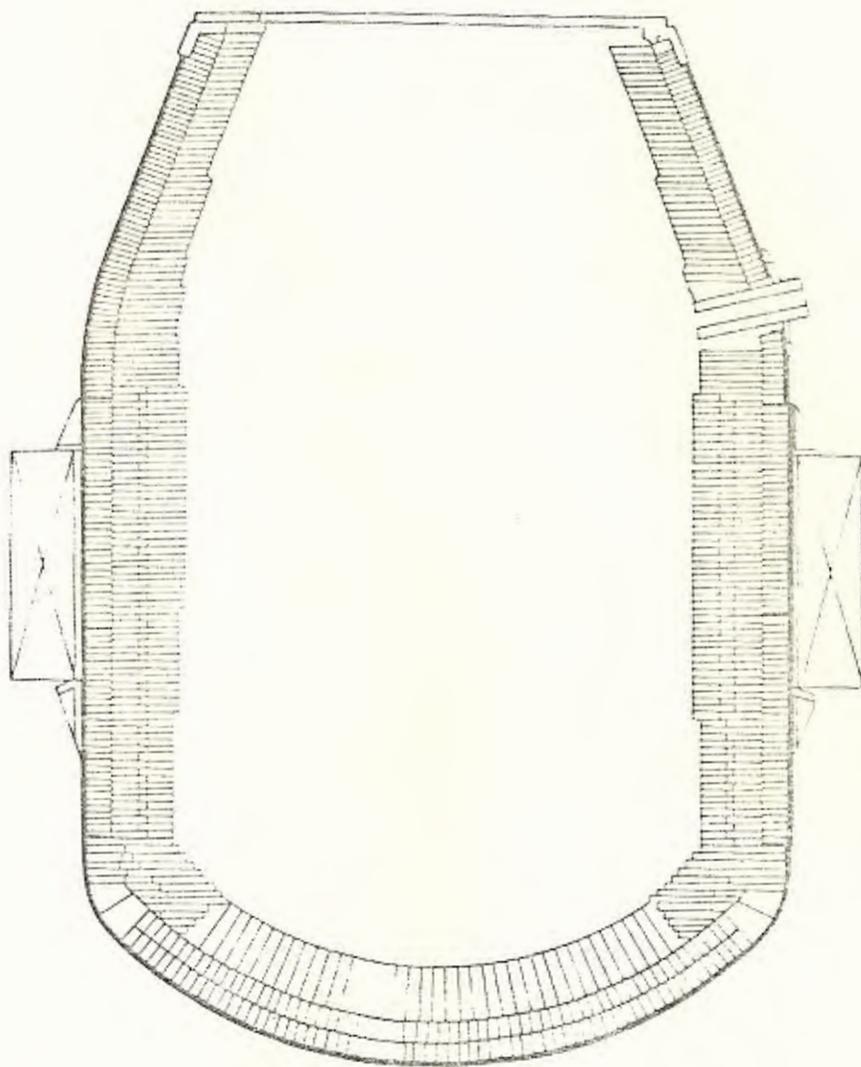


Figura 16. Convertidor LD (Lackawanna)

so, dando unos humos rosados característicos. Se puede considerar que al llegar a cerca de 1750°C se puede ya adicionar cargas frías. De aquí que es obligado el constante control de la temperatura del acero.

b).- CAUDAL DE OXIGENO

Se ha visto por experiencia que puede ser incorrecto basarse en los tiempos para controlar la conversión. Es preciso un totalizador que da en todo momento el consumo de oxígeno de forma precisa y legible. El aparato ha de dar el contaje para cada colada y no para cada día.

El consumo de oxígeno en la producción de una tonelada de acero es alrededor de 50 m^3 , de aquí que un convertidor de 200 toneladas con un tiempo de soplado de 20 minutos necesita una razón de flujo de $500\text{ m}^3/\text{min}$. Esto es fácil ver porque algunos estudios de diseños de lanza han sido realizados, especialmente para convertidores que son bastantes grandes. Estudios de modelos pueden ser solamente de valor limitado ya que es casi imposible reproducir - condiciones en un convertidor porque:

- a).- El oxígeno reacciona con el baño
- b).- Un gas (CO) es desplegado
- c).- La corriente de oxígeno es circundada por un gas de alta temperatura.
- d).- Algo de CO producido es oxidado a CO_2 .

Pero esto es posible conseguir alguna idea de las condiciones bajo el chorro de la dinámica del proceso. El sorprendente chorro sobre la superficie del baño produce una depresión en la superficie del líquido y además gotitas son lanzadas tangencialmente desde la depresión debido a los gases salientes. La producción de gotas pequeñas, el perfil y dimensiones de esta depresión son importantes en cuanto a conocimiento del proceso. En algún punto sobre la depresión, existe un equilibrio entre la presión hidrostática del líquido y la presión dinámica local del chorro ($1/2 \rho_g v^2$). Sobre esta base la máxima hondura de penetración puede ser encontrada. El efecto de la altura de la lanza, así como distancia entre lanza y superficie del baño, son dadas por la ecuación:

$$P = \frac{K G_o}{\rho_l H^2}$$

donde:

P = hondura de penetración

H = altura de la lanza

ρ_g = densidad del gas

G_o = Impulso del chorro

ρ_l = densidad del líquido

Esta fórmula ignora o desprecia los efectos (a - d) mencionados anteriormente y es estrictamente aplicable a condiciones donde no ocurre reac

ción, pero esto ilustra el efecto de la altura de lanza sobre la depresión formada. El diseño de la boquilla puede influenciar en el proceso debido a que afecta a la distribución de velocidad.

La figura 17 es un ejemplo de una práctica con alto Manganeseo. La figura no presume ser una representación definitiva de todo el proceso LD, pero es información amplia de lo que ocurre durante los sopladados.

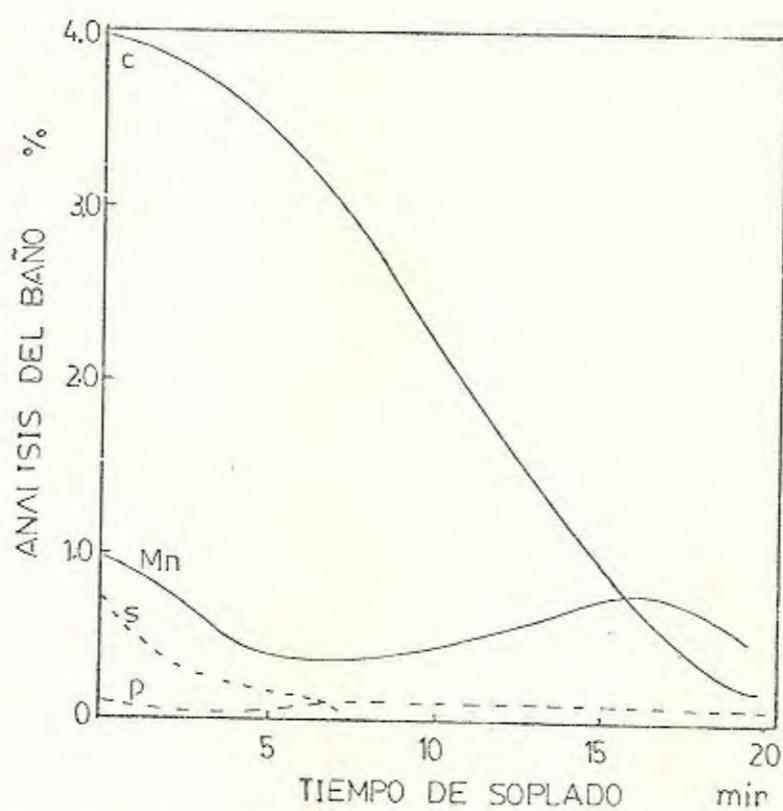


Fig 17. Remoción de elementos en el proceso L-D

3.4 EVOLUCION DEL BAÑO DURANTE EL SOPLADO

Se mencionó que la acción del oxígeno no se ejerce únicamente sobre el carbono; algunos constituyentes del arrabio: Manganeseo, Silicio, fósforo también se oxidan y se eliminan en parte o por completo. Este último se elimina por oxidación del producto formado con la cal.

3.4.1 SILICIO

El elemento que primero se quema es el silicio y de una manera completa como se ven en la figura 18. Cuando la oxidación del Silicio se acelera, la del Manganeseo se retarda por la presencia de la cal, que fija inmediatamente la Sílice oponiéndose así a su combinación con el óxido de Manganeseo.

Su combustión con el oxígeno es muy exotérmica y de ahí su papel de elemento termógeno en el afino. (un 1% de Silicio oxidado a Si_{02} produce un aumento de temperatura de 180 -190°C).

3.4.2 CARBONO

La descarburación que va a la par con la desfosforación en donde el carbono desaparece rápidamente; arde por intermedio del óxido ferroso que es abundante porque no puede pasar a la escoria básica, más que en pequeña proporción. Es decir, que el carbono redu

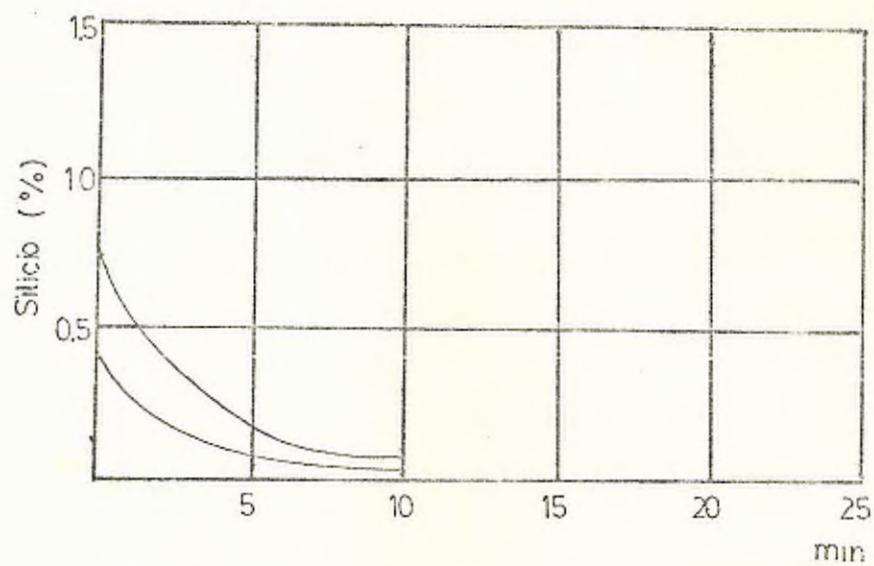


Figura 18 Remocion de silicio

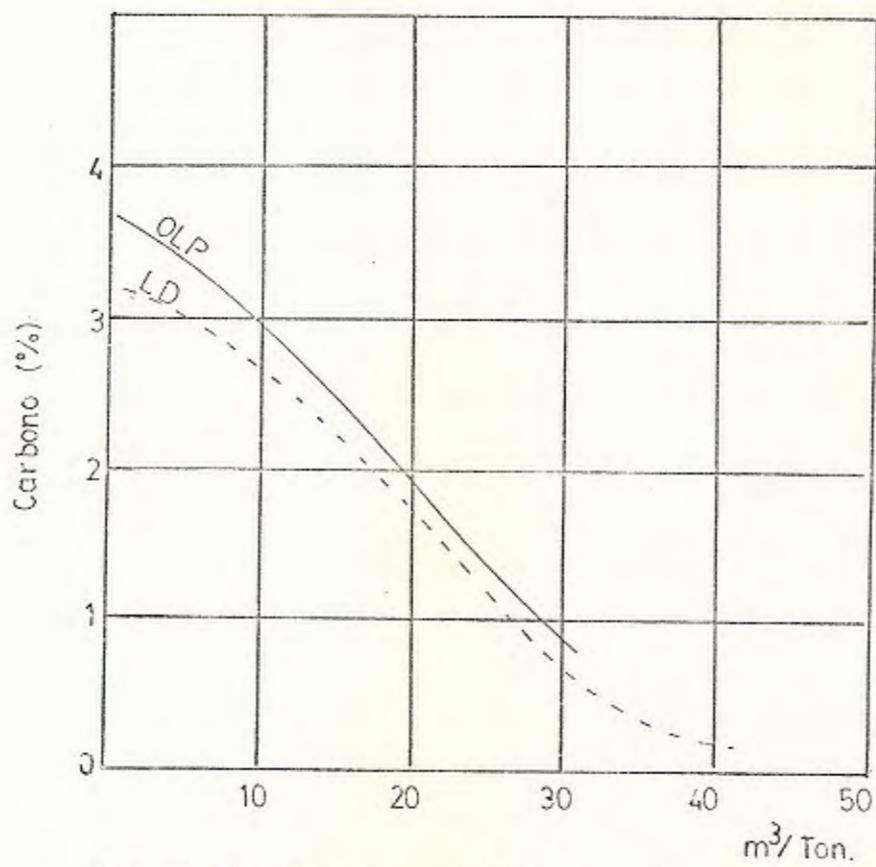


Figura 19. Semejanza entre proceso LD y OLP durante la descarbación

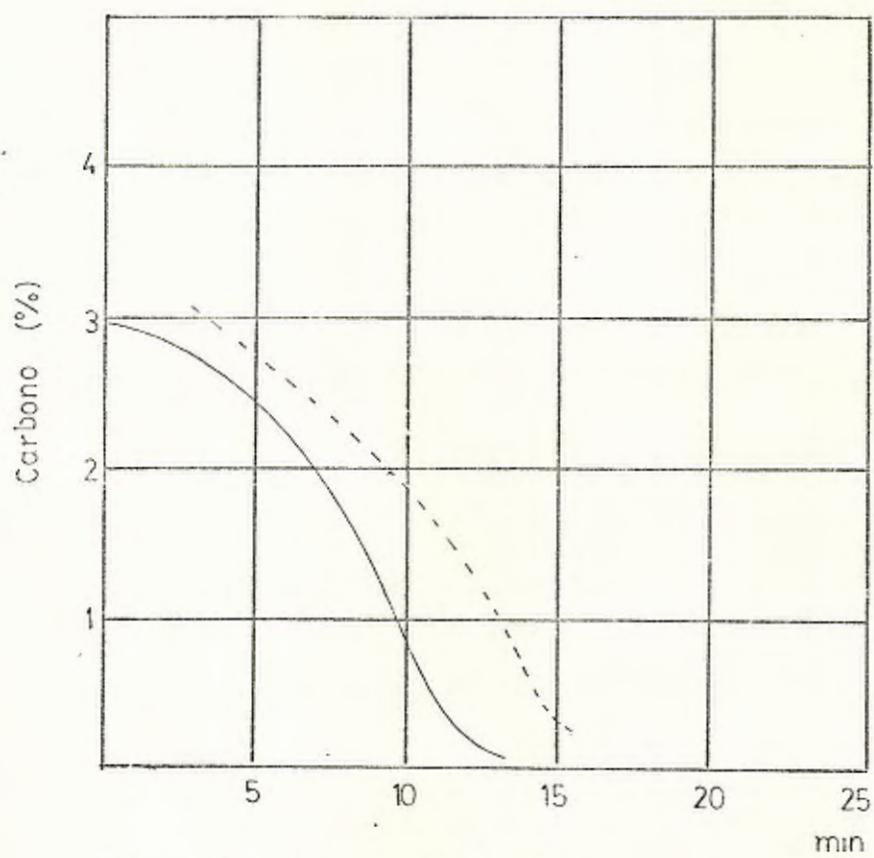


Figura 20 Remocion de carbono

Si se desea evitar el desescoriado y preparación de la segunda escoria, se propone una segunda solución que consiste en restar el carbono de los humos. Es de esperar entonces que, conociendo el peso de la fundición, así como el caudal de oxígeno, se puede parar la conversión en un momento determinado y controlar rápidamente el contenido de carbono con un carbómetro. La utilización de este aparato es delicado pero parece que en ausencia de elementos de aleación (Silicio) las condiciones de utilización son aceptables. También es posible, lógicamente, obtener un acero más o menos duro recarburando en la cuchara.

Puede verse entonces que las reacciones más importantes en el proceso L-D son aquellas que implican oxidación y especialmente la oxidación del carbono. En el proceso al oxígeno, esto es un sistema -gas-escoria-metal el cual está ya implicado y para la mayoría de los procesos, estas fases no se encuentran en equilibrio unas con otras.

La razón de descarburización normalmente siguen el modelo mostrado en la figura 21. El gráfico muestra tres regiones distintas, primero el incremento de la razón, luego permanece estable alrededor de la mitad del tiempo total, seguido por un descenso estable según el contenido de carbono requerido que es aprovechable. En el primer período la razón puede expresarse como:

$$-\frac{dc}{dt} = K_1 t$$

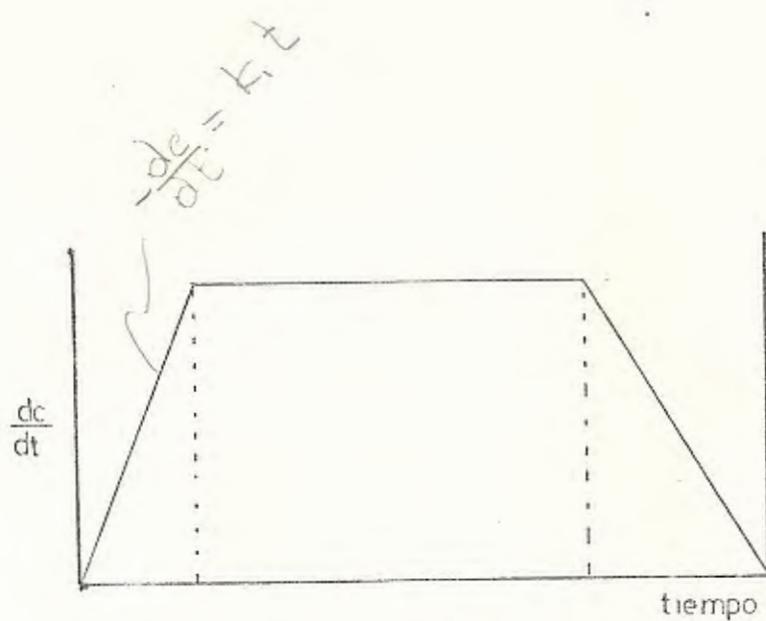


Figura 21 Rapidez de descarburización

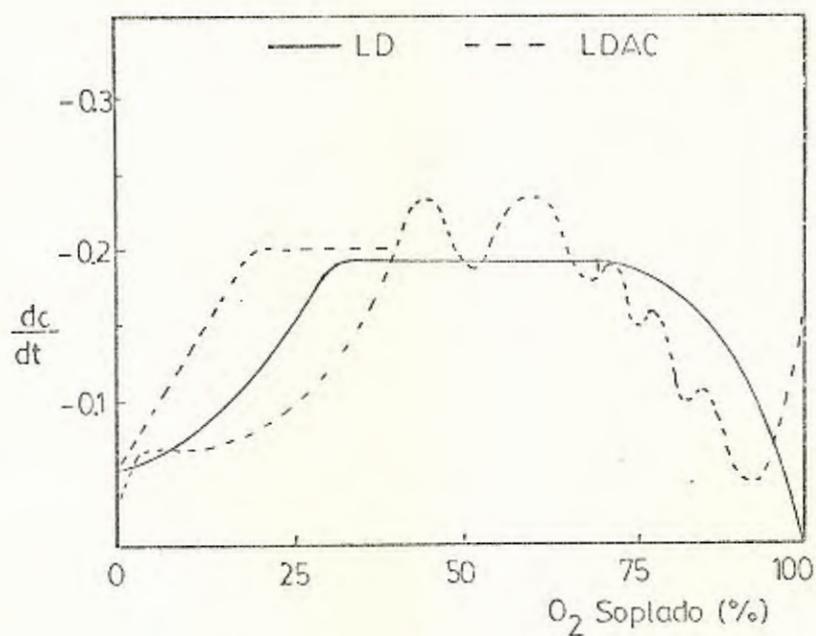


Figura 22 Típica curva de la tasa de descarburización.

K_1 depende del contenido de Silicio del acero y de la temperatura del hierro, en el segundo período:

$$\frac{-dc}{dt} = K_2$$

K_2 depende de la razón de oxígeno en el tercer período:

$$\frac{-dc}{dt} = K_3 c$$

K_3 depende de la razón de flujo del oxígeno, diseño de la lanza.

Mientras estas son condiciones normales, algunos sopladors pueden desviarse considerablemente de este modelo y un ejemplo de esto se ve en la curva de la figura 22.

Considerando la termodinámica de las reacciones de oxidación los factores importantes son el potencial de oxígeno en el sistema escoria-metal gas.

En el sistema Siemens-Martin el oxígeno contenido en el metal líquido muestra alguna relación con el contenido de óxido ferroso de la escoria durante el refinamiento, mientras que en el proceso L D no correlacionan por existir entre el contenido de óxido ferroso de la escoria y el contenido de oxígeno de la masa metálica. En el horno Siemens-Martin los

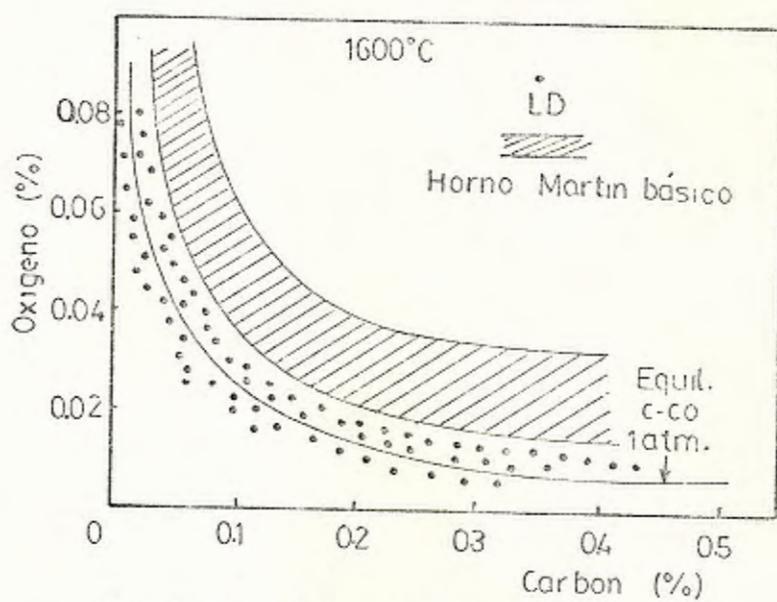


Figura 23 Relacion carbono-oxigeno

productos carbón-oxígeno ($\% C \times \% O$) yacen encima para equilibrar con una atmósfera de $CO + CO_2$ mientras que datos del proceso L. D indican que los productos carbón-oxígeno -al final- están cercanos al valor de equilibrio, cuando el contenido de carbón es menor a 0.5%. Fig. 23.

3.4.3 EL FOSFORO

La desfosforación y descarburación ocurren casi parejas en el proceso de oxidación y alrededor de la mitad del azufre queda eliminado, sin que el óxido FeO juegue el papel de transportador de oxígeno como en el procedimiento Martin.

La desfosforación resulta de la oxidación del fósforo al estado de P_2O_5 , seguida de la combinación del anhídrido fosfórico con la cal de la escoria para formar fosfato tricálcico $P_2O_5 \cdot 3CaO$.

Para una buena remoción del fósforo la actividad del óxido de calcio y el potencial de oxígeno de la escoria debe ser elevado, mientras que el coeficiente de actividad de P_2O_5 sería bajo. Las mejores condiciones se conseguirán con escoria líquida para conducir la saturación con cal o fosfato de calcio. KOZAKEVITCH y RIBOUD han sacado del diagrama de fase una fórmula dando el contenido óptimo de cal en la escoria para conseguir estos puntos:

$$\begin{aligned} \% \text{CaO} &= 1.41 (\% \text{P}_2\text{O}_5 + \% \text{Al}_2\text{O}_3 + \% \text{TiO}_2) \\ &+ 2.61 \% \text{SiO}_2 + \% \text{FeO} - 0.005 (\% \text{FeO})^2 \end{aligned}$$

El potencial de oxígeno de las escorias se lo menciona arriba, tan elevado para el equilibrio FeO/Fe y, mientras esto puede variar en todas partes de la escoria, esto es del orden de 10^{-5} atm. Dentro de estas condiciones la desfosforación podría ser muy favorable.

El contenido final en fósforo es tanto más pequeño cuanto más básica y más oxidante es la escoria.

Siendo la desfosforación una de las características fundamentales de la oxiconversión, los resultados obtenidos son: sobre 19 conversiones LD y OLD los contenidos de fósforo de la fundición inicial eran de 0.07-0.13%. Los contenidos en el acero elaborado eran de 0.01-0.03%. La figura N° 24 muestra los resultados obtenidos en fundición-conversión LD.

De estos resultados se concluye que:

- 1.- El rendimiento de la desfosforación es muy elevado.
- 2.- Este rendimiento es elevado incluso en la conversión parcial para acero duro.
- 3.- La desfosforación y descarburación se efectúan sensiblemente en el mismo tiempo.

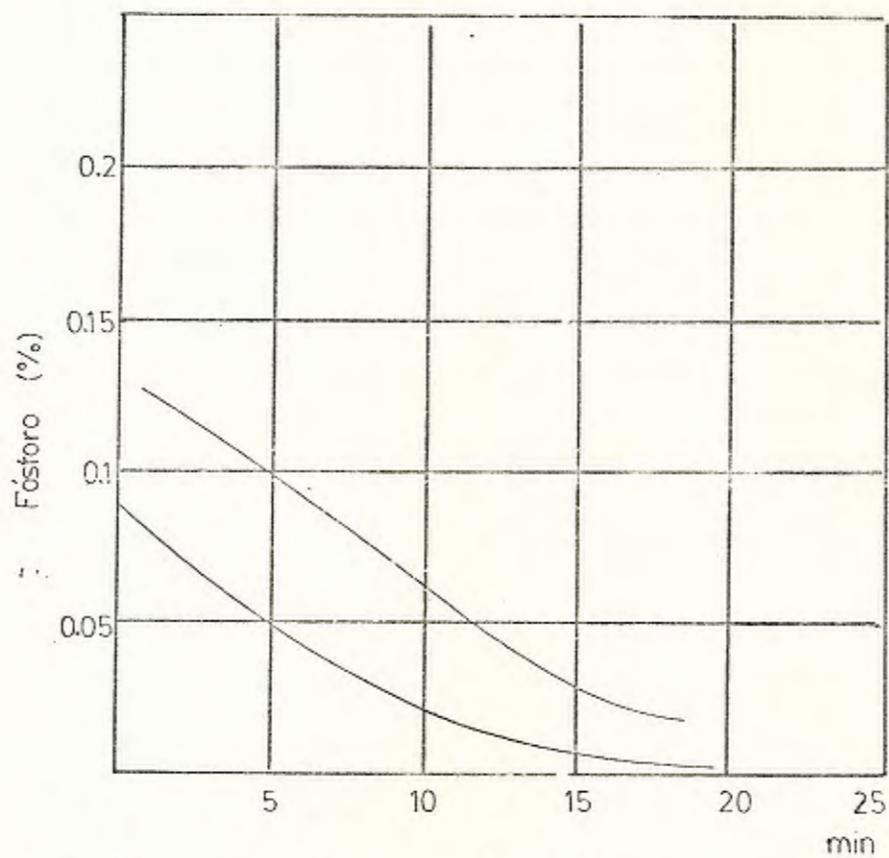


Figura 24 Remocion de fósforo

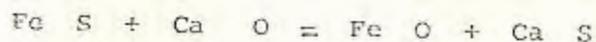
3.4.4 MANGANESO

El Manganese se elimina lentamente después del Silicio porque la escoria es básica (presencia de cal). Se quema al estado de óxido manganese Mn O; además siendo la temperatura elevada, el óxido de manganese es reducido parcialmente por el carbono; por consiguiente, la tasa final de manganese es relativamente elevada.

El contenido al final del afino depende básicamente del contenido de Manganese de la fundición base. En función de los porcentajes iniciales que son 0.3-0.9%, se encuentran al final de la conversión, porcentajes de 0.050 0.20% como se aprecia en la Fig. N° 25.

3.4.5 AZUFRE

La oxidación del azufre apenas puede tener lugar, porque la reacción de oxidación $Fe S + Mn S \rightarrow 2Fe S O_2$ es muy endotérmica; a las temperaturas alcanzadas en el afino del arrabio, es más bien la reacción inversa la que tiende a producirse. El azufre se elimina en estado de Ca S y Mn S disuelto por la escoria pero principalmente por la reacción.



porque siendo la escoria rica en óxido de hierro, la proporción -

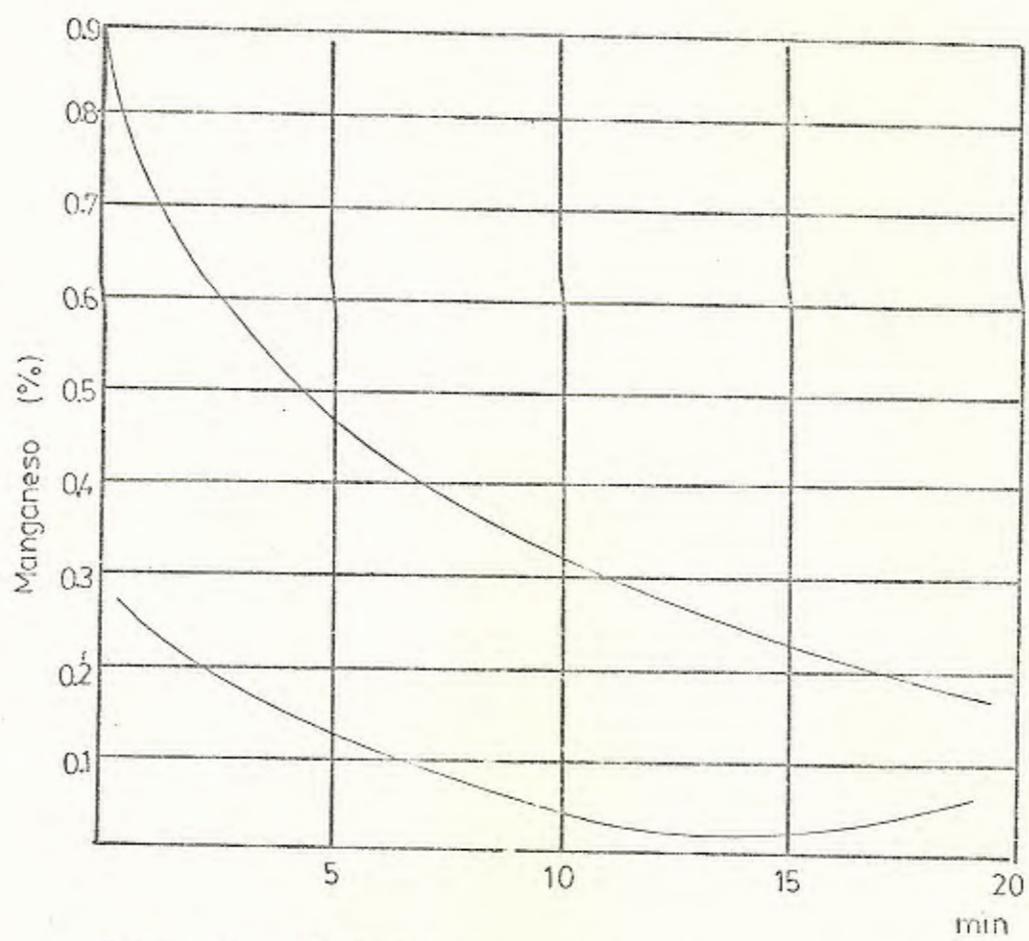


Figura 25 Remoción de manganeso

Sin embargo lo que suele hacerse es aglomerar la magnesita con un aglutinante orgánico o con alquitrán, y someter las piezas a una presión - muy alta porque como carece en absoluto de plasticidad es la única forma de obtener productos compactos.

El cocido hay que hacerlo a muy fuerte temperatura, pues para que sea eficaz hay que volver a ablandar el cemento que liga los granos. Por esto se cuece a temperaturas de 1550 a 1600°C y mejor a 1650°C.

Los ladrillos así obtenidos no se hidratan fácilmente pero de todos modos es conveniente almacenarlos al abrigo de la intemperie.

Los productos refractarios de magnesita resisten mal a los choques térmicos, debido a su alta dilatación, alrededor de 1.5% a los 1000°C.

Para evitar este inconveniente, los americanos fabrican los ladrillos de magnesita con magnesita fritada y comprimida, aglomerada con un aglomerante químico, generalmente cloruro de magnesio y sin cocer pero metidos en una caja de metal muy delgada que los recubre por tres o cuatro lados(12).

3.5.2 DOLOMITA

En realidad la dolomita es más bien un refractario compuesto pero lo incluimos entre los magnésicos por tener propiedades muy -

parecidas al puramente magnésico que es la Magnesita.

DOLOMIA

La dolomía es un carbonato natural doble de cal y de magnesia conteniendo impurezas: sílice, alúmina, óxido de hierro en cantidades variables.

Para ser utilizada en siderurgia y especialmente en el horno eléctrico, la dolomía ha de ser suficientemente refractaria para no fundir a la temperatura de elaboración del acero. Esta cualidad se la confiere el contenido en magnesia que no debe ser inferior a 19.5% en el carbonato crudo.

Las impurezas, particularmente la sílice, disminuyen las cualidades refractarias; una buena dolomía metalúrgica no debe contener, antes del fritado, más del 2% de SiO_2 y en total más del 4% de impurezas. El exceso de sílice, es un inconveniente también para la impregnación con alquitrán para la fabricación de apisonados. Un contenido en SiO_2 superior a 3.5% en la dolomía cruda es ya prohibitivo. Sin embargo, un cierto contenido en impurezas, siempre inferior al señalado, es deseable para dar después del fritado una estructura cristalina más gruesa y un producto final más compacto(12).

El análisis de una dolomía cruda para ser empleada en siderúrgica debe estar comprendida en los límites siguientes:

SiO_2	0.5 a 3.0%
$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$	0.8 a 2.5%
CaO	29 32.5%
MgO	mayor de 19.5%

FRITADO

En el horno eléctrico se emplea la dolomía en el estado fritado, esto es después de haber sufrido una descarbonatación seguida de un comienzo de fusión.

El fritado no se efectúa en los talleres de acero al horno eléctrico porque la instalación para ello no trabajaría con un buen aprovechamiento.

El fritado puede hacerse en hornos de cuba alternando capas de dolomía-cruda triturada y capas de cok, como en los hornos de cal, o también en hornos giratorios calentados con fuel oil, gas o carbón pulverizado.

La descarbonatación se efectúa entre los 600°C y los 1000°C. El fritado comienza hacia los 1200°C y continúa hasta los 1500°C ó 1600°C.

El horno giratorio, calentado con petróleo o con gas, tiene la ventaja-

de no introducir sílice suplementaria con las cenizas de cok y además el fritado es más regular y puede llevarse a límites mayores con lo que se obtiene un producto más denso, que no tiene trozos sin cocer y que se conserva durante más tiempo sin alterarse.

Es un inconveniente la facilidad con la que se hidrata al contacto del aire libre, haciéndose polvo, por ello hay que conservarla en recipiente bien cerrado con una pequeña abertura para extraerla y no se debe tener una existencia para más de ocho o diez días, aunque esto depende del consumo y de la efectividad de aprovisionamiento{12}

ALQUITRANADO

La dolomía se suele adquirir ya preparada, esto es, fritada y alquitranada.

El alquitranado tiene una doble misión de proteger a la dolomía de la hidratación y de hacer de materia ligante el apisonado.

El alquitrán debe responder a las condiciones siguientes:

- 1º.- Estar completamente excente de agua.
- 2º.- Ser suficientemente fluido para impregnar a todos los granos de dolomía y recubrirlas con una película delgada pero sin solución de continuidad.

- 3°.- Ser suficientemente viscoso a la temperatura de experimentación para que el producto obtenido tenga una suficiente cohesión antes de la cochura.
- 4°.- Que después de la cochura deja una matriz resistente y refractaria en la cual queden englobadas los granos de dolomía:

Para conseguir estas características hace falta que el alquitrán, esté completamente deshidratado, que contenga solamente trazas de aceites ligeros que destilan por debajo de 170°C y que el contenido de brea varía entre 55 y 65%.

La cantidad de alquitrán que hay que emplear es de 8 a 12% del peso total de la mezcla. Cuanto más fritada esté menos alquitrán absorberá.

Para alquitrán la dolomía hay que emplear alquitrán calentado a 80° o 100°C si está completamente seco pero si hay dudas respecto a su humedad hay que calentarlo durante algunos minutos a 120°C, también es conveniente calentar previamente la dolomía pues siendo su peso unas nueve veces mayor que el del alquitrán, al añadirla para efectuar la mezcla lo enfriaría.

La dolomía Crospi, muy usada hoy día no es más que una dolomía cocida dos veces, una tal como viene, para descarbonatarla y después de reducida a polvo fritada.

Con este tipo de dolomía, es la primera carga líquida del horno la que produce la aglomeración de los granos por una fusión de la capa superficial de los granos finos que la constituyen.

Como la dolomía se hidrata fácilmente, debido a la presencia de la cal, se procede a estabilizarla para que sea menos hidratable.

Como simplemente por temperatura la cal no se vuelve inerte para el agua, hay que proceder a fijarla de alguna manera de modo que quede estable y al mismo tiempo refractaria. Parece que el mejor medio de fijar la cal es transformarla en silicato tricálcico (que es el elemento esencial de los cementos hidráulicos artificiales). Pero es de capital importancia que no se forme silicato bicálcico al que durante el enfriamiento a los 675° sufre una transformación cristalina con hinchamiento que reduce la masa a polvo. Este silicato bicálcico puede a su vez ser estabilizado con la presencia de un óxido apropiado. El mejor parece ser el de hierro.

Para formar el silicato tricálcico se añade serpentina $3 \text{ MgO } 2 \text{ SiO}_2$ $2 \text{ H}_2\text{O}$ con una proporción de hasta 15%. También se añaden algunas centésimas de óxido de hierro para estabilizar el silicato bicálcico que se haya podido formar.

Como el silicato tricálcico no es estable más que entre las temperaturas comprendidas entre 1300° y 1900° la estabilización debe efectuar-

se a temperaturas que prácticamente están comprendidas en 1450° y 1600°.

El enfriamiento debe ser rápido para que no se disocie el silicato-tricálcico por debajo de los 1300° y forme silicato bicálcico que sufre una expansión a los 675°.

La dolomía tratada así queda estabilizada para unos 6 meses para granos de un tamaño superior a los 5 mm(12)

3.6 CONTROL METALURGICO

El objetivo del afino es, generalmente, no la obtención de un producto tan rico en hierro como sea posible, sino la realización de un acero de composición química dada. Al final del afino, los contenidos en Carbono, Silicio, Manganeso pueden ser demasiado pequeños: por consiguiente, es necesario ajustar el baño a la composición requerida.

Por otra parte, en el caso de aceros aleados, es preciso introducir los elementos correspondientes forma de metales ó, lo más frecuente, en forma de ferroaleaciones.

Esta fase de puesta a punto está más o menos enlazada con la fase de reducción, y en particular en el caso de los aceros al carbono, las

adiciones hechas al final de la operación tienen por objeto realizar a la vez la desoxidación del óxido de hierro y conseguir la composición requerida del acero.

Todo esto se desarrolla en el convertidor o bien en la cuchara de colada, pero para hacer todo lo mencionado en forma eficiente es indispensable realizar los correspondientes análisis de control metalúrgico, los cuales nos dirán que tan cerca nos encontramos de los valores previstos teóricamente.

El control metalúrgico puede dividirse en:

- Control de propiedades mecánicas
 - Control de microestructura
- que nos certificarán si el material cumple o no con las normas.

3.6.1 ANÁLISIS QUÍMICO

Antes de comenzar el proceso se debe realizar un análisis químico completo del material a fundirse y de la chatarra que se agregará antes de iniciar el soplado.

Existen dos tipos de control dentro de lo que corresponde a este análisis: Análisis de control de proceso y análisis de control de calidad.

El primero se realiza durante el proceso mismo, es decir conforme se vayan realizando las diferentes etapas durante el afino y de esta manera lograr un cierto control de parámetros. El control consiste en detener el soplado en un tiempo determinado, obtener una muestra y comprobar que tan bajo está el contenido de carbono sometiendo la muestra a un ensayo de doblado con un golpe de martillo como se muestra en la figura N° . Si rompe sin dificultad se continúa inyectando oxígeno y se repite la acción: si no ocurre así y logra doblarse estaremos frente a un acero.

Una vez terminado el soplado, se hacen las adiciones convenientes, se cuela para obtener muestras y realizar los análisis químicos en el laboratorio entrando así al control de calidad que nos certifica que lo realizado en la primera parte se encuentra dentro de los valores requeridos, confirmando así los resultados del laboratorio.

De acuerdo a los medios con que se cuente, el análisis químico se lo puede realizar en forma inmediata lo cual dura escasos minutos, siempre que se tenga un equipo tan sofisticado como lo es un computador digital acoplado a un espectrómetro. Con estos los resultados se los obtienen tan rápido pudiendo ser leídos en pantallas de TV. y realizar correcciones automáticamente,

En nuestro caso y en medios donde no es posible contar con esos equipos, las muestras se las obtienen ya solidificadas para analizarlas-

y compararlas con los cálculos teóricos hechos previamente.

El análisis químico es tan importante porque de él dependen las cantidades de oxígeno, los porcentajes y cantidades de desoxidantes necesarios en el proceso de reducción así como el resto de parámetros (altura de la lanza, superficie del baño, presión de soplado etc.) que pueden variarse hasta conseguir las condiciones más óptimas.

3.6.2 EFFECTOS DE IMPUREZA

Como es lógico suponer las impurezas, cualquiera que sea su naturaleza, tienen una marcada influencia sobre la calidad del acero fabricado; así temenos que la presencia de óxidos, de inclusiones, o bien el exceso y la ausencia de ciertos elementos necesarios - afectan directamente a las propiedades mecánicas y al tamaño de grano del acero.

En lo posible hay que realizar un cálculo estimativa de cada uno de los elementos aditivos a fin de evitar la formación de óxidos - que serían perjudiciales en la calidad de las piezas.

El elemento más nociso es el óxido ferroso que muchas veces no logra incorporarse del todo a la escoria quedándose en el material. Es por esto que al final del afino se añade Aluminio para lograr que el exceso de oxígeno se combine con el anterior y pueda elimi

narse, porque de no hacerlo las piezas se presentarán porosas.

Otro factor que influye mucho es la calidad del refractario porque los tradicionales pierden de 1 a 2 mm. por colada incorporándose parte a la escoria y parte al material fundido. De aquí que haya usado ladrillos de Magnesita porque en ellos el desgaste se manifiesta solamente después de algunas coladas (10-20), en forma de una escamadura superficial.

Un inconveniente de los aceros al oxígeno es que por ser de alta pureza, el contenido de Nitrógeno es bajo dando lugar a que su límite de elasticidad y resistencia a la tracción sea inferior a los aceros Thomas e incluso a los Martin. Para paliar este inconveniente eventual, una solución puede ser aumentar el porcentaje de Mn.

Hay relación entre el porcentaje de nitruro de aluminio y la tendencia al aumento del tamaño de grano austenítico, por lo que es de esperar que los aceros al oxígeno, pobres en Nitrógeno, sean de grano grueso. Sin embargo, este aumento del tamaño de grano se da sobre los 1.000 C, que es superior a los tratamientos normales y clásicos de normalizado.

CAPITULO IV

TRABAJO EXPERIMENTAL

4.1 INTRODUCCION

De acuerdo con la proposición descrita en el capítulo uno de este trabajo se establece que la solución más obvia para la fabricación de acero moldeado en nuestro medio y en todo el Ecuador, es el uso de la técnica denominada "Acero de convertidor LD", que consiste en inyectar oxígeno casi puro (98%) directamente sobre la superficie del baño metálico contenido en el convertidor cuyo revestimiento es de tipo básico.

Así el trabajo experimental está orientado a relatar los éxitos y tropiezos que se lograron en alcanzar a dominar dicha técnica, al mismo tiempo que se describe de la mejor manera para que pueda ser asimilada por los fundidores locales.

Es necesario mencionar que la tarea no fue sencilla ni rápida, pues hubo muchos contratiempos y obstáculos que vencer debido a las condiciones del medio en que se desarrollaron las experiencias y a la disponibilidad de equipos y adquisición de materiales.

Uno de los inconvenientes en el desarrollo de la experimentación

fue la adquisición de la tubería para la construcción de la lanza de oxígeno, al igual que sucedió con el material refractario ya que es un material que comercialmente no es posible conseguirlo a parte de que es costoso. Ante esta situación se tuvo que recurrir a Empresas particulares y aprovechar aquellos materiales que no eran utilizados por ser considerados chatarra.

En total se realizaron cuatro experiencias en períodos de tiempo irregulares porque se debía aprovechar los días en que la fundición W y Z, local en donde se realizaron todas ^{las} experiencias, laborara en forma continua, pero aprovechando siempre al máximo esos períodos para corregir, aumentar o suprimir factores que se consideraban de suma importancia para el mejor desarrollo de las operaciones en el proceso.

El equipo utilizado estaba compuesto de:

1.- Un cubilote como el mostrado en la Fig. 27 con las siguientes características:

Diámetro interior = 50 cm.

altura de crisol = 30 cm.

altura de la cama de coke = 125 ~~cm~~ cm

ventilador centrífugo: 75 Hp, 075 psi de presión 850 CFM.

operación discontinua (sangrado intermitente) con aire frío.

relación metal coke = 8/1.



Figura 27. Cubilote de 50 cm de diâmetro interior.

2.- Una lanza de oxígeno refrigerada por agua con tres tubos de co
bre colocados en forma concéntrica. En el extremo inferior lleva u
na boquilla de cobre; la longitud total es de 1.20 m. En la figura
28 se ve un esquema de la construcción y funcionamiento de la lan-
za y la Figura 29 muestra una fotografía de lanza terminada, notán-
dose claramente en la parte superior la entrada de oxígeno y late
ralmente la entrada y salida de agua respectivamente.

3.- Un convertidor pequeño de 100 Kg. de capacidad revestido con
ladrillos de Magnesita y el fondo apisonado con ladrillo molido. A
continuación se dan los detalles de la construcción del convertidor
acompañado de una figura del recipiente con las características más
importantes. En la Figura 30 se muestra el convertidor terminado y
listo para su operación.

CALCULO DE LAS DIMENSIONES DEL CONVERTIDOR

Teniendo en cuenta los valores de instalaciones industriales en
cuanto a volumen específico por tonelada de acero, establecido en
tre 0.65-0.85 m³/ton. se puede calcular el volumen del recipiente
de la siguiente forma:

Tomando el valor de 0.75 dm³/Kg. como volumen específico se tiene:

$$0.75 \text{ dm}^3/\text{Kg.} \times 100 \text{ Kg.} = 75 \text{ dm}^3 \text{ de volumen interior.}$$

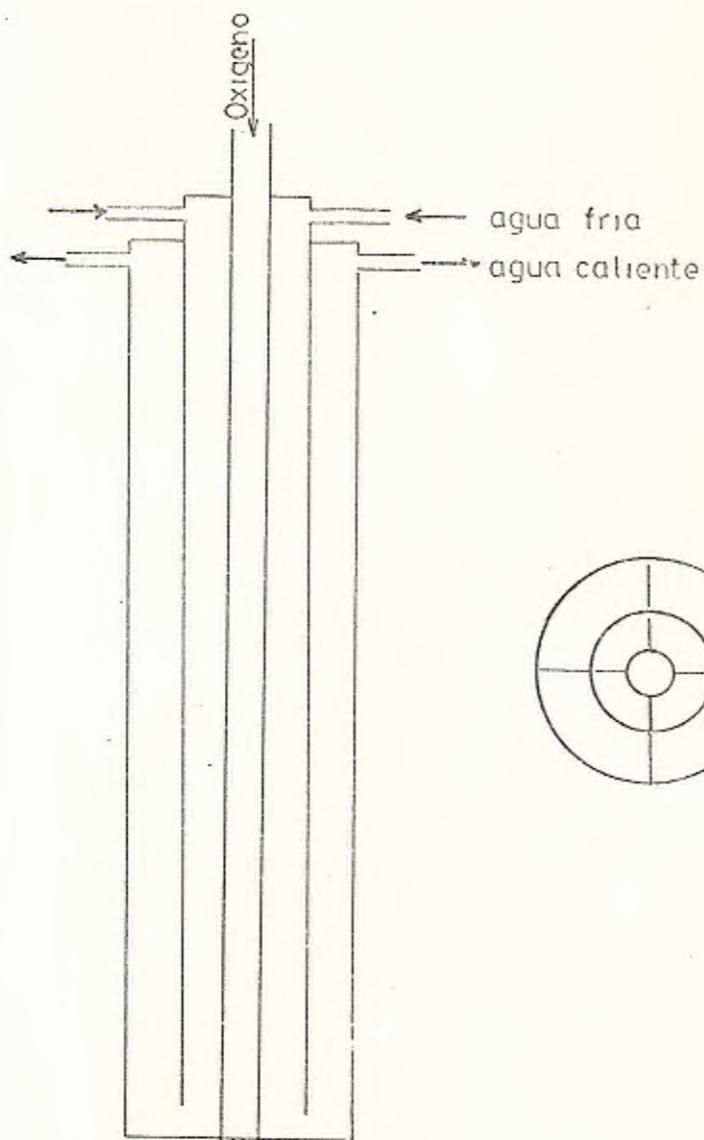


Figura 28

Esquema de la lanza de oxígeno usada en las pruebas.

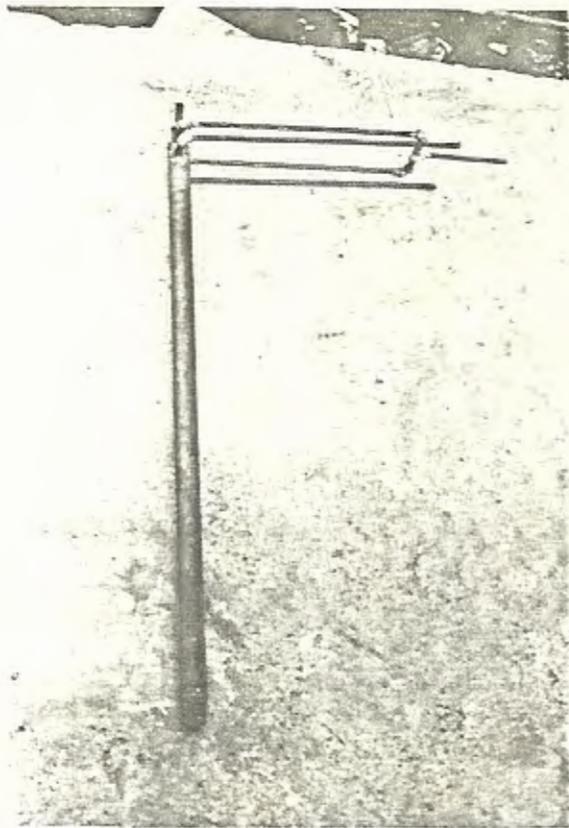


Figura 29. Lanza de oxígeno refrigerada por agua.

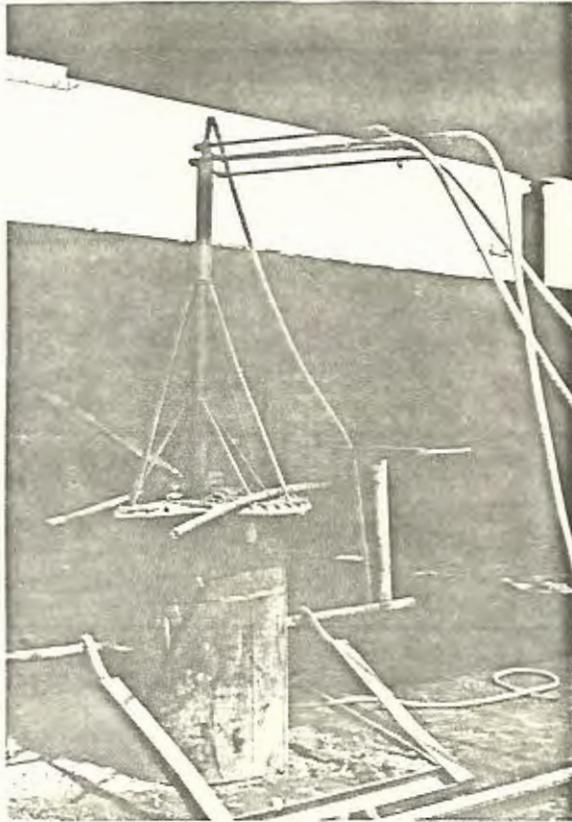
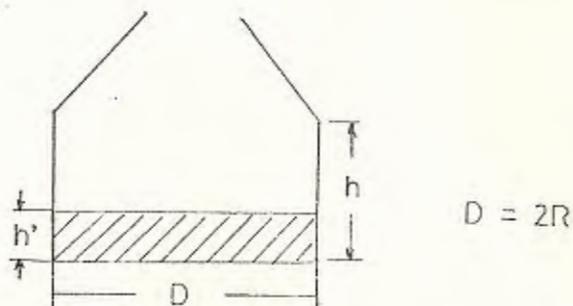


Figura 30. Convertidor experimental de 100 Kg.
mostrando acoplamiento de cuba y tapa portalanza con canalón para suministro de cal

Sabiendo que el cociente, entre la altura del baño y el diámetro útil del convertidor, en la práctica industrial se encuentra entre 0.3 y 0.4 se da 55 dm^3 a la parte cilíndrica y 20 dm^3 a la troncocónica.

Tomando la densidad del arrabio como 7.8, se tiene:



$$V = \pi R^2 h' = \frac{m}{d} = 100/7.8 = 12.82 \text{ dm}^3$$

$$\frac{h'}{D} = 0.35$$

$$\pi R^2 \cdot 0.35 D = 12.82$$

$$R^3 = 5.83$$

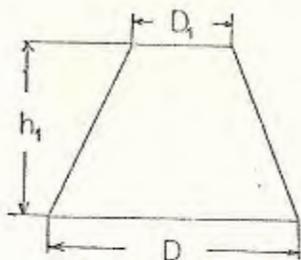
$$R = 1.8 \text{ dm}$$

Por consiguiente $D = 3.6 \text{ dm}$ y $h' = 1.26 \text{ dm}$, que es la altura del baño; como se tomó 55 dm^3 de volumen para la parte cilíndrica

$$55 \text{ dm}^3 = \pi R^2 h$$

$$h = \frac{55}{\pi (1.8)^2}$$

$$h = 5.4 \text{ dm}$$

CALCULO DE LA ALTURA DEL TRONCO DE CONO

$$D_1 = 1.8 \text{ dm}$$

$$D = 3.6 \text{ dm}$$

$$V = 20 \text{ dm}^3$$

$$V = \frac{1}{3} h_1 \pi (R^2 + R R_1 + R_1^2)$$

$$20 = \frac{1}{3} h_1 \pi (1.8^2 + 1.80 \times 0.9 + 0.9^2)$$

$$h_1 = 3.37 \text{ dm.}$$

CALCULO DEL CONSUMO DE OXIGENO

El consumo de O_2 se hizo teniendo en cuenta que pueda considerarse como medida el de $60 \text{ m}^3/\text{Tn.}$, que la capacidad aproximada de las botellas de oxígeno es de 6 m^3 y que la presión inicial-
 150 Kg/cm^2 .

Suponiendo un tiempo de soplado aproximado de 10 min., el caudal será $0.6 \text{ m}^3/\text{min.}$

Si el diámetro de salida de la lanza de oxígeno es 1.27 cm (1/2Pg)
 el Radio = 6.4 mm. = 0.0064 m.

El área de la sección es

$$A = \pi R^2 = (0.0064)^2 \times \pi = 1.29 \times 10^{-4}$$

Luego el flujo

$$Q = v \times 1.29 \times 10^{-4} = 0.6$$

de donde la velocidad de salida del oxígeno en las boquillas es

$$v = \frac{0.6}{1.29 \times 10^{-4}}$$

$$v = 4651.16 \text{ m/mi}$$

$$v = 77.52 \text{ m/seg}$$

4.- Botellas de oxígeno, convencionales para oxicorte, de 6 m³ de capacidad como las que se ven en la Fig. 31.

5.- Moldes pequeños de arena de Sílice-bentonita-agua. Figura 32.

6.- Un pirómetro óptico.

7.- Un cronómetro.

El arrabio de partida para todas las experiencias se pensó en primera instancia que debía ser como el de las instalaciones LINZ (4.2% de carbono) pero en nuestro medio en donde solo se cuenta con fundiciones pequeñas, no es posible obtenerlo ya que dicho arrabio es de alto horno. De aquí que la única solución es partir de un arrabio de menor contenido de carbono (3.0-3.5% C) pro



Figura 31. Botellas de oxígeno comercial.



Figura 32. Moldes para muestreo.

ducido fácilmente en cubilote aprovechando que existe un rango de composición más o menos amplio con el que se puede trabajar.

Como es lógico suponer, durante el desarrollo de las experiencias se tuvo diversas limitaciones con respecto a la cantidad de metal fundido; una de ellas era la de obtener acero para moldear piezas pequeñas y sobre todo la capacidad limitada del cubilote. Súmase a éstos el problema de la capacidad de las botellas de oxígeno - comercial y el hecho de que a menor masa mayor es el enfriamiento lo cual ocasiona un problema en el momento de colar.

Entonces, relacionando el consumo de oxígeno por toneladas con los factores mencionados anteriormente, se tomó la decisión de tr
bajar con 100 kg. de arrabio de cubilote.

Vencidos la mayor parte de los inconvenientes se efectuaron cuatro experiencias de acuerdo a la técnica descrita en los primeros capí
tulos y que se vuelve a mencionar.

Primero se recoge el arrabio saliente del cubilote, al mismo tiem
po que se toma una muestra de la fundición de partida, y se lo co
loca en el convertidor. Figura 33. A continuación se la adiciona-
cal manualmente aunque se lo pueda hacer directamente en el con
vertidor antes de ser llenado.



Figura 33. Colocación del arrabio en el convertidor

El siguiente paso es colocar la lanza de oxígeno verticalmente y lo más centrada posible. Se inyecta entonces el oxígeno observándose en los primeros minutos presencia de llamas y gran cantidad de humos espesos; luego las llamas aumentan de tamaño haciéndose más brillantes desapareciendo en parte la cantidad de humo al mismo tiempo que cambia su coloración. El soplado dura de 8 a 10 minutos y es cuando las llamas descienden por la boca del recipiente lográndose un contenido de carbono de 0.05%. En este momento se retira la lanza y se procede a agregar las ferroaleaciones y el Aluminio, cumpliéndose así las fases de afino.

Finalmente se bascula el convertidor, se toma muestras para los respectivos análisis y se realiza el colado.

4.2 ELABORACION DE LA FUNDICION BASE

Para la elaboración del material de partida en la fabricación de acero se utilizó el cubilote mencionado con anterioridad tratando de introducir chatarra de hierro gris clasificada para obtener un arrabio de una composición que encaje en el amplio rango de los tipificados en las composiciones LINZ.

El propósito es tratar de mantener una composición química uniforme ya que existen otros parámetros tales como presión y caudal

de oxígeno, distancia lanza-nivel de baño, etc., que hacen que el problema se vuelva cada vez más complejo. Es por esto que se optó por partir de un arrabio de chatarra de hierro gris existente en stock. Entonces lo que se hizo fue operar el cubilote en la forma convencional pero en el momento de dar inicio al proceso de fabricación de acero se cogió una muestra del arrabio justo en el momento en que salía del cubilote para realizar un análisis preliminar en el microscopio y luego determinar el porcentaje de cada uno de los elementos con los análisis químicos correspondientes, de tal manera que se pueda establecer la composición química verdadera de la fundición base.

4.2.1. SELECCION DE MATERIAS PRIMAS

Como es conocido, la existencia de un rango amplio de composición fue un factor predominante para que no se hiciera severa clasificación de la chatarra. Además, debido a la pequeña cantidad (100 Kg.) con la que se trabajó se creyó conveniente no utilizar chatarra de acero para introducir la en el convertidor antes de llenarlo con el arrabio del cubilote.

Debe ser más efectivo tener una materia prima con composición química definida tal como se lo hace en LINZ pero de

bido a tantas limitaciones para realizar experiencias no fue posible lograrlo.

Lo que se tomó como materia fue entonces chatarra de hierro gris para piezas moldeadas tal como se mencionó en acápite anterior.

4.2.2. CALCULO DE CARGAS PARA CUBILOTE

Los elementos que necesitan un control para la obtención de la fundición base son: Carbono, Silicio, Fósforo, Azufre y Manganeso. Unos se encuentran en mayor o menor porcentaje por lo que se hace necesario realizar un cálculo previo a fin de estimar los porcentajes requeridos de cada uno.

Existe un método analítico para el cálculo de carga de acuerdo con la chatarra stock. Este cálculo se encuentra desarrollado en la tesis de grado del Ing. Carlos Cisneros - que es verificado posteriormente a través de análisis químicos de laboratorio. El estableció que no existe una desviación muy grande entre la composición química estimada con cálculos de las típicas de los materiales que se usan en la chatarra y el análisis químico hecho posterior a la fusión de dicha materia prima. Ante esto es factible tomar como base una composición definida de acuerdo al

método mencionado habiéndose tabulado los resultados de sus experiencias los mismos que se muestran en el Apéndice.

Debido a las condiciones de trabajo y de tiempo de la empresa donde se realizaron las experiencias no fue posible llevar a cabo esta actividad, de manera que se decidió trabajar solamente con el material saliente del cubilote sin establecer un análisis químico o cálculo alguno a priori.

4.2.3. CONTROL DE COMPOSICION QUIMICA

Los aceros como es sabido contienen una cantidad apreciable de Silicio, Fósforo, Azufre y Manganeso. Comercialmente son producidos en rangos bastante amplios de composiciones. De aquí la importancia de un análisis químico minucioso tanto del material empleado como fundición base como del acero(s) obtenido.

En lo que respecta al análisis químico de la fundición base podríamos basarnos en tablas y gráficos o cualquier otra bibliografía con que se disponga en donde se mencione en forma aceptable la composición de dicha fundición.

Para hacer el proceso más riguroso se procede a tomar una muestra del metal base antes de introducirlo en el converti

dor. Esto es, colar un poco de material en moldes pequeños y luego de enfriados llevarlos al laboratorio y determinar con preferencia los contenidos de carbono y azufre. De esta manera se tiene la composición química inicial para luego variarla o no, de acuerdo a los resultados finales, a los que también se los analiza químicamente.

Los análisis químicos se los realiza en dos fases: La primera que corresponde al carbono y Azufre, realizados en el determinador electrónico y la segunda por diferentes reactivos para el Silicio, Manganeso y Fósforo.

4.2.4. ACERACION

Esta etapa comprende todo lo concerniente a inyección de oxígeno una vez que ha sido cargado el convertidor.

En las experiencias realizadas se agregó cal, unas veces sobre el arrabio justo segundos antes de iniciar la inyección de oxígeno, en la mitad del proceso y en otra se añadió la cal antes de introducir el arrabio en el recipiente. A continuación se inició el soplado cuya presión de salida osciló entre 80 y 150 psi.

Con el soplado se vió un intenso burbujeo acompañado de ruido y vibraciones. Además se observó en los primeros minutos la presencia de llamas y abundante humos espesos.

A continuación las llamas aumentaron de tamaño, aumentando también el ruido y las vibraciones. Este período de descarbonización dura alrededor de 8 y 10 minutos hasta el momento en que las llamas descienden con la presencia de humos rojizos lo cual nos indica que el hierro ha comenzado a oxidarse y que la descarbonización ha alcanzado un valor de 0.05%. Inmediatamente se retira la lanza y se hacen las adiciones de las ferroaleaciones y del aluminio para desoxidar.

4.2.5. DESOXIDACION

El proceso de desoxidación comprende la última fase de la marcha del afino. Como hemos mencionado anteriormente al final del soplado existe cierta cantidad de oxígeno incorporado al baño formando óxido con la mayor parte que la constituye el hierro. Como es sabido la presencia de óxidos o impurezas en los aceros repercute en sus propiedades lo cual es indeseable. Además del carbono se eliminan también cantidades considerables del resto de constituyentes y es aquí en esta fase en donde se realiza su recuperación.

Las ferroaleaciones utilizadas para cumplir con lo ya mencionado son ferrosilicio y ferromanganeso que a más de actuar como elementos recuperativos actúan también como desoxidantes. En las ocasiones en que no se tenga una escoria lo suficientemente reductora, al final de esta operación, se hecha sobre el baño una cantidad determinada de Aluminio por su gran poder desoxidante teniendo así un metal exento de óxidos.

Las cantidades adicionadas se hicieron en base a lo que - perdió cada elemento y considerando la cantidad final deseada. Así se hechó 350 gr. de ferrosilicio al 75% de concentración y 450 gr. de ferromanganeso al 80%. La cantidad de Aluminio necesaria fue de 200 - 250 gr. previamente calculada.

4.3 MUESTREO PARA ENSAYOS DE LABORATORIO

La toma de muestras se llevó a cabo de acuerdo con las experiencias que se enlistan a continuación en forma de cuadro en las que se incluyen los diferentes factores que involucran el proceso LD.

De acuerdo a una metodología del CENIM (Centro de Investigaciones Metalúrgicas) de España, se preparó moldes de arena en forma de barras como los de la Fig. 34 para ser llenados y posteriormente-

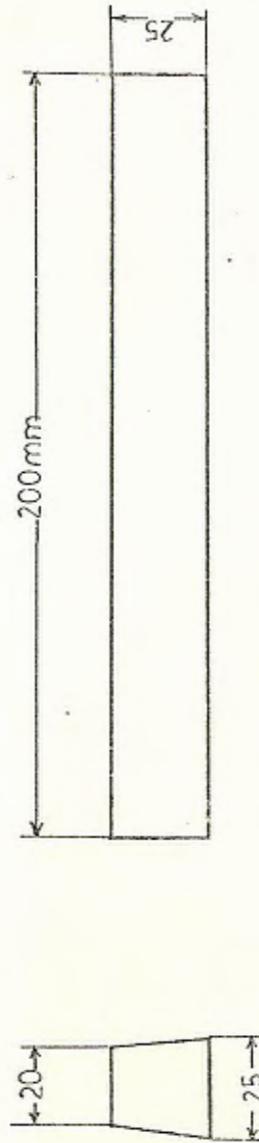


Figura 34. Barra para ensayo de doblado: Escala 1:2

iban a someterse a ensayos de doblado para un control rápido del resultado del gaseado, lo cual no fue factible dado que las condiciones de desoxidación efectiva y en otras se obtuvo material listo para llenar moldes. Sin embargo todavía se tenía un material con elevado contenido de carbono dentro de lo que se considera a a cero; pero en la última experiencia se obtuvo resultados positivos por lo que se decidió no romper la probeta para lograr un ensayo de tracción en una de las máquinas del laboratorio.

En la figura 35 y 36 se observa el instante en que se efectuó la obtención de muestra y el colado respectivamente.

En la figura 37 se puede ver la sección transversal de dos probetas de acero. La que tiene una sopladura en la parte superior corresponde a aquella en que existe un exceso de oxígeno después del soplado (acero sin calmar) y la otra que no presenta esa característica es de un acero exento de oxígeno (acero calmado).



Figura 35. Obtención de muestra para análisis metalográfico, químico y de tracción.



Figura 36. Colado de piezas.



Figura 37. Influencia del exceso de oxígeno en el acero. Se observa una muestra sin desoxidación y otra desoxidada con Al.

EXPERIENCIA N°1

Carga de arrabio	100 Kg.
Carga de chatarra de acero	
Carga de cal	10 Kg.
Diámetro de la boquilla	3/16"
Distancia lanza-nivel de baño	30 cm.
Presión de agua	2 atm.
Presión de gaseado	8 atm.
Tiempo de inyección	2 min.
Cantidad de ferrosilicio	
Cantidad de ferromanganeso	
Cantidad de aluminio	

OBSERVACIONES:

Debido a la inexperiencia en este tipo de proceso y a la falta de equipo e instalaciones inadecuadas no fue posible realizar la experiencia completa.

EXPERIENCIA N°2

Carga de arrabio	100 Kg
Carga de chatarra de acero	
Carga de cal	5 Kg.
Diámetro de la boquilla	3/16"
Distancia lanza-nivel de baño	30 cm.
Presión de agua	2 atm.
Presión de gaseado	6 atm.
Tiempo de inyección	5 min.
Cantidad de ferrosilicio	
Cantidad de ferromanganeso	
Cantidad de aluminio	300 gr.

OBSERVACIONES:

En esta experiencia se logró resultados más positivos ya que se logró establecer la resistencia del refractario y comprobar que la presión de agua era suficiente. La adición de cal se hizo al inicio del soplado. Además durante los primeros minutos del proceso se pudo ver la presencia de humos espesos y oscuros acompañados de una llama pequeña. Luego ésta aumentó de tamaño, haciéndose más brillante, reduciéndose la cantidad de humos.

Aunque no se pudo obtener acero se logró un verdadero acercamiento al proceso. En la Figura 38 (a-b) se observa el momento de preparación de lanza de oxígeno.

EXPERIENCIA N° 3

Carga de arrabio	150 Kg.
Carga de chatarra de acero	
Carga de cal	5 Kg.
Diámetro de boquilla	3/8"
Distancia lanza-nivel de baño	20 cm.
Presión de agua	2 atm.
Presión de gaseado	3 atm.
Tiempo de inyección	7 min.
Cantidad de ferrosilicio	
Cantidad de ferromanganeso	
Cantidad de aluminio	

OBSERVACIONES

La adición de cal se realizó en dos parte, un 50% al inicio y otro a los dos minutos del soplado por lo cual hubo que detener la inyección de oxígeno. Se comprobó-



Figura 38-a

Colocación de mangueras para suministro
de agua y oxígeno.



Figura 38-b

Preparación de la lanza de oxígeno

que la distancia entre la lanza y el nivel del baño no es apropiada para la cantidad de metal usado, pero fue ventajoso aumentar el diámetro de la boquilla. Al igual que la experiencia anterior, se observó los mismos efectos pero la cantidad de desoxidante no fue lo suficiente. En la Figura 37 se observa la sección transversal de dos probetas. La de la derecha presenta una especie de sopladura debido a que la cantidad de desoxidante no fue suficiente y junto a ella está la correspondiente a un buen calmado.

EXPERIENCIA N°4

Carga de arrabio	100 Kg.
Carga de chatarra de acero	
Carga de cal	2 Kg.
Diámetro de la boquilla	3/8"
Distancia lanza-nivel de baño	12 cm.
Presión de agua	2 atm.
Presión de gaseado	2.8 atm.
Tiempo de inyección	8 min.
Cantidad de ferrosilicio	350 gr.
Cantidad de ferromanganeso	450 gr.
Cantidad de aluminio	250 gr.

OBSERVACIONES:

La cal fue colocada en el convertidor antes del arrabio y el soplado fue continuo. En el momento en que entraron en contacto la cal y el arrabio se vió una llama completamente azulada. En las figuras 39-40-41 se ve la secuencia de la operación. Primero está la presencia de llamas cortas con abundante humo, luego aumentan de tamaño haciéndose más brillantes, disminuyendo los humos y cambiando su coloración. Finalmente se nota el descenso de la llama indicando que el soplado debe parar. Seguidamente se toma muestras (figura 35) y se procede a colar (figura 36).

Algo importante de mencionar es la presencia de espuma en la escoria y de ruido y vibraciones del recipiente.

4.4. CONTROL DE CALIDAD

Una vez obtenidas las probetas de acuerdo a lo mencionado en el acápite anterior, se efectuó el control de calidad de las mismas. De acuerdo con los análisis de microscopía, análisis químicos y mecánicos los resultados están tabulados en los correspondientes cuadros.

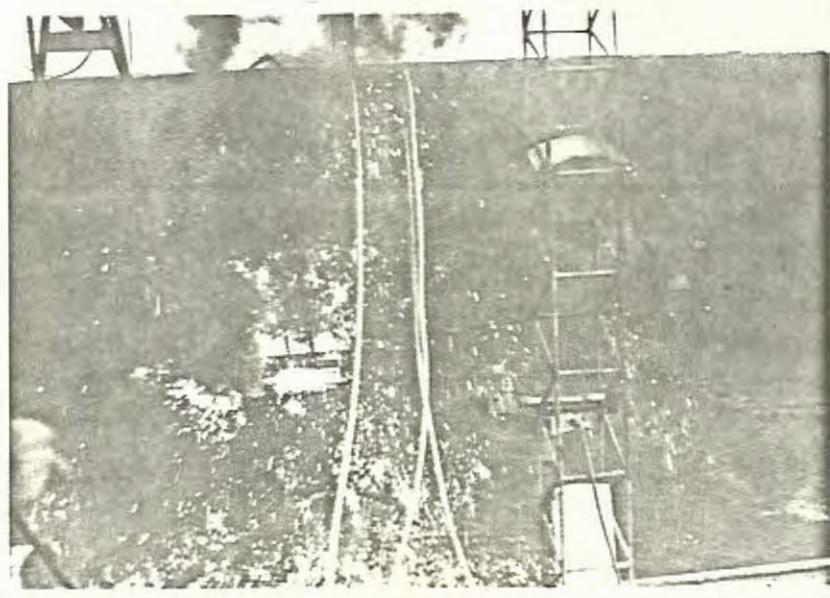


Figura 39. Inicio del soplado.

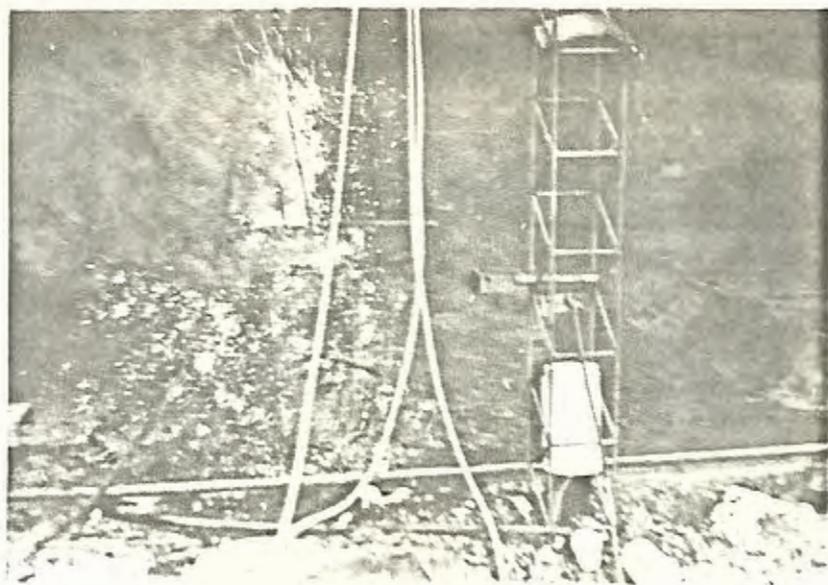


Figura 40. Incremento de las llamas.

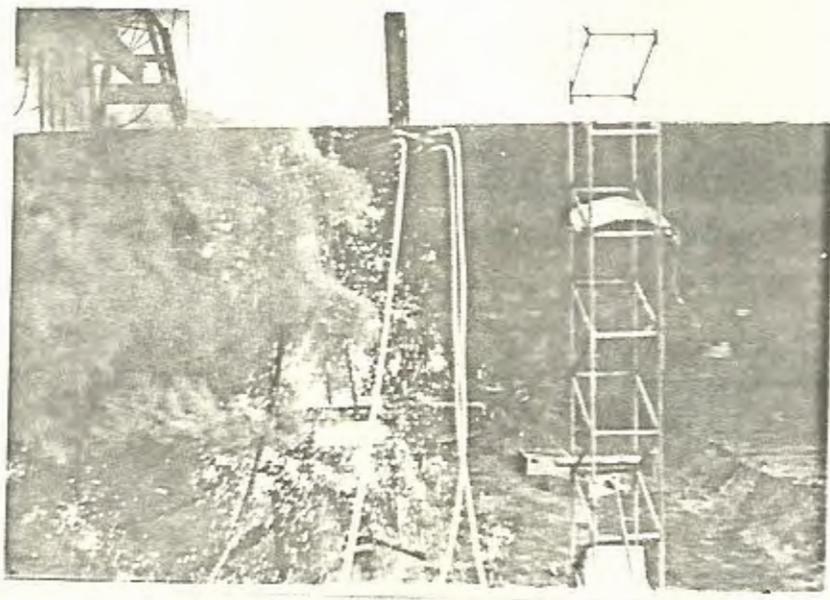


Figura 41. Descenso de las llamas.

4.4.1 ANÁLISIS QUÍMICO

Los resultados de los análisis químicos son:

TABLA II

Experiencias	COMPOSICION						
	CARGA	% C	% Si	% S	% P	% Mn	
1	Arrabio	32	19.5	0.15	0.12	0.75	*
	Metal Soplado	-	-	-	-	-	
2	Arrabio	32	19.5	0.15	0.12	0.75	*
	Metal Soplado	1.32	-	0.076	-	-	
3	Arrabio	3.16	0.36	0.088	0.025	0.42	*
	Metal Soplado	1.36	0.40	0.081	0.068	0.13	
4	Arrabio	3.12	0.06	0.093	0.043	0.45	*
	Metal Soplado	0.09	0.007	0.064	0.040	0.81	

4.4.2 ENSAYOS DE DUREZA

La dureza es una propiedad de los cuerpos que podría definirse como la oposición que presentan los cuerpos a la penetración por otro. Esta propiedad no constituye una ca

racterística fundamental de los materiales, sino que esta relacionada con las propiedades plásticas y elásticas. Esto es el motivo por lo que los valores obtenidos por cualquier método, sean valores relativos que permitan comparar unos materiales con otros.

La medición de la dureza constituye uno de los medios más utilizados, tanto por su rapidez como por la sencillez del mismo; logrando de ésta manera un rápido control de un determinado material o proceso.

Los resultados de las experiencias se encuentran tabulados en la tabla N°3.

TABLA III

Experiencia	1	2	3	4
Dureza promedio	—	39.8 Rc	41 Rc	79.8 Rb

4.4.3 MICROSCOPIA

Las pruebas metalográficas constituyen otro de los ensayos rápidos para determinar por medio de las microestructuras el contenido aproximado de carbono en los aceros.

Cuando se tiene una muestra del material a analizarse se la pule y se la ataca con nital para observar al microscopio y comparar el resultado con los de los manuales o cualquier otra referencia bibliográfica que se tenga a mano.

Las fotografías de las microestructuras referentes a cada una de las experiencias realizadas se muestran en las figuras 47 a 48.

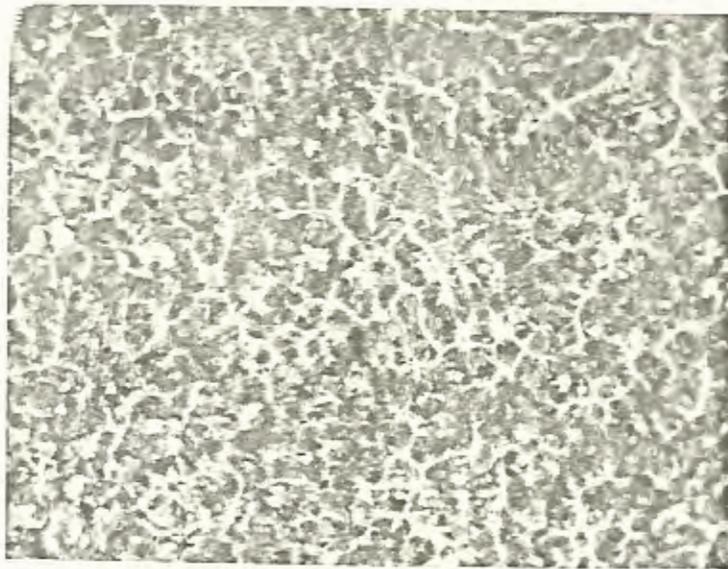
4.4.4 ENSAYO MECANICO SIN TRATAMIENTO TERMICO

El ensayo mecánico realizado fue el de tracción con el objeto de obtener el valor de resistencia a la tracción y comprobarlo con los existentes en tablas y/o manuales correspondientes.

Se realizó un solo ensayo porque solo se obtuvo un total de tres probetas debido a que el material de trabajo se utilizó para llenar moldes. A las otras probetas se les hizo el mismo ensayo pero sometidas a un tratamiento térmico preliminar.

La máquina en que se realizaron los ensayos es una INSTRON-modelo 1230 a una velocidad de 10 mm/min del laboratorio de la ESPOL.

Experiencia 2



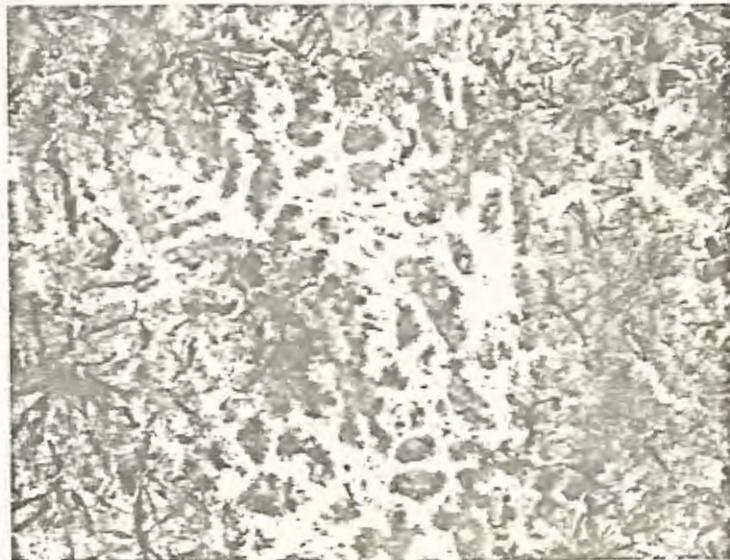
100 X

Nital al 2 %

Figura 42

Se revela la presencia de colonias de perlita (zonas oscuras) y una red de cementita (zonas blancas) que rodea dichas colonias. Tiempo de soplado corto.

Experiencia 4



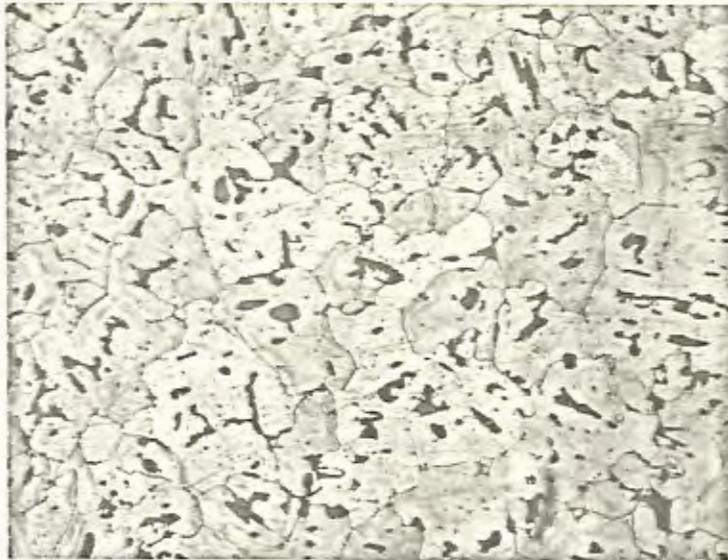
100 X

Nital al 2%

Figura 45

Fundición de partida. Se observa la microestructura del material moteado compuesto de lagunas de cementita, colonias de perlita y láminas de grafito, caracteristico de una fundición baja en carbono y silicio.

Experiencia 4



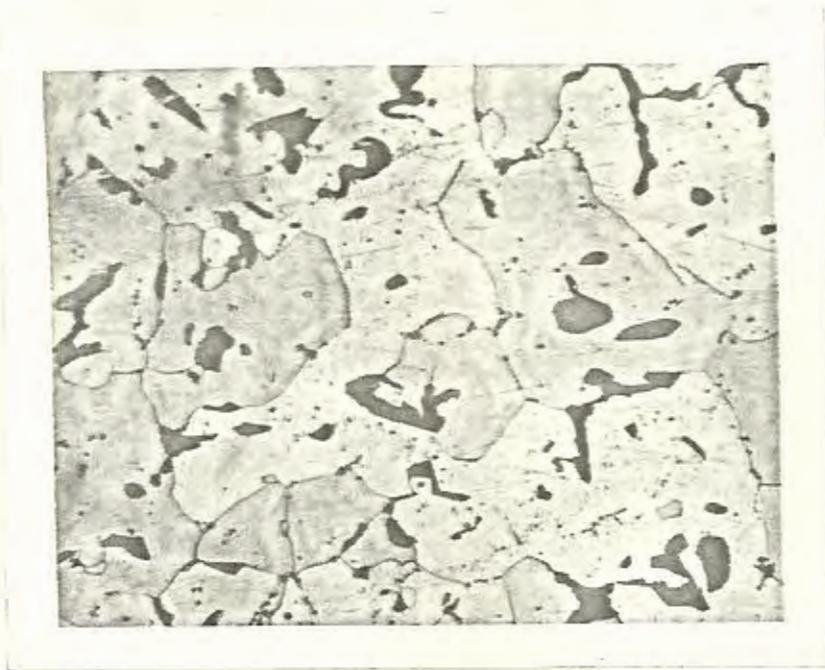
100 X

Nital al 2%

Figura 46

Se observa la microestructura de un acero de bajo carbono compuesto de granos de ferrita (zonas blancas) y zonas oscuras de un constituyente no identificable a esta resolución.

Experiencia 4



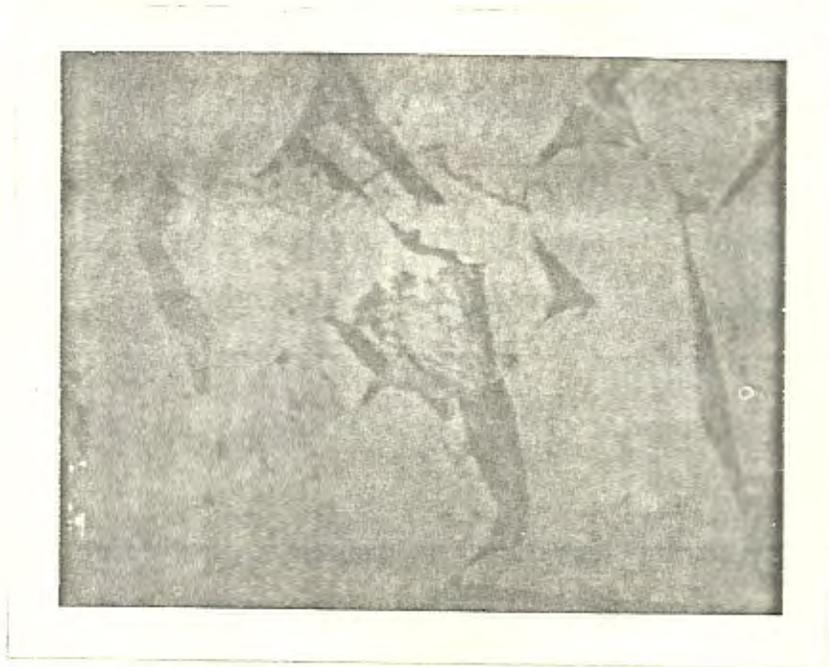
200 X

Nital al 2%

Figura 47

Se observa zonas blancas de hierro alfa (α) proeutectoide y zonas oscuras del constituyente sin mostrar resolución.

Experiencia 4



1000 X

Nital al 2%

Figura 48

Acero sin tratamiento térmico. Se aprecia la morfología de las zonas sin resolución; aparentemente carburos

La figura 49 muestra los resultados correspondientes a dichos ensayos.

4.4.5. ENSAYO MECANICO CON TRATAMIENTO TERMICO

Al igual que la primera probeta, se realizaron dos ensayos con la diferencia de que a una segunda probeta se la sometió al tratamiento térmico de Recocido a una temperatura de 850°C durante el tiempo de 30 minutos.

La tercera probeta se la mantuvo a 1.000°C durante tres horas consecutivas y se dejó enfriar en el horno.

En la figura 49 están los resultados de estos ensayos procedentes de la máquina universal Instron.

En la tabla IV se encuentran tabulados los valores de límite de rotura correspondientes a las tres probetas.

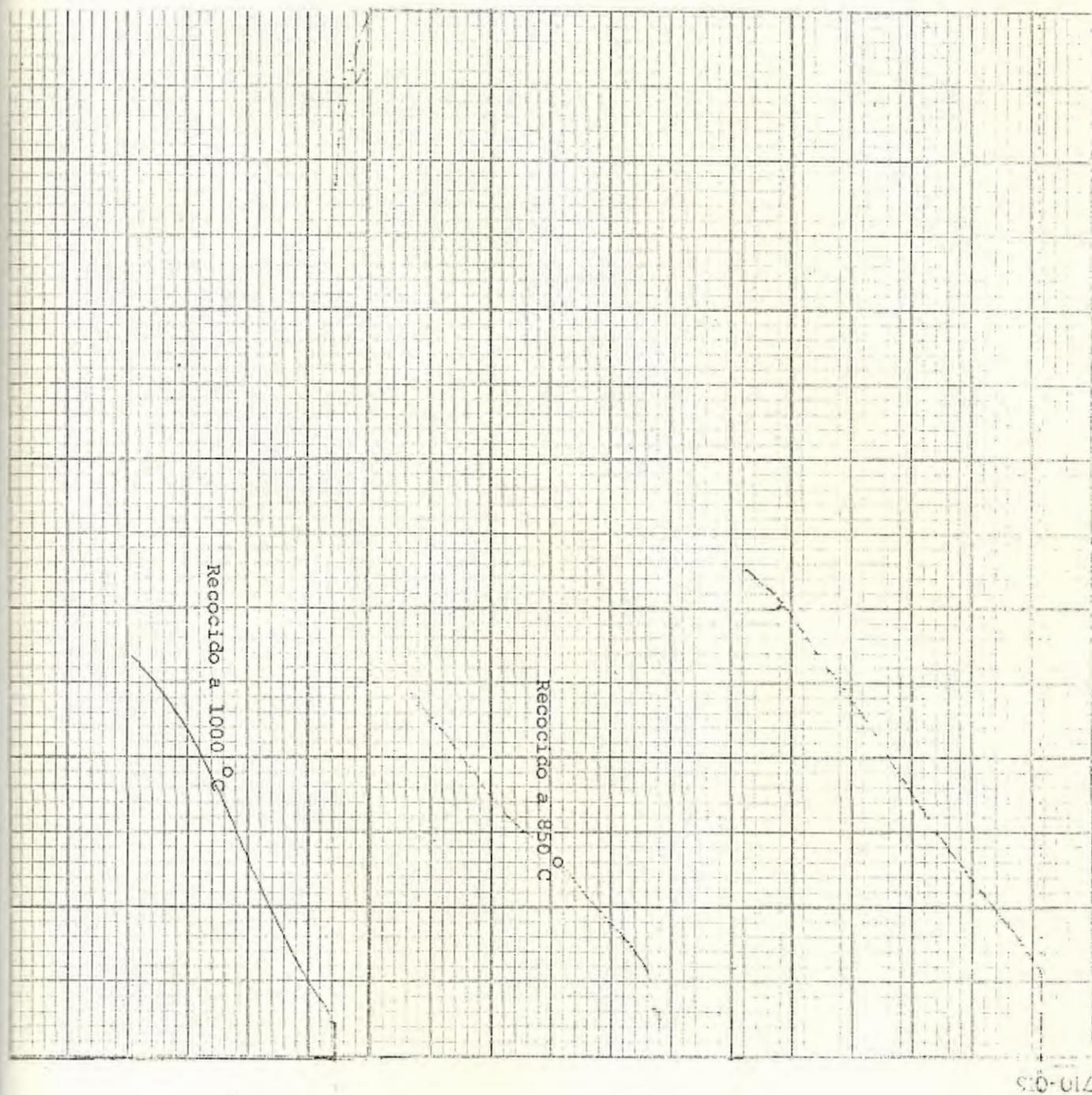


Figura 49
Curvas correspondientes a los ensayos de tracción



433
TABLA IV

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL Apartado: 5863 - Guayaquil - Ecuador. Lab. Ensayo de Materiales					ENSAYO DE TENSION				Solicitud No.
Solicitado por: Material: Temp. de ensayo: Velocidad de ensayo: Equipo usado: Fecha:					Observaciones: Norma: Grado: Resistencia a la tracción: Límite de fluencia: Alargamiento:				
Probeta No.	Díámetro de la muestra	Sección de la probeta	Longitud inicial	Longitud final	Límite de fluencia	Resistencia a la tracción	Resistencia a la rotura	Alargamiento	OBSERVACIONES
	mm	mm ²	mm	mm	kgf/mm ²	kgf/mm ²	kgf/cm ²	o/o	
1	7.05	39.04	35	35.08	3842	41.75	41.75	0.2	
2	6.94	37.83	35	35.52	—	32.25	32.25	14.9	
3	6.2	30.19	20.3	22.14	38.09	44.72	44.72	9.06	

CAPITULO V

DISCUSION DE RESULTADOS

De las pruebas realizadas en este trabajo puede decirse que es factible fabricar acero mediante el proceso LD descrito en capítulos anteriores de tal forma que posibilite al fundidor local lograr uno de sus mayores propósitos como es el de utilizar "arrobio" obtenido en cubilote, como material de partida para la obtención de acero y construir piezas para maquinaria de toda clase.

Para poder usar esta técnica tendrá que remitirse a los datos de las experiencias y resultados que constan en la tablas del capítulo IV sin necesidad de entrar a ecuaciones matemáticas que dificulten su trabajo.

Debe notarse que este trabajo contiene pruebas iniciales con cuyos datos se puede partir para efectuar otras experimentaciones hasta lograr depurar la tecnología de este material tan estratégico para el desarrollo.

El tema aborda los parámetros más importantes con cuyo estudio será relativamente fácil conseguir implementar la producción en plantas de fundiciones locales.

La discusión de éste trabajo radica principalmente en el análisis del comportamiento de las variables tales como: Composición química, presión y caudal de oxígeno, distancia lanza-nivel de baño, y de manera secundaria los parámetros relacionados con el tiempo de gaseado, cantidad de cal y condiciones de resistencia del refractario, tanto a temperatura como a reacciones químicas.

Los resultados de las experiencias se analizarán a continuación, teniendo siempre como referencia las primeras variables anotadas en el párrafo anterior, pero también se harán acotaciones de las últimas citadas. Además se hará referencia de otras que son muy importantes cuando se establezca una producción normal del material y que por limitaciones en éste trabajo de tesis no es posible cubrir, pero se hará en futuras investigaciones que tiene planeadas el área de Metal-Mecánica de la ESPOL en próximos trabajos de tesis de grado.

Dichos parámetros son: Temperatura inicial del metal base, temperatura final del acero, cantidades de ferroaleaciones y de aluminio y otros.

De la primera experiencia no se tiene mayor información y es lógico suponer que así fuere ya que se estaba dando inicio a un proceso que por primera vez se experimenta en una fundición nacional y el manejo del equipo fue un acontecimiento insospechado. Para

este caso la carga de arrabio fue de 100 kg ; se controló la presión de oxígeno tal como se apunta en la página 134.

Se usó caliza granulada en forma de piedra chispa (pág. 134) la cual al introducirla después del arrabio en el convertidor causó el enfriamiento de éste, debido a que quedó sobre la superficie del metal en forma de costra. Esto impidió la reacción de oxidación, logrando soplar oxígeno sólo por dos minutos.

No se pudo comprobar si la distancia escogida de 30 cm. entre la lanza y el baño era la adecuada; pero lo que sí pudo observarse fue el desprendimiento de llamas y la presencia de abundantes humos negros.

El mayor provecho que se sacó de ésta practica estuvo relacionado con el revestimiento refractario porque su comportamiento fue aceptable, ya que resistió la temperatura elevada y el ataque de las escorias sin sufrir desgaste. Además, como se ha mencionado en líneas anteriores no es conveniente utilizar caliza, sino cal reactiva (polvo), la cual se funde más fácilmente con el metal; ayudando así a una mejor desulfuración y desfosforación.

La segunda experiencia se presenta ya con resultados positivos. Al igual que la primera prueba, se utilizó 100 kg. de arrabio y se mantuvo la misma distancia lanza-nivel de baño (pág.135) pero en

Ésta vez se redujo la cantidad de cal desde 10 a 5 kg. siendo ahora cal reactiva y no piedra caliza ; colocada luego del arrabio se gundos antes del soplado.

Se mantuvo el mismo diámetro (3/16") del orificio de salida siendo satisfactorio tanto como la presión de agua, ya que se utilizó di rectamente la de los usuarios.

Se comprobó en forma más efectiva la presión y caudal del oxígeno porque ahora el proceso se lo llevó a cabo sin interrupciones y con gaseado continuo durante el tiempo de cinco minutos, observandose en los primeros minutos la presencia de escoria espumosa tratando de salir por los bordes del recipiente. Además se presentó el mismo fenómeno de llamas y humos de la primera experiencia con la diferencia de que ésta vez hubo un ruido característico y vibraciones del convertidor.

Finalmente se retiró la lanza y se agregó una barra de aluminio - (aproximadamente 300 gr.) para desoxidar el material.

Los resultados de los análisis químicos y de dureza demuestran - que el material de partida debe reconsiderarse y de esto se des prende que debe hacerse lo mismo con los otros parámetros. No se logró el propósito en mente pero sí un mayor acercamiento al proce so.

En lo que respecta a la tercera experiencia hubo ciertas innovaciones. Se aumentó la cantidad de arrabio a 150 kg. pero se aumentó el diámetro del orificio de salida a 3/8" y la distancia lanza-nivel de baño se redujo a 20 cm. También se redujo la presión de oxígeno a 3 atm. aumentando de ésta manera el tiempo de gaseado hasta siete minutos.

Se mantuvo la presión de agua y la calidad y cantidad de cal, pero su adición se efectuó en dos partes. Un 50% al inicio del soplado y el otro 50% luego de dos minutos, deteniendo para esto la inyección de oxígeno.

Los efectos fueron los mismos ; escoria espumosa, presencia de humos oscuros y llamas pequeñas al inicio del soplado con aumento de tamaño y cambio en su brillantez luego de cuatro minutos aproximadamente.

Esta vez no se realizó una completa desoxidación quedando un material oxidado, es decir con una cantidad más o menos considerable de oxígeno incorporado al material fundido.

El exceso de oxígeno en el acero repercute enormemente en las propiedades y en consecuencia en la calidad del material obtenido. Este fenómeno se lo aprecia en la figura 37, en ella se presenta la sección transversal de dos probetas. Una desoxidada y otra sin

desoxidar, mostrando una sopladura superficial.

Los resultados de los análisis químicos y de los ensayos de dureza fueron semejantes a la experiencia dos, por lo que se optó realizar una cuarta prueba volviendo a la cantidad de arrabio inicial pero disminuyendo la cantidad de cal a dos kg., la distancia lanza-nivel de baño a 12 cm. y manteniendo el mismo diámetro del orificio de salida de oxígeno.

A diferencia de todas las pruebas anteriores, la cal se colocó - en el convertidor antes del arrabio y en el momento en que ambos entraron en contacto se desprendió una llama azulada.

El inicio del soplado ocurrió en forma similar a la figura 39 ; ésto es, presencia de humos oscuros y llamas cortas durante los cuatro primeros minutos. Luego las llamas aumentaron de tamaño , figura 40, al mismo tiempo que se hacían más brillantes, apareciendo vibraciones y ruido en el convertidor.

Entre los siete y ocho minutos de gaseado ocurrió el descenso - de las llamas por la boca del convertidor (figura 41) manifestando que el contenido de carbono era menor a 0.1%. En forma inmediata se retiró la lanza y se añadieron las ferroaleaciones y barras de aluminio para poner fin al afino (pág 138). Seguidamente se tomó muestras y se procedió a colar.

De ésta forma el proceso se realizó tal como menciona la bibliografía, aunque los valores de los parámetros no fueron exactamente los mismos.

De los ensayos de dureza se pone de manifiesto que conforme disminuye el contenido de carbono, disminuye también el valor de la dureza del material soplado, tanto así que en la experiencia cuatro la escala utilizada es de Rockwell B.

Los resultados de los ensayos de tracción determinan un material fuera de norma ya que no manifiesta ductilidad, lo cual se puede deber a los niveles de azufre y fósforo encontrados en los análisis químicos los que tienen éstos efectos nocivos sobre el acero.

Para mejorar la ductilidad en otra probeta se siguió un proceso de recocido a 850°C por el tiempo de media hora con enfriamiento en el horno. Realizado el ensayo se consiguió el mismo resultado por ello se modificó el tratamiento en una tercera probeta sometida ahora a 1000°C durante tres horas con enfriamiento en el horno. Como el comportamiento del material no mejoró sustancialmente ya que se obtuvo solo 9. % de elongación, se piensa que el contenido de azufre y fósforo es el causante de éste fenómeno y ello induce a modificar las condiciones de la formación de una escoria más reactiva, utilizando una combinación de CaO y CCa ó CCa solamente, ya que posee mayor contenido de Ca que la cal.

El análisis metalográfico contenido en las micrografías de las figuras 50, 51, 52, demuestra que existe realmente incidencia del azufre en forma de sulfuro de manganeso, el cual se ubica como impureza en los bordes de grano de la ferrita, lo que no es común encontrar en este tipo de microestructuras.

De todos los ensayos efectuados sobre el metal de la prueba cuatro y otros que se realizaron posteriormente, se repite el mismo problema de ductilidad el cual se debe exclusivamente al tenor de azufre en la composición del acero resultante del proceso. Por esta circunstancia es que, el autor de este trabajo recomienda para futuras experiencias, modificar la composición química del hierro base para el proceso de conversión, excluyendo como material de carga al cubilote, hierro gris, que es el aportador de gran cantidad de dicho elemento y en su lugar utilizar cargas con 100% de acero, el cual como se sabe sólo aportaría con 0.04% como máximo. De esta forma se tendría un arrabio más o menos de la siguiente composición:

$$C = 2.6 - 2.9$$

$$Si = \text{Practicamente cero}$$

$$Mn = 0.4$$

$$S = 0.04$$

$$P = 0.04$$

Pero por lo que se ha manifestado antes, el Silicio debe estar presente en la composición de partida ya que es uno de los ele -

mentos que más aporta calor en la reacción y en mucho depende su contenido para la temperatura final del acero. Por esta razón habría que incorporarlo en forma de ferroaleación en las cargas metálicas del cubilote, o en la cuchara de transferencia. Con esto se tendrá una suficiente disminución del contenido de azufre en el material de partida, lográndose mejorar las propiedades mecánicas.

El otro camino ya ha sido comentado y es buscando mejores materiales desulfurantes para usarlos en el convertidor; pero ello implica conocimiento de los materiales calcáreos que salen de la competencia de estudio del área de Metalúrgia-Mecánica.

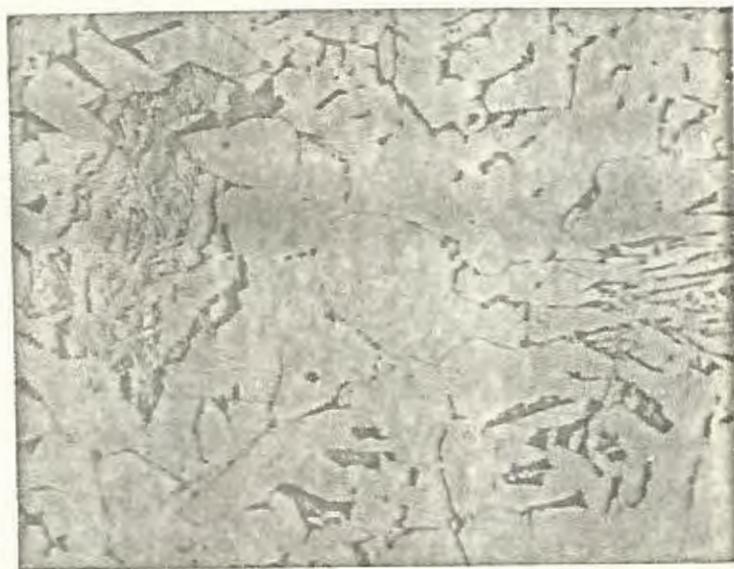


100 X

Nital al 2%

Figura 50

Material tal como sale del proceso de conversión. Se observa estructura compuesta por granos de ferrita (zonas blancas) y otra fase sin resolver (zonas negras). Se ha enmarcado con un círculo granos de ferrita con bordes de grano en los que se ha depositado el sulfuro de manganeso.



200 X

Nital al 2%

Figura 51

La misma probeta usada en la figura 50. Se ve más claramente la presencia del azufre en los bordes de grano de la ferrita.



200 X

Nital al 2%

Figura 52

El mismo material de la figura anterior pero con tratamiento térmico de recocido durante tres horas a 1000°C y enfriado en el horno. Se nota los granos de ferrita, el sulfuro de manganeso en los bordes de grano y precipitaciones de carburos globulares distribuídos al azar en toda la matriz.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se ha mencionado en los primeros capítulos el método experimental se guido, los resultados obtenidos de las experiencias y finalmente se ha hecho una discusión de los mismos llegando a las siguientes conclusiones:

- 1.- Es factible fabricar acero partiendo de arrabio de cubilote, aún sin conocer la composición química de la fundición de partida, manteniéndose en los rangos de composición para producir piezas de hierro gris.
- 2.- Debe usarse un reductor de azufre y fósforo con mayor contenido de calcio (Ca) que la cal comercial existente en el medio.
- 3.- El momento más apropiado para agregar el eliminador de azufre y fósforo es antes de hechar el arrabio en el convertidor.
- 4.- El refractario básico de alto contenido de magnesio (CO_3Mg) utilizado por las empresas "Cemento Nacional" y "FUNASA" es de óptimas condiciones para el proceso.
- 5.- La lanza de oxígeno puede ser construída íntegramente con tube ría de cobre, aunque es más conveniente económicamente que sólo la parte de la punta sea de cobre y renovable debido al pequeño

deterioro que sufre.

- 6.- Puede trabajarse con el oxígeno comercial.
- 7.- Si se trabaja hasta con 200 kg. de metal, se puede usar agua de refrigeración de la lanza, tomandola directamente de la línea de servicio de agua potable donde la presión no sea inferior a tres atmósferas (40 psi.)
- 8.- s necesario el precalentamiento del convertidor ya sea con leña, coke y oxígeno con lo cual se puede llegar hasta unos 1200°C en corto tiempo.
- 9.- Los moldes para la obtención de muestras deben ser prefecentemen-
te metálicos o bien de arena de grano grueso (malla 40/50) y ben
tonita.
- 10.- Los contenidos de fósforo y azufre deben ser mantenidos a nive
les inferiores a 0.04 y 0.05 respectivamente.
- 11.- Es necesaria la adición de chatarra de acero para lograr reducir
el contenido de azufre del metal tratado.
- 12.- El uso de aluminio para la desoxidación da exelentes resultados
con aleación ASTM 1100.

RECOMENDACIONES

Se recomienda:

Utilizar el método aquí desarrollado con el propósito de ampliar la instalación de hierro gris con capacidad para producir acero moldeado.

Utilizar un sistema mecánico de sujeción y movimiento de la lanza independiente del convertidor.

Utilizar sistema de eliminación de gases, que por su elevada densidad no salen fácilmente del recinto fabril.

Un mejor control de materiales de carga rechazando la chatarra aleada. Preferentemente que sea de una misma fuente.

Utilizar boquillas de cobre renovables con el objeto de aumentar la vida de la lanza y un mayor aprovechamiento del tiempo entre coladas

Verificar la composición química de la cal reactiva comercial para comprobar el contenido de calcio o utilizar otro tipo de material básico para la escoria como por ejemplo CCa eutéctico granulado como el usado para generar acetileno.

El uso de recipientes de oxígeno de mayor capacidad que los de seis metros cúbicos.

Utilizar barras sólidas de aluminio de 30 a 50 cm de largo por 2.5 cm de espesor para el afino.

A P E N D I C E

TABLA N.º 4

EXPERIENCIAS	MATERIALES DE CARGA					ANÁLISIS PREVIS D				ANÁLISIS QUÍMICO					
	CHATARRA %	RETORNOS %	ACEP %	FE SI %	FE MP %	C	SI	Mn	P	S	SI	Mn	S	P	
1	100	-	1	-	-	3.25	1.98	0.501	0.185	0.20	3.055	2.17	-	0.161	0.21
2	100	-	-	-	-	3.23	1.98	0.54	0.13	0.285	3.15	2.43	0.29	0.142	0.202
3	99.5	-	-	0.5	-	3.25	2.11	0.59	0.62	0.19	3.17	2.43	-	0.167	0.18
4	99	-	-	1	-	3.138	2.635	0.587	0.64	0.198	3.41	2.555	-	0.195	0.213
5	95	-	-	0.5	-	3.11	2.213	0.593	0.58	0.19	3.231	2.44	-	0.183	0.205
6	90.39	5.77	-	0.83	0.49	3.15	2.46	0.791	0.15	0.19	3	2.67	0.67	0.131	0.161
7	89.5	-	-	0.51	-	3.117	2.13	0.584	0.134	0.181	3.1	2.25	-	0.163	0.187
8	80	28.68	-	0.83	0.49	3.138	2.43	0.782	0.162	0.195	3.107	2.51	0.52	0.143	0.196
9	87	5.54	23.16	0.83	0.48	3.06	2.27	0.757	0.150	0.175	2.93	2.49	0.56	0.168	0.160
10	80	8.8	21.87	0.83	0.50	3.09	2.295	0.778	0.144	0.181	3	2.45	1.02	0.140	0.181
11	80	27	-	-	-	3.12	1.813	0.457	0.157	0.199	3.169	1.024	0.37	0.137	0.157
12	78	6.14	23.27	0.49	-	3.09	2.07	0.56	0.155	0.177	2.93	2.31	0.49	0.133	0.19
13	70	29	-	1	-	3.139	2.502	0.539	0.164	0.195	3.134	2.712	-	0.178	0.185
14	70	29	-	1	-	3.139	2.502	0.534	0.164	0.195	3.133	2.74	-	0.175	0.182
15	69.64	-	30	0.36	-	3.014	1.549	0.517	0.107	0.150	2.811	1.59	0.18	0.077	0.157
16	69.39	-	29.89	0.72	-	3.04	1.955	0.74	0.107	0.131	3.104	2.045	0.47	0.135	0.163
17	69.14	-	29.79	1.07	-	2.953	1.972	0.509	0.135	0.149	2.87	1.653	-	0.134	0.157
18	65	33.5	-	1.5	-	3.119	2.8125	0.530	0.1605	0.197	3.107	3.013	-	0.185	0.185
19	65	33.5	-	1.5	-	3.119	2.8125	0.527	0.1605	0.197	3.107	2.99	-	0.186	0.185
20	45.91	23	29.65	1.41	-	2.905	2.178	0.489	0.132	0.146	2.83	1.28	0.47	0.118	0.151
21	42.54	42.54	14.2	-	-	3.04	1.528	0.497	0.152	0.179	3.11	1.56	0.39	0.043	0.163
22	35.71	33.93	30	0.36	-	2.918	1.249	0.484	0.134	0.150	2.849	1.05	0.31	0.0891	0.230
23	35.34	33.57	29.65	1.41	-	2.857	1.919	0.471	0.132	0.146	2.812	1.70	0.32	0.040	0.162
24	20	80	20	-	-	2.95	1.311	0.561	0.15	0.161	2.81	1.23	-	0.06	0.153

Tomada de la tesis de C. Cisneros

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

1. ASOCIACION BRASILEIRA DE METALES (ABM). Av. Paulista 2073. Horsa I. Sao Paulo.
2. BODSWORTH C. AND BELL H.B. Physical Chemistry of Iron & Steel Manufacture.
3. BOYLSTON H. An Introduction to the Metallurgy of Iron and Steel. Second Edition.
4. BOZA G., CECERE A. COSTA B. VIOLI G. Mathematical model for the calculation of the charge and applications to the control of oxygen converters of large dimensions.

5. CHAUSSIN C. HILLY G. Metalurgia. Tomo II.
6. CHESTERS J.H. Refractories for Iron and Steelmaking. Published by The Metals Society 1 Carlton House Terrace.
7. COHEUR J.P. SCHENCK H. STINMETZ E. Gaseous desulphurization in the LD process. CNRM N° 20. Sept. 1969. Pág. 3 - 28.


8. CENIN, Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, Revista de Información Técnica; Ciudad Universitaria - Madrid, España; Volúmen 7. N°6. 1.971. Pág. 499-500.
9. CISNEROS C. Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral. 1.982.
- 10 DEWITT C.V. Oxy-Gas roof burner experience at Inland's. N°3. Open Hearth; Met. Soc. AIME. Open Hearth and Basic Oxigen Steel conf Prov. V. 53 Detroit meeting Apr. 6-8. 1.970. Pág. 50-56.
- 11 ENDEC H. vom. LIESTMANN W.D. Beeinflussung und wirkung des Schlackenschäumens beim verblosen von Phosphorormen im Saurstoffaufblas Konverter Stahl u Eisen. V. 86.N° 19 Sep. 1.966.
12. ENRIQUEZ J.L. Apuntes para Seminario Fusión de Hierro y Acero. ESPOL. 1.980.
- ~~13. ILAFA-ALAFAR. Congreso de Refractarios en Producción de Acero y Cobre. (Lima-Perú. 1.980).~~
14. KASPAR G., Comparison between LD and Kaldo processes insofar as cost of production is concerned. Blast Furnace

- & Steel Plant. V. 53. N°8. Aug. 1.965. Pág. 681-686.
15. KRANJC A. Balanco material e térmico dos conversores a oxigenio. ABM. V 22. N°107. Oct. 1.966. Pág. 815-828.
~~_____~~
16. MAGNESITA S.A. 32 200 CID. Industrial M. G. Brasil.
17. MARON SAMUEL H. Y PRUTTON CARL F. Fundamentos de Físico Química.
18. MELIKHOV V.G. Efect of technological parametres on evolution of gases during a heat in a 130 t oxigen blown converter; Stal N°8. Aug. 1.971. Pág. 702-705.
~~_____~~
19. OBST K.H. STRADTMANN J. TROMEL G. Reducing the Blowing time in the LD process by the use of special lime products. J Iron Steel inst (London) V 208. Mayo de 1.970. Pág. 450-455
~~_____~~
20. PEARSON A.E. SHORE L.T. LD steelmaking at Spencer works. Steel times. V 188 N° 4999. May. 8, 1964 .
Pág. 608-612.
21. RHEAD E.L. Metalurgia. Tercera Edición.

22. RENGSTORFF G.W.P. Kinetics of Aluminium de oxidation of steel . J of Metals. V. 19. N°5. May. 19.967. Pág.50-53.
23. REPETYLO O. OLETTE M. KOZAKEVITCH P. Deoxidation of liquid steel with Aluminium and elimination of Resultin alumina. J. of Metals. V. 19 N°5 . May. 1.967. Pág. 45 49.
24. STONE J.K. Theoretical Possibilities of operating L D Procces at High Pressure. V. 19. N°5. May. 1967. Pg. 21-26.