

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**LA FABRICACIÓN DE ACERO EN HORNOS
ELÉCTRICOS DE ARCO EN PLANTA SIDEGUA**

TESIS

**PRESENTADA A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA**

POR

**MIGUEL ANGEL DE LEÓN LAPARRA
AL CONFERIRLE EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

Guatemala, septiembre de 1999



HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de tesis titulado:

LA FABRICACIÓN DE ACERO EN HORNOS ELÉCTRICOS DE ARCO EN PLANTA SIDEGUA,

tema que me fuera asignado por la Dirección de Carrera de Ingeniería Mecánica, con fecha 15 de noviembre de 1998.

Miguel Angel de León Laparra

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO:	ING. HERBERT RENÉ MIRANDA BARRIOS
VOCAL 1º.	ING. JOSÉ FRANCISCO GÓMEZ RIVERA
VOCAL 2º.	ING. CARLOS HUMBERTO PÉREZ RODRÍGUEZ
VOCAL 3º.	ING. JORGE BENJAMÍN GUTIERREZ QUINTANA
VOCAL 4º.	BR. OSCAR STUARDO CHINCHILLA GUZMÁN
VOCAL 5º.	BR. MAURICIO ALBERTO GRAJEDA MARISCAL
SECRETARIA.	INGA. GILDA MARINA CASTELLANOS DE ILLESCAS

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN

GENERAL PRIVADO

DECANO:	ING. JULIO ISMAEL GONZÁLEZ PODSZUECK
EXAMINADOR:	ING. LUIS GILBERTO PINEDA SÁNCHEZ
EXAMINADOR:	ING. RODOLFO JOSÉ ESCOBAR QUINTANAL
EXAMINADOR:	ING. CARLOS ANIBAL CHICOJAY COLOMA
SECRETARIO:	ING. FRANCISCO JAVIER GONZÁLEZ LÓPEZ

Guatemala, 15 de marzo de 1999

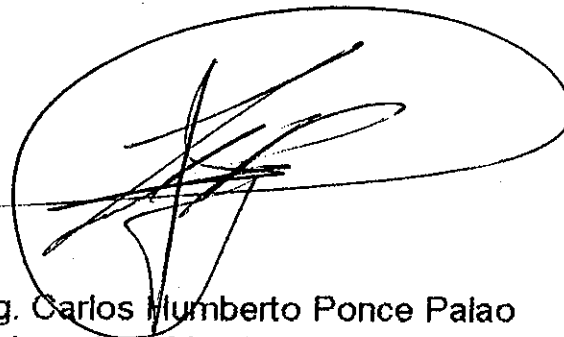
Ingeniero
Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Coordinador Carrera de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Ingeniero Pérez:

Adjunto envío a usted el informe final de tesis titulado: **LA FABRICACIÓN DE ACERO EN HORNOS ELECTRICOS DE ARCO EN PLANTA SIDEGUA**, que fuera elaborado por el señor estudiante Miguel Angel De león Laparra, con carnet 88-16022, el cual he asesorado y por éste medio doy como satisfactorio, por lo que me permito remitírselo para que continúe con los trámites correspondientes para su aprobación.

Por la atención que la misma le merezca me suscribo de usted,

Atentamente

A handwritten signature in black ink, enclosed within a hand-drawn oval. The signature is stylized and appears to be 'C. Ponce Palao'.

Ing. Carlos Humberto Ponce Palao
Ingeniero Mecánico Industrial
Colegiado No.3848

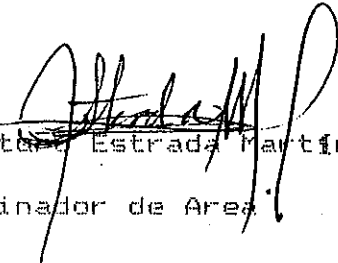
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

El Coordinador del Area de Materiales y Complementaria de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer la aprobación del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo titulado La Fabricación de Acero en Hornos Eléctricos de Arco en Planta SIDEGUA, del Estudiante Miguel Angel De León Laparra, recomienda su aprobación.

ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. José Arturo Estrada Martínez
Coordinador de Área

Guatemala, abril de 1,999.



FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, después de conocer el dictamen del asesor, con el visto bueno del Coordinador del Área Materiales y Complementaria, al trabajo La Fabricación de Acero en Hornos Eléctricos de Arco en Planta SIDEGUA, de el estudiante Miguel Angel De León Laparra, procede a la autorización del mismo.

Y ENSEÑARLA A TODOS

Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez



Guatemala, septiembre de 1,999.



FACULTAD DE INGENIERIA

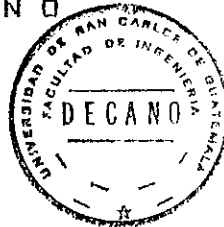
El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, Ingeniero Carlos Humberto Pérez Rodríguez, al trabajo de tesis titulado La Fabricación de Acero en Hornos Eléctricos de Arco en Planta SIDEGUA, presentado por el estudiante universitario Miguel Angel De León Laparra, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRIMASE


ING. HERBERT RENE MIRANDA BARRIOS

DECANO

Guatemala, septiembre de 1,999.



DEDICO ESTA TESIS

A mi madre, mi esposa, mi hijo y todas las personas que colaboraron en la elaboración del presente trabajo.

ÍNDICE GENERAL

Título	Pág.
ÍNDICE	I
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	IV
LISTA DE SÍMBOLOS	V
GLOSARIO	VII
INTRODUCCIÓN	XII
1. MAQUINARIA Y EQUIPO	1
1.1 Horno de arco de fusión	1
1.2 Horno de afino	3
1.3 El transformador de potencia	4
1.4 Circuito primario de potencia	6
1.5 Circuito secundario de potencia	7
1.6 Instrumentos de medición y control	11
2. FUNCIONAMIENTO Y OPERACIÓN DEL EQUIPO	15
2.1 Electricidad básica	15
2.2 Electroodos para HEA fabricación y cuidado	19
2.2.1 Proceso de fabricación	19
2.2.2 Causas de consumo	20
2.2.3 Integridad mecánica y continuidad eléctrica	23
2.3 Regulación de los electrodos	24
2.4 Potencia en el circuito de corriente alterna	27

	Pág.
3. EL PROCESO DE FABRICACIÓN DE ACERO AL CARBONO	33
3.1. Consideraciones básicas para la preparación de la carga (chatarra)	33
3.1.1 Llenado de las cestas	34
3.1.2 Adición de fundentes	35
3.1.3 Recargues en el horno	36
3.2 Fusión de la carga	37
3.2.1 Fusión con escoria espumosa	39
3.2.2 Preaminación	43
3.2.3 Vaciado del acero	52
3.3 Afinación (refinación)	54
3.3.1 Desoxidación	55
3.3.2 Desulfuración	57
3.3.3 Procesos importantes para la operación del horno olla (horno de afino)	61
3.3.4 Homogenización de temperatura y análisis químico del acero	62
4. PROCESO DE SOLIDIFICACION DEL ACERO	64
4.1 Máquina de colada continua (MCC)	64
4.2 Vaciado	66
4.3 Enfriamiento	68
4.4 Evacuación	71
5. CONTROL DE CALIDAD DE LOS ACEROS AL CARBONO	72
5.1 Control del proceso	72
5.1.1 Informe del HEA	72
5.1.2 Informe del LF	74
5.1.3 Informe de la MCC	74
5.2 El espectrómetro electrónico	75
5.3 Principales defectos en los lingotes	76
5.4 Los ensayos de tracción	79

6. EJEMPLOS PARA LA FABRICACIÓN DE ACERO AL CARBONO	81
6.1. Fabricación de acero G-40	81
6.1.1 Preparación de la carga	81
6.1.2 Fusión de la carga	82
6.1.3 Preaminación y vaciado	83
6.1.4 Afinación (refinación)	84
6.1.5 Colado	85
6.2 Fabricación de acero G-60	86
6.2.1 Preparación de la carga	86
6.2.2 Fusión de la carga	87
6.2.3 Preaminación y vaciado	88
6.2.4 Afinación (refinación)	89
6.2.5 Colado	90
CONCLUSIONES	91
RECOMENDACIONES	93
REFERENCIAS	94
BIBLIOGRAFÍA	95
APÉNDICE A	96
APÉNDICE B	98

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

No.	Título	Pág.
1.	Circuito primario de potencia	7
2.	Circuito secundario de potencia	8
3.	Cables flexibles de corriente	9
4.	Tubos portacorriente	9
5.	Mordazas de los electrodos	10
6.	Zapata de soporte de los electrodos	11
7.	Plano eléctrico de los instrumentos de control del horno eléctrico de arco	12
8.	Sistema trifásico del horno eléctrico	17
9.	Método para calibrar electrodos	23
10.	Integridad mecánica y eléctrica de los electrodos	24
11.	Gráfica de las tres diferentes potencias	27
12.	Gráfica de un horno balanceado	28
13.	Gráfica de un horno desbalanceado	29
14.	Derivaciones típicas de un horno eléctrico	30
15.	Longitud de arco en el horno eléctrico	31
16.	Curva de potencia	31
17.	Distribución de la chatarra en las cestas	35
18.	Distribución de la chatarra en el horno	36
19.	Carga mal preparada y sus posibles consecuencias al cargar el horno	37
20.	Localización de los puntos calientes en el horno	40
21.	Protección de las paredes del horno mediante la escoria espumosa	40

LISTA DE SÍMBOLOS

A	área
Al	aluminio
C	carbón
°C	grados centígrados
cm	centímetro
Fe	hierro
hr	hora
I	corriente
Kwh	kilowatt hora
Kg	kilogramo
lb/pulg²	libra por pulgada cuadrada
m	metro

Mg	magnesio
Mn	manganeso
MVA	potencia aparente (mega volt-amper)
MVAR	potencia reactiva (mega volt-amper reactivos)
MW	potencia real (megawatt)
Ω	ohm
O₂	oxígeno
P	fósforo
S	azufre
Si	silicio
Tn	tonelada
v	volt

GLOSARIO

Acero Es una aleación maleable de hierro y carbono que contiene, generalmente, ciertas cantidades de otros elementos metálicos y no metálicos.

Acero G-40 Denominación que se le da al acero según norma COGUANOR 36011, basada en las normas internacionales ASTM A-615 y SI, para lo cual tiene que cumplir con los requisitos de tensión y elongación de barras de acero lisas y corrugadas para hormigón. Límite de fluencia min. 40000 lb/pulg² (276 M Pa) y max. resistencia a la tensión valor min. 70000 lb/pulg² (483 M Pa).

Acero G-60 Denominación que se le da al acero según norma COGUANOR 36011, basada en las normas internacionales ASTM A-615 y SI, para lo cual tiene que cumplir con los requisitos de tensión y elongación de barras de acero lisas y corrugadas para hormigón. Límite de fluencia min. 60000 lb/pulg² (414 M Pa) y max. resistencia a la tensión valor min. 90000 lb/pulg² (621 M Pa).

ASTM	Sociedad Americana de Ensayos y Materiales (por sus siglas en inglés).
Briqueta	Aglomerado de desperdicios de máquinas o material prereducido que se utiliza como material de carga en los hornos eléctricos.
Carga	Materia prima en forma de chatarra metálica y/o mineral prereducido colocado dentro del horno para su fusión.
Cesta	De tipo almeja, abre de forma característica como caparazón de almeja; se usa para sostener, transportar y vaciar los materiales de carga dentro del horno.
Colada	En la práctica de hornos de arco, éste término se refiere a la cantidad de acero líquido producido en una operación del horno de arco.
Decantación	Inclinación suave del horno para escorificar o vaciar el acero a la olla.
Decarburar	Pérdida de carbono de la superficie de una aleación ferrosa como resultado de calentar en un medio que reacciona con el carbono presente en la superficie.
EBT	Fondo Excéntrico de vaciado (por sus siglas en inglés)
Endotérmica	Reacción que se produce con la absorción de calor.

Exotérmica	Reacción que se produce con la liberación del calor.
FeSi	Ferrosilicio.
FeSiMn	Ferrosilicio manganeso.
Grafito	Una de las formas del elemento carbón caracterizado por una apariencia negra brillante, suavidad relativa, una lubricidad natural, y buena conductividad eléctrica y térmica.
HEA	Horno Eléctrico de Arco.
Inclusiones	Son partículas no metálicas incluidas en el acero durante su solidificación, provienen en gran parte del proceso seguido en la elaboración del mismo y el resto procede en la fase de colado.
LF	Horno de afinado (por sus siglas en inglés).
MCC	Máquina de Colado Continuo
Niple	Designación del dispositivo roscado de conexión, usado para la unión de electrodos.
Punto caliente	Un deterioro localizado en el revestimiento de la pared lateral o refractorio de la bóveda como resultado de la acción del arco en un horno eléctrico desbalanceado.

Polvos aislantes Sirven para evitar la fuga de temperatura y enfriamiento del acero en la olla y distribuidor.

Refractorio Material que resiste temperaturas muy altas, utilizado en el revestimiento interior del horno eléctrico, ollas, distribuidores, etc.

Rechupe Contracción que se produce en el proceso de solidificación del lingote.

Regulador Dispositivo eléctrico o electrónico para el control automático del movimiento de los electrodos dentro del horno.

Reóstato Es un tipo de resistencia variable en el circuito de control de un horno de arco, montado en el tablero de control. Se usa para variar la retroalimentación de corriente, para variar la longitud de arco y consecuentemente la potencia de entrada al horno.

Residuales Son aquellos elementos químicos que de forma involuntaria se incorporan al acero bien a través de la chatarra o de las adiciones que se hacen a lo largo del proceso de colado, pertenecen a éste concepto el O₂, S, y P, y en algunos casos también el Si, así como aquellas impurezas metálicas que proceden de la chatarra Cu, Sn, Pb, etc.

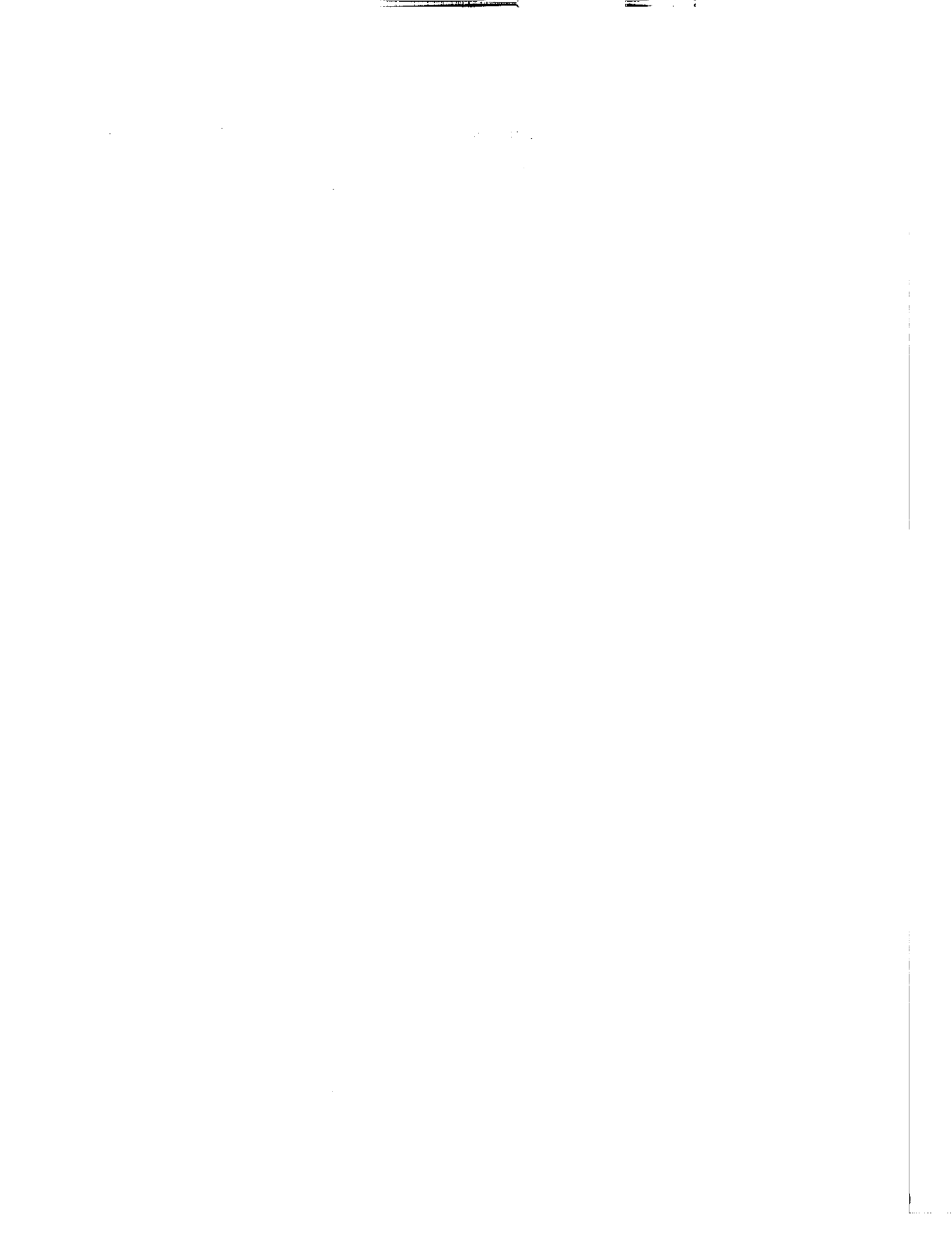
Segregaciones Es una concentración de carbono a temperaturas en aquella parte del acero fundido que solidifica en último lugar.

Solera

Parte del horno en posición horizontal (piso), donde se dispone la materia prima a fundir.

Tap to Tap

Vaciado a vaciado (por sus siglas en inglés)



INTRODUCCIÓN

Los hornos eléctricos de arco para la fabricación de acero utilizados en planta SIDEGUA, Escuintla, son esencialmente una coraza de acero con un fondo esférico, recubierto interiormente con material refractorio. Son utilizados para la fabricación de aceros que serán procesados en plantas laminadoras, principalmente para la industria de la construcción.

El presente trabajo nace como resultado de observar el constante avance en la tecnología en el proceso de fabricación de acero mediante el horno eléctrico de arco, y siendo la metalurgia una de las ramas de la ingeniería mecánica, es importante enfatizar las normas de la ingeniería necesarias para la fabricación de acero.

Por lo anterior, se pretende ensayar una metodología teórico-práctica, útil a los futuros profesionales de la ingeniería y técnicos que se dedican a la fabricación de acero en hornos eléctricos, capaz de obtener resultados que den como beneficio el conocimiento de los conceptos básicos que relacionan los fundamentos científicos de las propiedades metalúrgicas con el ejercicio de la práctica.

Este proceso involucra gran cantidad de equipo y aquí se presentan consejos útiles de aspectos técnicos que garanticen el óptimo funcionamiento del equipo y la marcha del proceso, lo cual trae como resultado bajos costos de producción y mayor productividad.

Actualmente, en plantas siderúrgicas como el caso de planta SIDEGUA, la operación de los hornos eléctricos de arco se vuelve más productiva por contar con un horno eléctrico para el proceso de fusión y otro para el proceso de afinado. Esto permite fabricar aceros de calidad, que pueden competir en un mercado globalizado; también se pueden sincronizar las siguientes etapas del proceso de fabricación eficiente y rentablemente.

1. MAQUINARIA Y EQUIPO

1.1 Horno de arco de fusión

El horno de arco de fusión para la fabricación de acero, es esencialmente una coraza de acero recubierta interiormente con material refractorio, enfriado por paneles con agua. Una puerta en la parte frontal para desercoriar, agregar fundentes, insuflar oxígeno, tomar muestras y temperaturas, y en su parte posterior un pico para vaciar el acero a la olla. Este horno tiene una capacidad instalada de 50 Tn. de acero líquido.

El horno cuenta con tres quemadores que usan como combustible diesel, para ayudar a fundir la chatarra que queda pegada a las paredes del horno, los quemadores están colocados con cierta simetría en la cuba del horno en las tres partes menos calientes, a unos 30 cms. sobre el nivel de la escoria, y orientados con cierta inclinación, de tal forma que las llamas incidan al centro de la cuba.

La tapa del horno (bóveda) es de forma cóncava, fabricada de acero con paneles enfriados por agua y el centro es el material refractorio con tres orificios en una posición triangular para permitir la entrada de los electrodos de grafito, a esta parte de la bóveda se le conoce como "delta", existe un cuarto orificio para el desahogo de la flama producida en la fusión o como salida para gases producidos en el proceso de fusión y preafinación.

Cada vez que se hace un recargue en el horno es necesario levantar la tapa del horno (bóveda) y las columnas de los electrodos, para ésta maniobra el operador del horno acciona un cilindro hidráulico desde la cabina del horno, este cilindro levanta la bóveda y gira sobre su eje de modo que queda libre la cuba del horno para efectuar el recargue. Se tiene que tener el cuidado que para la operación de desercoriado o vuelco del horno el cilindro esté en posición inferior.

El horno cuenta con una unidad hidráulica la cual acciona dos cilindros distribuidos lateralmente, los cuales dan el movimiento de vuelco al horno. El horno está apoyado en una cremallera fundida en concreto, para evitar el deslizamiento del mismo; el movimiento de vuelco del horno es necesario para escorificar y vaciar el acero a la olla.

El movimiento ascendente y descendente de los electrodos es efectuado a través de tres cilindros hidráulicos uno por cada electrodo, y estos a su vez están montados en una estructura que sujeta la bóveda llamada "castillo".

El horno eléctrico de fusión es operado desde una cabina en donde se encuentran todos los controles necesarios para una operación satisfactoria.

1.2 Horno de afino (Horno Olla)

El horno olla consta de las siguientes partes:

- Olla
- Sistema hidráulico-eléctrico de electrodos
- Carro de transferencia de olla
- Bóveda enfriada por agua con sistema colector de humos
- Tapón poroso instalado en el fondo de la olla.

El horno olla o LF es un equipo que consiste en una olla con tapón poroso para lograr una alta agitación del acero y la escoria y una alta transferencia de azufre e inclusiones del acero a la escoria y consta de una estación de calentamiento a través de electrodos de grafito.

El uso más frecuente de este tipo de horno es como auxiliar de la MCC (Máquina de Colado Continuo) y el HEA (Horno Eléctrico de Arco). Puede empalmar coladas con mayor facilidad así como para el cambio de grados del acero.

También se usa para realizar el afino y el ajuste de las coladas, dejando el horno eléctrico como equipo dedicado sólo a la fusión de la colada.

También se usa para lograr aceros extra limpios y de muy bajo azufre, el LF puede ser usado como calentador de coladas que se han enfriado en la MCC o que por problemas en la MCC se regresen por imposibilidad de seguir colando.

-VENTAJAS EN EL USO DEL LF

- 1) Aumenta la productividad de las acerías al disminuir los tiempos de tap to-tap (vaciado a vaciado)
- 2) Reduce el consumo de energía eléctrica, electrodos y ferroaleaciones al permitir hacer menos tiempo de vaciado a vaciado y poder hacer ajustes finos en el análisis del acero.
- 3) Permite obtener azufres finales en el acero muy bajos.
- 4) Permite obtener aceros con bajo nivel de inclusiones.
- 5) Permite elaborar fácilmente toda clase de aceros sean comerciales o especiales.

-DESVENTAJAS EN EL USO DEL LF

- 1) Alto consumo refractorio.
- 2) Mayor posibilidad de perforaciones de olla.
- 3) Exceso de consumo de fundentes.
- 4) Formación de escorias no adecuadas en el análisis químico.

1.3 El transformador de potencia

El mecanismo del transformador consiste esencialmente de tres núcleos magnéticos de hierro, uno para cada fase eléctrica del horno. En cada núcleo hay dos bobinas devanadas, aisladas eléctricamente una de otra. El devanado primario recibe la energía eléctrica desde el sistema de distribución; el secundario suministra energía de corriente alterna al horno.

Las oscilaciones de la corriente alterna en el devanado primario crean un campo magnético en el núcleo de hierro que aumenta y disminuye 60 veces por segundo; de este modo induce un flujo eléctrico en el devanado secundario que alimenta el horno.

Se usa para manejar en forma precisa el flujo de energía en el transformador. Para satisfacer las necesidades del proceso en el horno se usan derivaciones de voltaje o taps en el devanado primario.

Generalmente, hay cinco o seis derivaciones de operación del transformador, con opción de tres rangos permanentes de voltaje por cada una.

Se puede cambiar el voltaje en el secundario, así como la potencia de entrada al horno, con sólo cambiar una derivación a otra. Cambiando a la derivación adecuada según se haya determinado durante el procedimiento de regulación del horno, se puede asegurar una fusión rápida.

Hay dos tipos de mecanismos o equipos cambiadores de derivaciones que se usan, el tipo sin carga y el tipo con carga, el cambiador de derivaciones con carga es el más utilizado ya que puede actuar con el horno en operación.

El transformador del horno de fusión utiliza enfriamiento aceite-agua a presión y los sofisticados dispositivos de monitoreo y alarma. Son de gran ayuda para evitar sobrecalentamiento del aceite del transformador y los devanados particularmente el devanado central que es el punto más caliente del transformador.

Relacionado muy de cerca con el tamaño del horno está el tamaño del transformador del horno, y el tamaño del transformador del horno está íntimamente relacionado con la capacidad de producción. Actualmente, los transformadores se clasifican en cuatro categorías dependiendo de sus capacidades o potencias de operación; éstas son las siguientes: Normal, alta, ultra-alta, y super ultra-alta y los tiempos de colada son grandemente influenciados por la cantidad de potencia entregada por el transformador particular.

El cambiador de derivación con carga facilita la operación al operador y le da capacidad para proveerlo de una completa operación automatizada del horno. Esta por si sola, es una buena razón para optar por el transformador con cambiador de derivaciones bajo carga, es flexible y acepta instrucciones computarizadas.

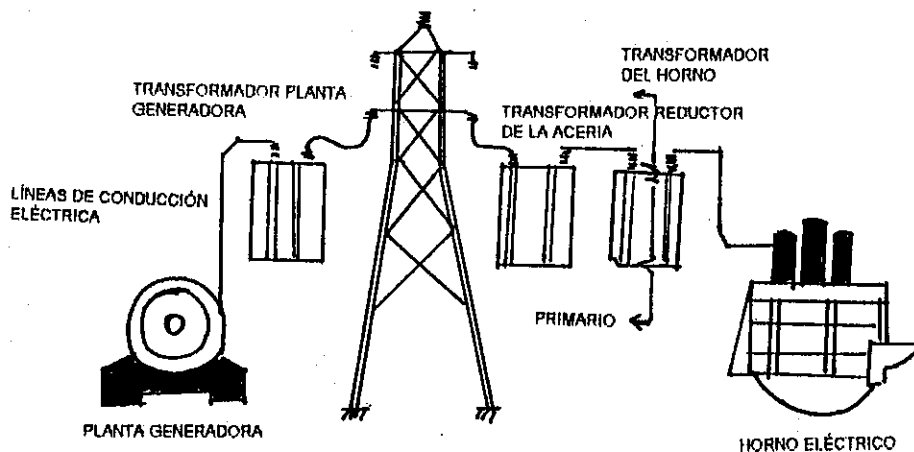
Actualmente, los cambios de derivación y consecuentemente los cambios de potencia pueden ser controlados automáticamente sin ayuda del operador.

1.4 Circuito primario de potencia

El circuito primario del horno eléctrico de arco inicia en la fuente de la planta generadora de energía eléctrica, que suministra corriente alterna trifásica a 60 Hertz, mediante transformadores elevadores, el voltaje generado se eleva hasta 100,000 volts o más. En la acería el voltaje se reduce nuevamente hasta un nivel apropiado, acorde a las características del horno de arco, mediante el transformador reductor y el transformador del horno.

El generador eléctrico crea un voltaje para transmitir el flujo eléctrico a través de los conductores. La línea de conducción eléctrica entre el horno eléctrico y la planta generadora de energía incluye: Líneas de alta tensión, interruptores, transformadores, cables, barras distribuidoras, ver figura 1.

Figura 1 Circuito primario de potencia



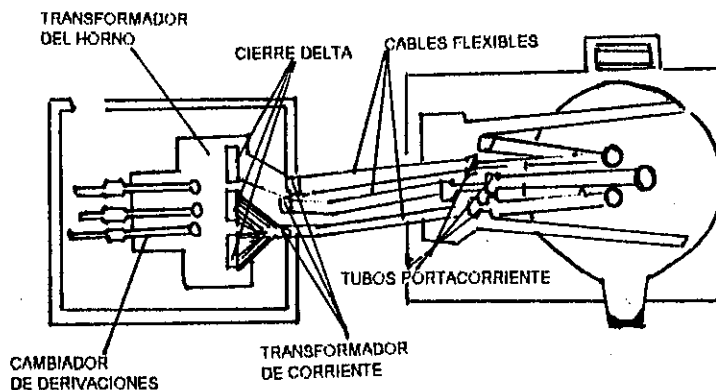
1.5 Circuito secundario de potencia

El circuito de potencia que se extiende a partir del devanado secundario del transformador del horno hasta la carga, y cuya longitud no se compara con la gran longitud del circuito primario, está diseñado al igual que los electrodos, para soportar el flujo de corrientes de alta intensidad.

En la parte inicial del circuito secundario, se encuentra una compleja conexión de grandes barras de cobre entrelazadas conocidas como "cierre delta". Termina en la parte interna de la pared del cuarto del transformador, esta configuración eléctrica conecta parte de cada una de las bobinas del secundario del mismo, requeridas en el circuito de potencia del horno eléctrico.

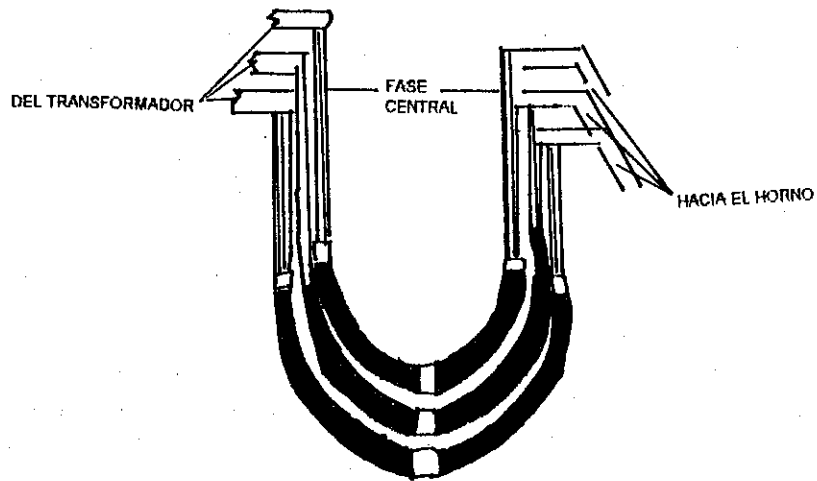
Muy cerca al cierre delta hay un juego de tres pequeños transformadores de corriente, consistentes básicamente en un embobinado. Cada una de las tres barras del "cierre delta" está circundada por uno de estos componentes. Estos pequeños transformadores, convierten la corriente de alta intensidad del secundario en una de menor amperaje, y la canaliza al tablero del horno, como referencia para instrumentación y control, ver figura 2

Figura 2 Circuito secundario de potencia



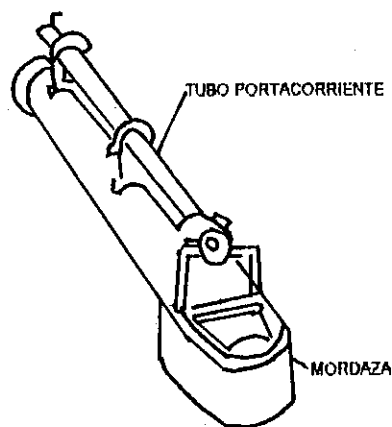
Los cables flexibles que van desde el cierre delta hasta el horno tienen como función, llevar las altas corrientes del circuito de potencia del secundario al horno, ver figura 3.

Figura 3 Cables flexibles de corriente



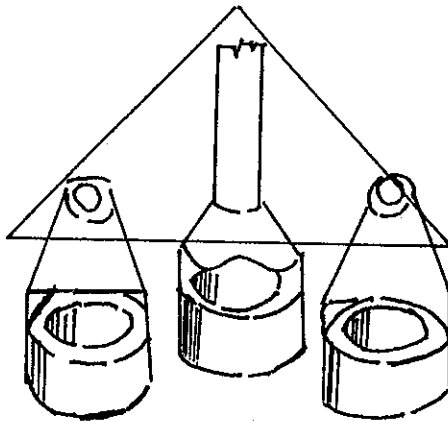
A los cables flexibles van conectados unos tubos de cobre de mayor diámetro llamados "tubos portacorriente" o buses localizadas en la parte superior de los soportes de los electrodos. Estos conductores están aislados y además de conducir energía eléctrica conducen agua de refrigeración para las mordazas porta electrodos que se encuentra sobre la bóveda. Ver figura 4.

Figura 4 Tubos portacorriente



Las mordazas conducen energía eléctrica directamente a los electrodos, estas mordazas tiene enfriamiento por agua, están dispuestas en un arreglo triangular para obtener el flujo de energía más económico a través de los electrodos hasta los arcos y proporcionar distancias iguales entre los electrodos y la pared del horno, las mordazas se limpian con aire comprimido o cepillos de alambre cada vez que se calibran los electrodos, para asegurar en buen contacto. Ver figura 5.

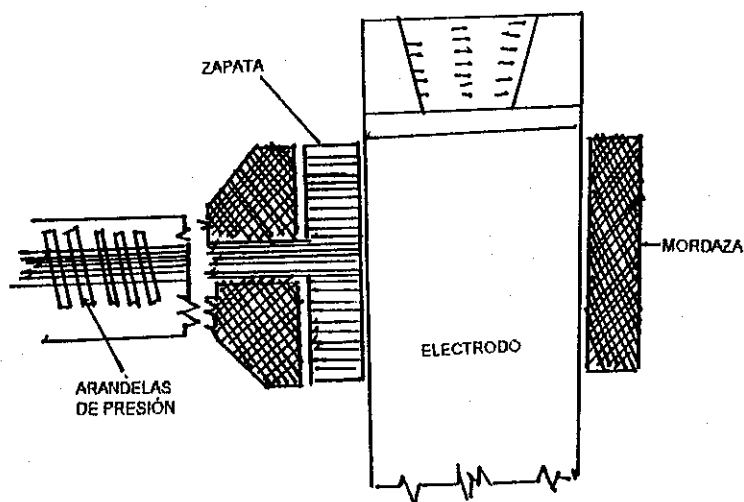
Figura 5 Mordazas de los electrodos



Es necesario que el contacto entre la mordaza y los electrodos sea lo más efectivo posible puesto que el área de contacto es relativamente pequeña y deberá soportar corrientes muy elevadas.

Las mordazas sujetan a los electrodos por medio de un mecanismo de zapata soporte controlado desde la cabina del horno, y permite al operador cambiar y calibrar los electrodos. Ver figura 6.

Figura 6 Zapata de soporte de electrodos.



1.6 Instrumentos de medición y control

En el tablero de control del horno de arco hay una serie de instrumentos y controles que dan al operador una idea exacta de la situación en el horno y los medios para controlar dicha situación.

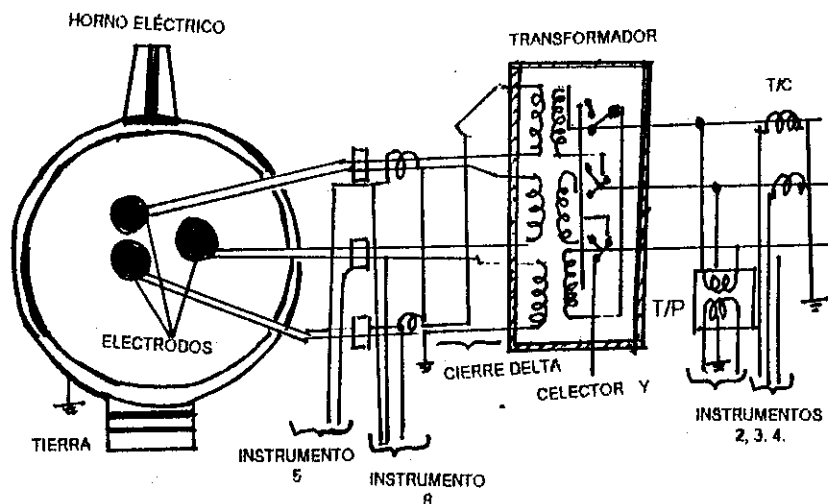
El operador debe atender estos instrumentos que van desde luces indicadoras, graficadores hasta reóstatos e interruptores, agrupados convenientemente, estos controles e instrumentos están montados cerca del horno. Para su operación, la mayoría de ellos depende de pequeñas señales de amperaje y voltaje en comparación con las grandes cantidades de energía consumida por el resto del circuito secundario.

Los medidores de potencia normalmente van conectados en el lado primario del transformador; los amperímetros, voltímetros, así como el regulador del horno, están conectados al secundario.

En el primario tanto la corriente como el voltaje son altos, se hace necesario el uso de transformadores de corriente y de voltaje, para reducir estas señales hasta el nivel requerido por los instrumentos del tablero del horno. De acuerdo a la función que desempeñan estos transformadores pueden ser de dos tipos, el transformador de corriente T/C y el transformador de potencial o voltaje T/P.

A continuación se incluye un plano eléctrico indicando donde se toma la señal que alimenta a los diversos instrumentos del tablero de control en un horno de arco típico. Ver figura 7

Figura 7 Plano de instrumentos del control del horno eléctrico



Tablero de control de un horno de arco.

1) Focos indicadores de voltaje de arco a tierra

Uno para cada fase.

2) Medidor de megawatts

Indica el total de potencia activa que está utilizada por las tres fases durante la operación.

3) Medidor de megavars

Muestra el total de potencia activa que está utilizando en operación el horno.

4) Medidor de kilowatts-hora

Registra el consumo de energía eléctrica en el horno.

5) Interruptor selector y voltímetro

El medidor indica los valores reales de voltaje de fase a fase y de fase a tierra.

6) Contador digital de kwh

Muestra una lectura digital de la misma información del medidor de kilowatts-hora. Pudiéndose restablecer a cero después de cada colada, es de gran ayuda para la implementación de programas de energía para la operación del horno.

7) Amperímetros

Mide el flujo de corriente por fase del secundario durante la operación.

8) Reóstatos para ajuste de corriente de arco

Es un medio para regular la distancia entre la punta del electrodo y la carga para cada fase. Cualquier cambio en esta distancia afectará

inmediatamente todos los parámetros relacionados con esta fase durante la operación.

9) Control de electrodos

Para subir o bajar los electrodos ya sea en modo automático o manual. Hay uno para cada fase.

10) Interruptor del tablero de control

Corta la alimentación de energía a todos los controles del horno. Se debe abrir siempre que se realice algún mantenimiento.

11) Control maestro de electrodos

Para subir o bajar los electrodos tanto en modo automático como manual.

12) Selector de derivaciones de voltaje y focos indicadores.

El selector permite al operador cambiar a control remoto los voltajes del secundario de acuerdo a los requerimientos de la operación. Los focos indican la derivación que se está usando.

13) Interruptor del circuito de potencia

Desconecta el circuito de potencia del horno interrumpiendo la alimentación en la línea de alta tensión. El interruptor deberá abrirse al efectuar la reparación de alguna falla en el horno de fusión y al cambiar los electrodos.

2. FUNCIONAMIENTO Y OPERACIÓN DEL EQUIPO

2.1 Electricidad básica

La potencia eléctrica es el voltaje (E) multiplicado por la corriente en amperes (I). Se conoce como voltaje a la diferencia de "presión eléctrica" entre un conductor por el que fluye dicha corriente eléctrica y tierra, o entre dos o más conductores. Este diferencial de presión es conocido como "potencial eléctrico".

La corriente es la razón del flujo de la electricidad a través de los conductores y se mide en amperes (I). La resistencia (R) se opone al flujo de la corriente eléctrica en un conductor. La resistencia eléctrica se expresa en ohms (Ω) y sirve para medir la fricción eléctrica de los conductores en un circuito eléctrico.

Profundizando en este concepto, un ohm es la resistencia (R) a través de la cual fluye una corriente (I) de un amperaje con un voltaje (E) de un volt. Esta es la ley de Ohm y se puede expresar de las siguientes formas:

$$I=E/R, E=I \times R \text{ ó } R= E/I$$

La potencia se expresa en watts (W) y es el producto del voltaje (E) por la corriente (I) o sea: $W = E \cdot I$. Esta fórmula es válida para determinar la potencia en un circuito de corriente directa. La potencia en los hornos de arco se mide en Kilowatts (mil Watts) y se abrevia kw, o en Megawatts y se abrevia MW. Los hornos de arco utilizan corriente alterna lo que complica un poco la fórmula de potencia.

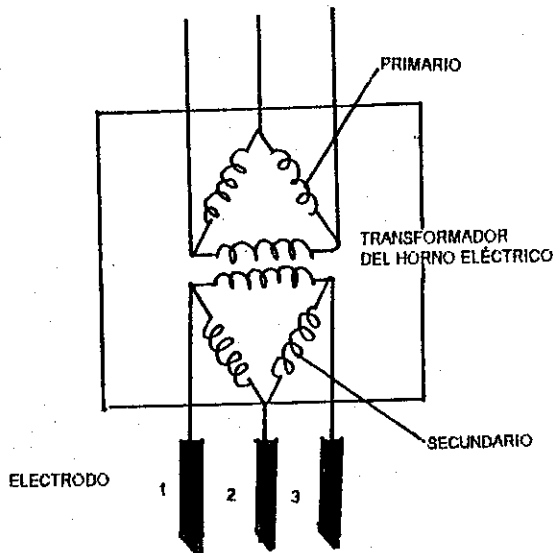
La energía eléctrica generalmente se define como el producto de la potencia (kw) por el tiempo (hr).

El horno de arco opera con corriente alterna (CA), la cual en forma contraria a la corriente directa (CD) cambia continuamente de magnitud y dirección. Generalmente, se dice que la corriente alterna "viaja" o se transmite en una sucesión de ondas características llamadas "ondas senoidales", una oscilación de este tipo constituye un ciclo.

Cuando las cargas eléctricas de operación son mayores de 440 volts, ó más utilizan sistemas trifásicos, con tres cables conduciendo energía hacia la carga. Este es el sistema en el circuito de potencia del horno de arco. Generalmente se denomina a las fases de modo 1,2,3. Ver figura 8.

Cada uno de los tres electrodos del horno de arco es alimentado por una serie de estas fases, cada fase tiene su voltaje y corriente de fase individual.

Figura 8 Sistema trifásico del horno eléctrico.



Inducción: La corriente eléctrica al fluir por los cables conductores localizados entre el horno y el transformador genera campos magnéticos concéntricos a dichos conductores. Este efecto se conoce como inducción, y se puede observar físicamente la interacción de estos campos por el constante movimiento de los cables.

Los campos magnéticos aumentan su intensidad y luego se abaten acorde con el aumento o disminución de la corriente alterna que pasa a través del conductor. Esto produce un efecto conocido como "autoinductancia", el cual actúa para oponerse a los cambios de corriente en el circuito.

Cuando varios cables conductores de energía están muy cercanos unos a otros, algunos serán atraídos y otros repelidos dependiendo de la

Cuando varios cables conductores de energía están muy cercanos unos a otros, algunos serán atraídos y otros repelidos dependiendo de la magnitud y dirección de la fuerza del campo magnético de cada cable. Este fenómeno de atracción es llamado "inductancia mutua".

La oposición al paso de la corriente en un circuito de corriente alterna causado por la autoinductancia o por la inductancia mutua, recibe el nombre de reactancia (X). En la operación del horno eléctrico de arco está presente, principalmente, la reactancia de tipo inductivo, y se le designa como (XL).

Existe también otro tipo de reactancia, llamada reactancia capacitiva, frecuentemente introducida en el circuito de potencia del horno eléctrico de arco para corregir el factor de potencia o para estabilizar las líneas de voltaje "suaves", o de baja rigidez.

En un circuito de corriente alterna hay tres clases de oposiciones al flujo de la corriente eléctrica. La primera resulta del tamaño y composición de los conductores y se llama resistencia (R), la segunda es la reactancia (XL) y la tercera es la reactancia capacitiva (XC).

El efecto resultante de la interacción de estas tres clases de oposición al paso de la corriente recibe el nombre de Impedancia (Z). Se conoce como impedancia al total de la oposición al flujo de la corriente alterna en un circuito que contiene resistencia (R), reactancia inductiva (XL) y algunas veces reactancia capacitiva (XC).

$$Z = \sqrt{R^2 + (XL - XC)^2}$$

2.2 Electrodo para HEA fabricación y cuidado

El electrodo de grafito, es un elemento clave en la operación del horno de arco, con mucha frecuencia es tratado en forma descuidada debido a sus dimensiones y el equipo que es necesario para su manejo.

Su integridad estructural es vital para un funcionamiento eléctrico satisfactorio, su almacenamiento debe hacerse bajo techo y en una superficie pavimentada y nivelada, lo que facilita y asegura las maniobras del equipo de manejo de materiales.

El almacenamiento interior también mantiene los electrodos y niples libres de humedad y polvo, listos para utilizarse. Es recomendable utilizar electrodos y niples del mismo fabricante. Si los electrodos y niples tienen que almacenarse a la intemperie, no existe problema alguno, ya que las condiciones climatológicas no afectan su rendimiento en la operación. Los electrodos deben siempre almacenarse en posición horizontal nunca vertical.

2.2.1 Proceso de fabricación

El proceso de fabricación, inicia con el triturado y clasificación del coque de petróleo de primera calidad y brea de alquitrán. Posteriormente, estos materiales son mezclados y calentados para obtener una masa plástica. Esta masa se extruye a través de un dado correspondiente al diámetro deseado del electrodo y se corta el producto cilíndrico resultante, a las longitudes comunes de los mismos. Un número determinado de éstos, se depositan cuidadosamente en un horno de cocimiento en donde

se someten a un proceso de calentamiento hasta 800°C o más por un período de tres semanas continuas, para que desaloje los materiales volátiles y se carbonice el aglutinante.

Para convertir los electrodos de carbón en grafito, se requiere además, un tratamiento térmico extensivo. Así, nuevamente los electrodos de carbón cocidos se colocan en hornos de resistencia eléctrica de alta temperatura donde reciben otro tratamiento prolongado a 2760°C o más. Este calor intenso, reestructura el carbón elemental a su característica forma cristalina que conocemos como grafito. El grafito, comparado con el carbón, es mecánicamente más fuerte, más fácil de maquinar, tiene un menor coeficiente de expansión térmica y es mejor conductor térmico y eléctrico. Además, el grafito es el único en su clase por su resistencia a elevadas temperaturas, entre más caliente más fuerte.

Cuando finaliza el ciclo, se maquilan cuidadosamente los electrodos grafitados en electrodos para hornos eléctricos de arco.

2.2.2 Causas de consumo

El electrodo es la única parte consumible del circuito. Los factores principales de consumo de los electrodos, que son básicamente mecánicos y químicos, se relacionan con el flujo de corriente a través de ellos, la manera de efectuar las uniones, los procedimientos de operación y el tiempo total de la colada.

En la etapa de fusión es normal que ocurran caídas de chatarra que golpean las columnas de los electrodos, por lo tanto es muy importante

cargar el horno correctamente y realizar las adiciones de electrodos con cuidado, para asegurar que puedan resistir estas condiciones de operación.

Cuando ha terminado la etapa de fusión, no hay chatarra que proteja los electrodos del intenso calor que irradian las paredes del horno y el baño de acero líquido. Al mismo tiempo, el aire circula libremente alrededor de las columnas de los electrodos al rojo vivo. Esta situación propicia la segunda causa de consumo de electrodo. El grafito comienza a oxidarse a los 400^o C y aumenta con temperaturas mayores. Los tres recursos más efectivos para minimizar el efecto de la oxidación son:

- 1) Fundir a la máxima potencia para acortar el tiempo de operación y disminuir así, el tiempo de exposición al aire, el electrodo.
- 2) Elevar las columnas de los electrodos sobre la bóveda del horno, si la operación es interrumpida por más de cinco minutos consecutivos en proceso de afinación o con cargas 100% fundidas.
- 3) Colocar anillos perforados en el interior, para rociar con agua la parte superior de la columna del electrodo, aunque es el método más efectivo para bajar el consumo, se debe tener mucho cuidado en su uso pues no debe ser excesivo el enfriamiento ya que aumenta el consumo de energía y aumenta la presencia de hidrógeno en acero.

El consumo originado por las roturas y rajaduras del electrodo son factores que se pueden controlar. Las causas más comunes de tales daños son, con frecuencia, prácticas incorrectas al cargar el horno,

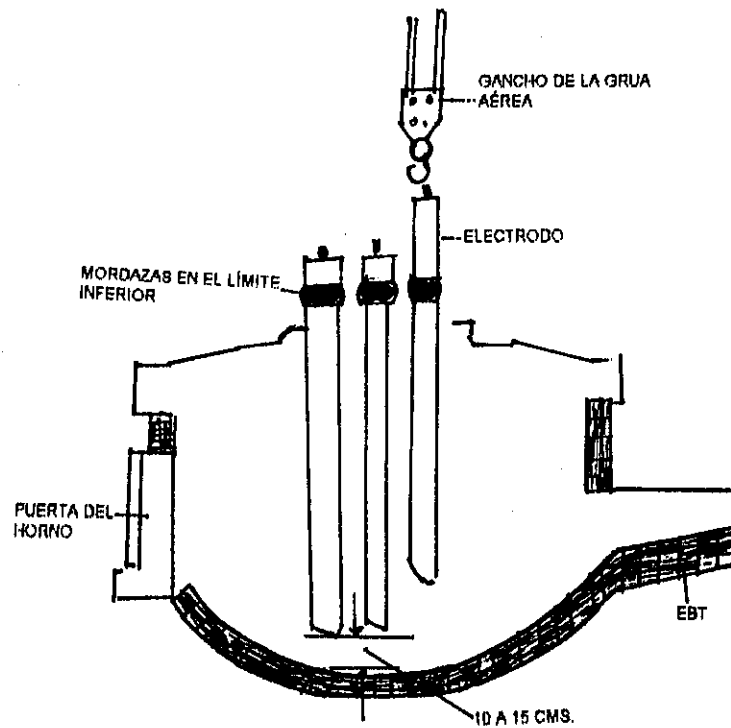
oxidación excesiva, regulación deficiente, manejo incorrecto de los electrodos y uniones deficientes.

La liberación de los electrodos tiene también una influencia importante en el consumo de éstos, y el operador del horno puede contribuir substancialmente a evitar roturas realizando este trabajo con la máxima seguridad.

La calibración de los electrodos implica la necesidad de aflojar las mordazas que sujetan a los electrodos a los brazos de manera que puedan deslizarse. Es deseable que las columnas tengan la suficiente longitud para alcanzar el baño, pero esta longitud deberá permitir elevarlos lo suficiente para abrir la bóveda sin problemas, tomando siempre en cuenta que cuando se calibra se debe dejar la punta del electrodo entre 10 y 15 cms. de la solera o piso de trabajo.

Los electrodos se calibran deslizándolos con el horno vacío mediante la intervención de la grúa de la nave. Al apretar las mordazas una vez concluida la maniobra de deslizamiento, se evitará amordazar en las uniones de los tramos de electrodo, ver figura 9.

Figura 9 Método para calibrar electrodos



2.2.2 Integridad mecánica y continuidad eléctrica

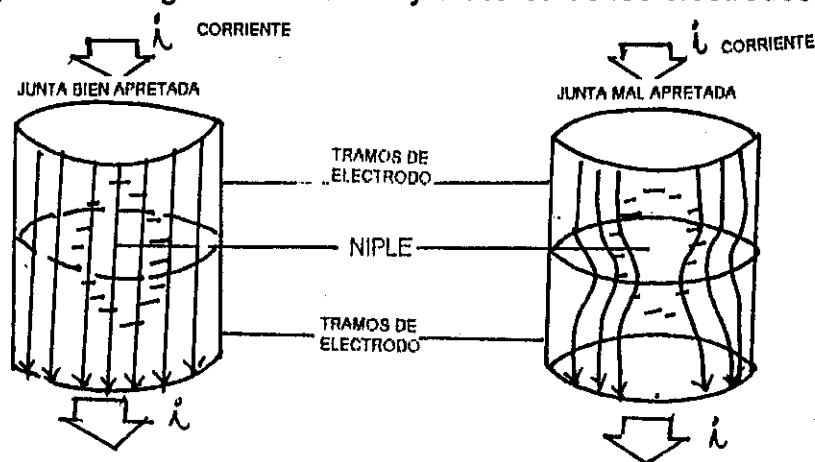
Desde el punto de vista de electrodos, son dos requerimientos esenciales para el funcionamiento satisfactorio en el horno de arco. La integridad mecánica y la continuidad eléctrica. Estos dos requerimientos están totalmente inter-relacionados, puesto que las fallas eléctricas generan sobrecalentamiento y fallas mecánicas en la columna de electrodos.

La preparación y colocación de un nuevo electrodo es importante y la unión del electrodo es crítica (niple-electrodo) ver figura 10. Hay dos pasos importantes que se deben recordar para un buen armado de los electrodos:

1) La unión deberá estar limpia, para que pueda presentar la mejor superficie de contacto para la conducción de la corriente eléctrica a través de las caras del electrodo a unir, para la limpieza de los tramos a unir se utiliza una manguera con aire comprimido para soplear durante el armado y colocación.

2) Apretar correctamente las uniones para asegurar una transferencia efectiva y un área máxima conductora de corriente entre los electrodos y su niple de conexión. Una unión floja lleva a la misma situación que una sucia, ya que el niple conducirá la corriente que debería pasar por las caras del electrodo, esto provoca que el niple se sobrecaliente y posteriormente se fracture.

Figura 10 Integridad mecánica y eléctrica de los electrodos



2.3 Regulación de los electrodos

La regulación es el principal elemento del sistema, éste es un dispositivo de control de estado sólido o electro-mecánico, alojado en el recinto del transformador. Recibiendo información del voltaje de arco y la corriente de fase del circuito de potencia del horno, el regulador promueve

condiciones óptimas de operación limitando la energía a los electrodos a niveles pre-seleccionados de potencia.

El regulador controla automáticamente el movimiento vertical de los electrodos, para mantener una distancia óptima entre las puntas de éstos y la carga del horno. Esta distancia influye en la cantidad de energía liberada en el arco. Dependiendo del tamaño del horno, una distancia grande significa un arco largo y generalmente menos potencia; una distancia pequeña significa un arco corto y más potencia.

El regulador actúa efectivamente controlando el movimiento de los electrodos una vez que el operador ha seleccionado la derivación de voltaje adecuada y el ajuste de reóstatos, pero cuando ocurre una emergencia, como una caída de carga o una falla grave en el sistema, quizá requiera la intervención del operador. Es por esto que, en el panel de control hay un interruptor manual para cada electrodo. Con una rápida acción, el operador puede tomar en control sobre el regulador y en modo manual subir o bajar individualmente los electrodos.

Al principio de operación, los tres electrodos empiezan a descender hacia la carga. Cuando el primer electrodo hace contacto con ésta, su voltaje de fase a tierra, se iguala a cero y se detiene. Puesto que no hay circuito eléctrico completo en ese punto, no fluye la corriente.

Cuando el segundo electrodo hace contacto con la carga, los arcos surgen bruscamente de ambos electrodos dando comienzo a la fusión, cuando sólo dos electrodos hacen contacto con la carga, el horno trabaja en operación monofásica. Esta es una situación que debe evitarse

siempre, especialmente durante los períodos de operación a máxima potencia. Puede acarrear graves problemas el transformador del horno.

Al fluir la corriente por los tres electrodos, el horno estará operando normalmente en modo trifásico. Los tres electrodos, controlados por el regulador, operan manteniendo una distancia predeterminada entre sus puntas y la carga. Esta operación es planeada y supervisada por el operador del horno, quien fija el voltaje adecuado.

Para el operador del horno, el movimiento constante de los electrodos será indicativo de que el regulador está respondiendo correctamente a las señales de voltaje de fase a tierra del secundario. Una buena conexión a tierra es un pre-requisito, para el desempeño adecuado del regulador.

En la etapa de profundización en la que ocurre algunos movimientos bruscos de los electrodos prevalece hasta que los electrodos empiezan a formar el arco en el fondo del horno con el baño del acero líquido.

En la operación al ocurrir alguna caída de carga, actúa el regulador elevando los electrodos para eliminar así el peligro de rotura. Un regulador deficiente, por ajuste incorrecto, o por falta de mantenimiento, puede accionar demasiado lento para salvar el electrodo o podría clavar el electrodo en la carga.

Los reóstatos brindan al operador un medio temporal de corregir algún desbalance eléctrico. En el horno debe de tenerse cuidado en el uso de los reóstatos porque podría causar la rotura de un electrodo.

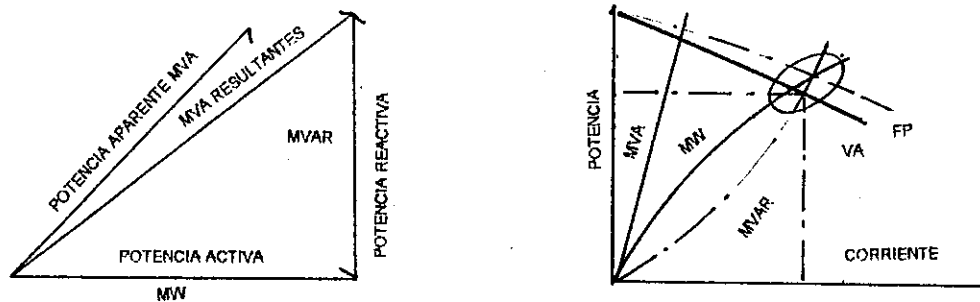
2.4 Potencia en el circuito de corriente alterna

La potencia se presenta en tres formas diferentes: Potencia aparente (MVA); potencia reactiva (MVAR); y potencia real o activa (MW).

Desde el punto de vista del operador, la más importante de estas potencias, es la real o activa (MW); ésta es la que funde la carga.

El operador puede maniobrar el horno para lograr un rendimiento óptimo de la planta en general. Es muy interesante, por ejemplo, el hecho de que aunque puede ocurrir que la operación eléctrica más económica se ubica en donde se intersectan la potencia activa (MW) y la potencia reactiva (MVAR), como se muestra en la figura 11.

Figura 11 Gráfica de las tres diferentes potencias.

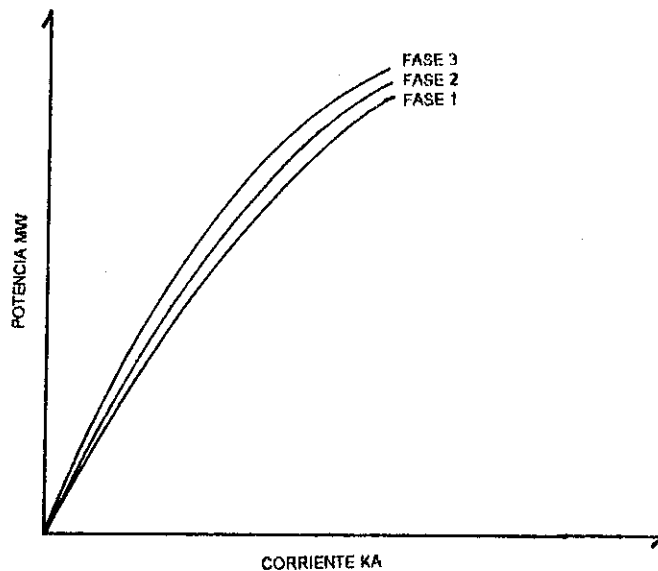


El punto de máxima potencia eléctrica no coincide con el punto de mayor producción. En la mayoría de las instalaciones, el punto de operación más económico se encuentra en el área sombreada cerca de la línea horizontal que indica la potencia máxima.

Es esencial que los operadores estén muy bien instruidos en todos los aspectos de la operación del horno eléctrico, dando énfasis en particular a la optimización de la producción.

Las tres fases en un horno eléctrico tienen las mismas características eléctricas y la energía fluye igualmente en cada fase o electrodo, como se muestra en la figura 12.

Figura 12 Gráfica de un horno balanceado.

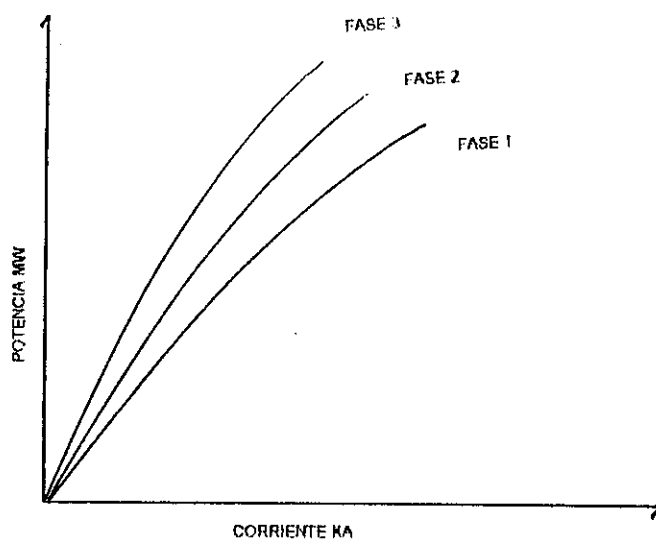


Sin embargo, en la operación del horno eléctrico hay una tendencia natural hacia el desbalance. Esto se presenta debido a características eléctricas desiguales en varias partes del circuito de potencia, lo que afecta la cantidad de energía que fluye a través de cada fase; por ejemplo; el electrodo de la fase 2 puede estar alimentando por un cable más corto,

ofreciendo menor resistencia, y por lo tanto, recibe más energía que los electrodos de la fase 1 y 3.

El operador puede efectuar una acción compensadora en el horno, regulando el sistema para minimizar el desbalance, ver figura 13.

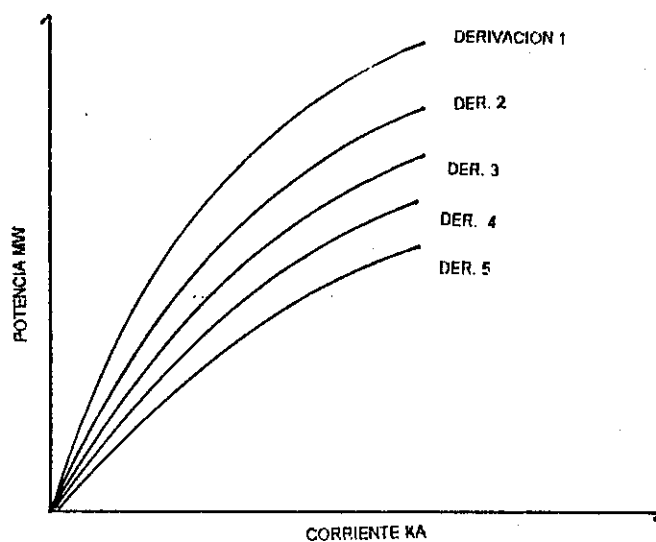
Figura 13 Gráfica de un horno desbalanceado.



Es fácil que el operador se preocupe por la potencia hasta el punto de hacer a un lado otros parámetros eléctricos, como el voltaje, con el solo hecho de accionar un interruptor se puede cambiar de derivación aumentando o disminuyendo el número de bobinas en operación en el primario del transformador del horno, variando apreciablemente el voltaje en el secundario. Esto también altera la potencia de entrada. Esta acción se conoce como cambio de derivación (tap).

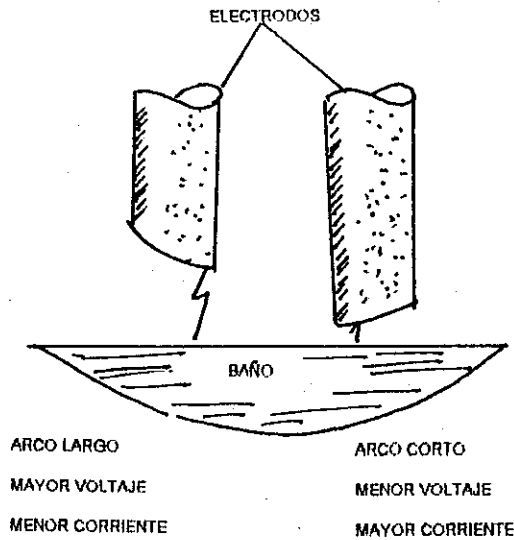
Al cambiar de derivación se inicia una serie de reacciones, que afectan finalmente la operación del horno. La idea básica es utilizar la derivación con mayor voltaje para obtener la mayor potencia (MW) necesaria para la fusión; cuando ésta ha terminado, cambiar a una derivación de menor voltaje para refinar, ver figura 14.

Figura 14 Derivaciones típicas de un horno eléctrico



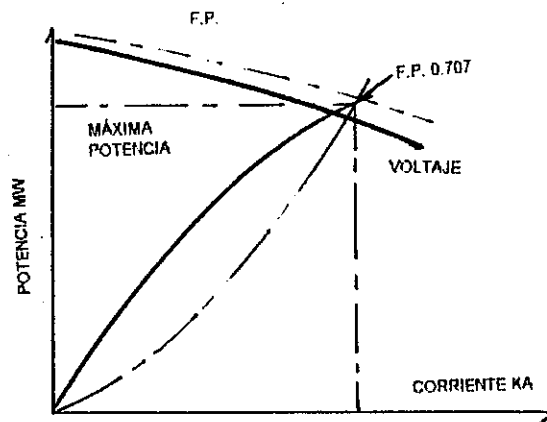
Lo más importante es, sin embargo, que al variar el voltaje cambia también la distancia entre la punta del electrodo y la carga, lo que significa que la longitud del arco varía también. Este es factor de vital importancia en la producción de acero líquido, ver figura 15.

Figura 15 Longitud de arco en el horno eléctrico.



La corriente (KA) y el factor de potencia varían al cambiar de derivación. La curva de potencia revela que al disminuir la corriente (KA), la potencia puede disminuir o aumentar dependiendo del punto de la curva de potencia activa en que se empiece a reducir la corriente. Y, de acuerdo con la ley de Ohm, un cambio de corriente produce un cambio de voltaje, lo que es muy importante, ya que el voltaje afecta la longitud de arco ver figura 16.

Figura 16 Curva de potencia



El punto 0.707 representa el punto eléctrico óptimo donde la potencia activa y la reactiva son de la misma magnitud, pero no es necesariamente el punto óptimo de producción para la mayoría de hornos de arco.

3. PROCESO DE FABRICACIÓN DE ACERO AL CARBONO

3.1 Consideraciones básicas para la preparación de la carga (chatarra)

La chatarra es clasificada y descargada en el parque, por lo que la superficie total del mismo es grande, y situado fuera de la acería. En el parque se dispone de grúas aéreas llamadas "pórticos" para descargar y luego compactar la chatarra voluminosa, también se dispone de grúas móviles para clasificar y descargar la chatarra en lugares apartados de la acería.

Dentro de la acería, en la nave de chatarra preparada, hay dos grúas aéreas que llenan las cestas, una con una "garra" electro-hidráulica para cargar piezas grandes y pesadas, y otra con un electroimán para cargar piezas pequeñas.

El mercado nacional de chatarra no es muy alentador en cuanto a calidad se refiere, sin embargo, con alguna frecuencia se puede contar con chatarra de buena calidad, luego es importante saber qué clase de chatarra es mejor que otra. Para clasificar en lo posible los residuales, por tal motivo, se lega al recurso de clasificar la chatarra como sigue:

- Merms del proceso de fundición y laminación
- Chatarra compactada (pacas)
- Briquetas

- Chicharrón (chatarra prerreducida)
- Riel de ferrocarril
- Chatarra de troquelado
- Estructuras
- Miscelánea (chatarra de diferente clase)

Para hacer uso racional de la materia prima es necesario analizar ciertos factores como calidad del acero que deba producirse; mismo que estará perfectamente definido por sus especificaciones químicas, tales como sus porcentajes de cobre, níquel, cromo, molibdeno y estaño, o bien la suma de éstos. Los contenidos máximos de fósforo y azufre, aunque estos son escorificables durante el proceso, según sus condiciones preliminares implican un mayor tiempo de refinación, en nuestro caso, que estamos considerando 100% de chatarra con altos contenidos de estos residuales en algunos casos; es importante que desde la primera carga se adicione cal para formar una escoria que permitirá dosificar estos elementos.

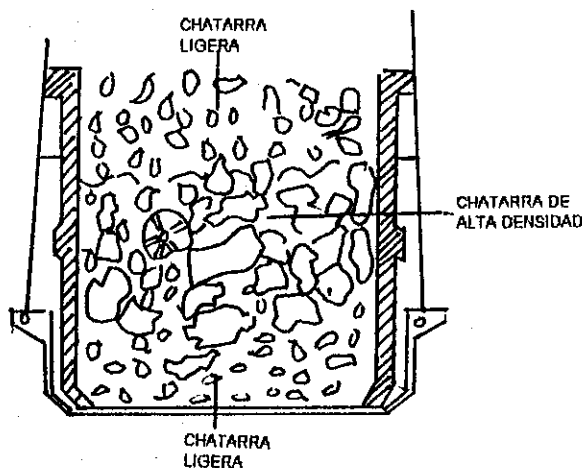
De esta forma se tiene una idea de qué clase de residuales se obtendrán al final del proceso de fusión y así se puede hacer una tabla con alternativas que permitan establecer la mejor carga de acuerdo con la existencia de chatarra y la calidad de acero a producir.

3.1.1 Llenado de las cestas

Las cestas son llevadas, de la nave de acería a la nave de chatarra preparada por un carro báscula, éste registra el peso de la chatarra y fundentes que se cargan a la cesta.

El llenado de las cestas con chatarra implica tomar en consideración el objetivo es hacer menos frecuentes los paros del horno para recargues, y sobre todo que no se pierda tiempo por quedar copeteado después de un recargue, así también considerar que la chatarra de baja densidad nos trae este problema, además de que se incrementan los movimientos de las grúas y suceden frecuentes fallas, por lo que se recomienda un acomodo como el que se muestra en la figura 17.

Figura 17 Distribución de la chatarra en las cestas.



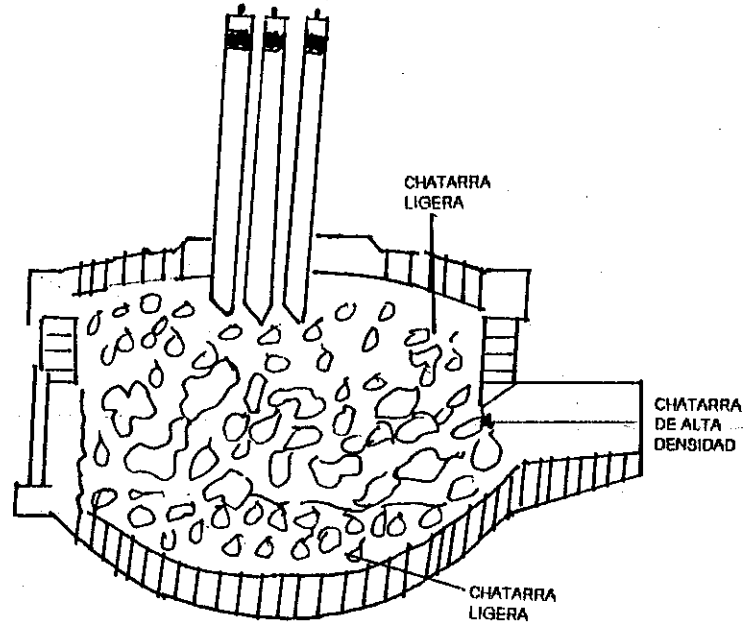
3.1.2 Adición de fundentes

Para la elaboración de un buen acero es inevitable, un determinado tiempo de afino, es por ello que se necesita de fundentes tales como cal, coke, escorias sintéticas, en la primera y segunda cesta, dependiendo de la cantidad y tipo de chatarra a cargar, para obtener un buen análisis de fin de fusión. Esto se hace para lograr el desequilibrio químico entre los óxidos de hierro disueltos en el acero y en la escoria, también se logran azufres más bajos de fin de fusión.

3.1.3 Recargues en el horno

La chatarra de mayor densidad optimiza los tiempos de recargue y fuga de temperatura ganada, acortándose los tiempos de tap to tap en forma considerable y si a esto se le suma una buena distribución de chatarra en la cesta como se muestra en la figura N. 17, entonces al llegar al horno tendremos una distribución ideal, de tal manera que facilitará el proceso de fusión ver figura 18.

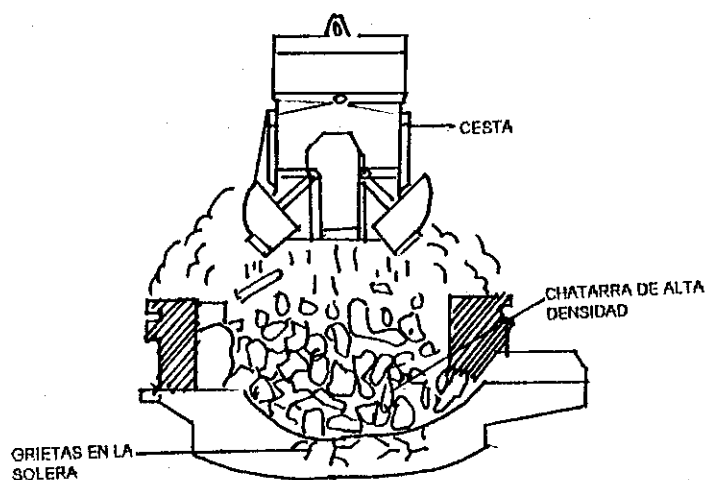
Figura 18 Distribución de chatarra en el horno.



Es importante que en la parte superior de la carga haya chatarra ligera para que permita la penetración rápida de los electrodos, alcanzando la máxima potencia en el menor tiempo posible, evitando así el menor daño al refractorio de la bóveda y de las paredes del horno.

No está por demás dejar establecido que cuando no se toman todas estas medidas puede ser que se dañe seriamente la solera, puede llegar incluso a tener consecuencias muy serias, por los daños materiales y personales que pueden ocurrir, ver figura 19,

Figura 19 Carga mal preparada y sus posibles consecuencias al cargar el horno.



3.2 Fusión de la carga

Inmediatamente después de cargar, se energizan los electrodos y comienza la fusión.

La carga normalmente llega en la cuba del horno hasta la parte alta o raíz de la bóveda, como se indicaba en la preparación de cargas, y su disposición en el horno, en esta parte deben estar situadas las chatarras pequeñas y sueltas, que funden rápidamente aplicando una potencia baja, de manera que penetren los electrodos en la chatarra sin deterioro

de la bóveda por el arco eléctrico de cada electrodo, quedando éste oculto, y después poder aplicar la máxima potencia.

Durante la fusión, los electrodos perforan la carga fundiendo cada uno, una sección superior al diámetro del electrodo en función de la longitud del arco (con arcos largos funde mayor diámetro). En el centro de la carga, siempre existen chatarras densas para cuando se aproximen los electrodos a la solera, se habrá formado sobre ésta un baño líquido, y así no se dañe el refractorio del revestimiento al estar los arcos protegidos por chatarra. Por otra parte, también hay que tener en cuenta, que una vez llegados los electrodos al fondo, la chatarra que exista se sobrecalienta extraordinariamente, y si está sobreoxidado el FeO hace bajar el punto de fusión de los refractorios, y se desgastarán fácilmente. Suele ser prudente bajar un poco la potencia cuando los electrodos están abajo, si se considera que por chatarras poco densas puede haber muy poco acero líquido sobre la solera.

Debemos recordar que el fin del acerista, es conseguir una fusión rápida, con el mínimo consumo de energía y con el menor deterioro de los revestimientos refractorios, teniendo en cuenta que hay tres períodos delicados:

- a) El correspondiente justamente al comienzo de fusión de cada cesta, cuando el arco puede dañar la bóveda.
- b) El correspondiente a la llegada de los electrodos a la solera.
- c) El período de fin de fusión cuando el arco es muy largo, la radiación muy intensa, y la tensión elevada, que puede dañar la bóveda y paredes más allegadas a los electrodos.

De todo el proceso, el período de fusión es el que más energía consume, pues representa normalmente 50 y 70 % del tiempo total utilizando tensiones elevadas.

Durante la fusión, la escoria generalmente formada por una mezcla de cal y grafito, permite dar características aptas para el comienzo de la desfosforación antes de terminarse la fusión de la carga.

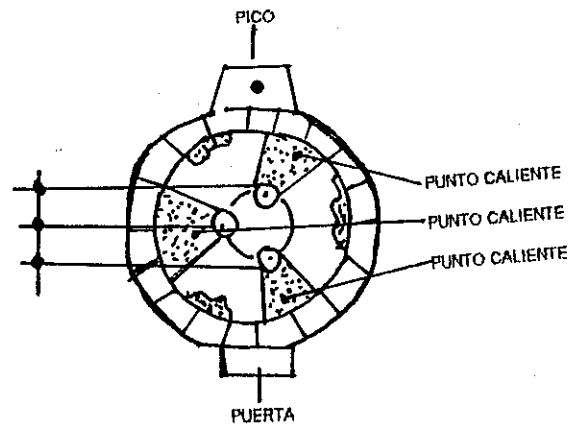
Cuando termina la fusión se obtiene un baño a baja temperatura, y poco homogéneo en su composición y que sostiene en solución óxido de hierro e impurezas no deseables, etc. Y que debe tener en su composición un contenido de carbono suficiente para iniciar el afino oxidante (preafinación), propiamente dicho.

3.2.1 Fusión con escoria espumosa

La escoria es la mezcla de óxidos (FeO_2 , SiO_2 , MnO , P O_5 , MgO , Al_2O_3), proveniente tanto de la carga metálica (chatarra) como de los fundentes (cal, coke, y otros).

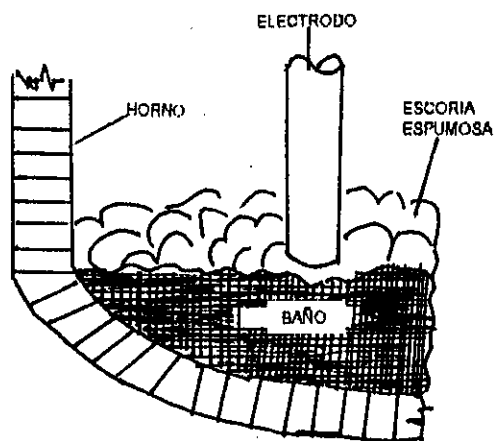
La creación de una escoria espumosa permite que la punta de los electrodos quede oculta, obteniéndose un mayor aprovechamiento de la potencia del arco, evitando pérdidas por radiación y menor ataque a la bóveda y paredes del horno; sobre todo los lugares que más se exponen a un deterioro fuerte, son los llamados puntos calientes de las paredes mostrados en la figura 20.

Figura 20 Localización de los puntos calientes en el horno.



Para el objetivo de hacer una escoria espumosa de los beneficios esperados, ésta deberá de alcanzar un espesor entre los 30 y 35 cms. ver figura 21.

Figura 21 Protección de las paredes del horno mediante la escoria espumosa.



En estas condiciones se procede a buscar el nivel más alto de potencia con la menor caída de voltaje; es decir mantener arcos largos graduándolos por medio de reóstatos.

Otra forma segura de encontrar el valor adecuado de un arco largo es considerando un factor de potencia en el sistema eléctrico del horno de 0.82% con este valor se calcula la corriente que debemos leer en nuestro amperímetro del tablero ajustándolo con los reóstatos.

El cálculo se hace con la siguiente expresión:

$$X = (KVA / KV) (\sqrt{3} \text{ f.p.})$$

X= Corriente

KVA= Potencia

KV= Voltaje

3= constante

fp= factor de potencia

En caso de tener cargas demasiado densas es necesario operar los electrodos en manual, hasta conseguir un movimiento estable; después del cual se debe continuar en automático.

Considerando que los arcos están protegidos por la escoria espumosa se llevan de un arco corto durante tres minutos a un arco largo hasta finalizar de semifundir la carga, para volver a proceder de la misma forma que las demás cargas.

Bases para la formación de la escoria espumosa.

Esta práctica se desarrolla de la forma siguiente:

- 1) En la primera carga debe de agregarse grafito a una proporción de 4 kgs. por las toneladas totales de la orden de carga y por ejemplo si la carga total en el horno va a ser 60 tons, debemos de agregar 240 kgs. de grafito más 700 kgs. de cal.
- 2) Empezar a fundir con arco corto durante 60 seg. tiempo suficiente para hacer una penetración de electrodos, pasado este tiempo abrir los arcos,
- 3) A la segunda carga se le agregan otros 700 kgs. de cal.
- 4) En esta segunda carga proceder con el punto N. 2, con respecto a los arcos además en esta etapa se introduce un tubo para insuflar oxígeno en el fondo del horno donde hay acero líquido a una presión de 2.5 kg/cm^2 en estas condiciones se empieza a formar la escoria espumosa.
- 5) Se procede en todas las cargas que falten de la forma explicada en el punto 4.
- 6) Al lograr una temperatura en el acero de 1560° C se empezará a escoriar y sacar la primera muestra para un análisis químico.
- 7) Al pasar a la etapa de afinación y dependiendo del análisis preliminar, debe formarse la escoria espumosa, agregando grafito encima de la escoria que se tenga y seguir insuflando oxígeno, un hecho característico

es que siempre el horno emitirá un ruido sordo permitiendo trabajar con un arco corto cuyo factor de potencia debe ser de 0.65.

8) Al alcanzar la temperatura deseada proceder a bloquear para vaciar el acero.

Los beneficios que aporta esta técnica son, mejor aprovechamiento de potencia, se funde más rápido, se protegen las paredes del horno, menos desgaste de electrodos, disminuye el ruido y se tienen menos KWH/Tn.

3.2.2 Preafinación

Desfosforación

El fósforo es un elemento indeseable en el acero, endurece y confiere un grano grueso, dando luego fragilidad. El contenido peligroso varía en función del resto de los constituyentes del acero, mientras que un alto contenido de fósforo hace un acero duro que sea rechazado por la fragilidad que posee.

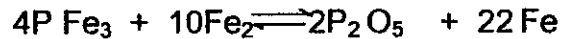
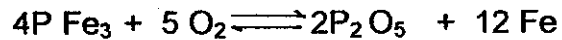
Los principios fundamentales que rigen la combinación son los siguientes:

1) Por oxidación, se transforma, en anhídrido fosfórico.



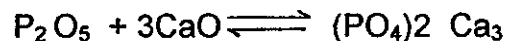
$4P + 5FeO \rightleftharpoons P_2O_5 + 5Fe$ (reacción con el óxido de hierro)

En la práctica las reacciones de oxidación del fósforo, serían partiendo del fósforo de hierro, tal y como se encuentra el fósforo en el acero, aunque en esencia las reacciones serían las mismas.



En cualquiera de los casos, este anhídrido fosfórico ($P_2 O_5$) continua de forma inestable en el baño de acero, pero es capaz de combinarse rápidamente con la cal en circunstancias favorables.

- 2) Este anhídrido fosfórico formado ($P_2 O_5$) se disuelve en la cal de la escoria formando fosfato de cal y queda en ella.



Este fosfato de cal o fosfato tricálcico $(PO_4)_2 Ca_3$ formado, puede eliminarse mediante el desercoriado. Tenemos pues que contar con aportaciones fundamentales para la posible desfosforación, el oxígeno y la cal, bien en forma de oxígeno gaseoso, bien en forma de mineral de hierro. Debe aportarse durante la fusión de la carga con el fin de que paralelamente con la fusión se produzca una buena parte de la desfosforación del baño líquido, pero intervienen también otros factores que tienen influencia en las reacciones indicadas de la desfosforación como son:

- a) La temperatura del baño
- b) La fluidez de la escoria
- c) La basicidad de la escoria
- d) El contenido de carbono del baño

e) La presencia de otros elementos oxidables en el baño fundido.

a) La temperatura del baño

La baja temperatura es favorable. El fósforo está pasando a la escoria durante la fusión realizada en presencia de escoria básica y oxidante, pues se oxida a baja temperatura, antes que el carbono.

Una vez fundido continúa la desfosforación durante el "hervido" o "trabajo de baño", que si bien a medida que sube la temperatura va perdiendo la acción favorable de ella, contamos con que los otros cuatro aspectos que favorecen la desfosforación mejorarán, aunque es un hecho evidente que si la temperatura aumentase extremadamente no se puede optimizar la desfosforación,

b) Fluidez de la escoria

La escoria para la desfosforación es más activa, cuando es más fluida, para lo que es una técnica normal la aportación de espato de fluor (F_2Ca), que además de bajar el punto de fusión de la cal, se combina con la sílice de la escoria, eliminándose en forma de gas.

c) La basicidad de la escoria

Para que el anhídrido fosfórico (P_2O_5) pueda pasar a la escoria, es necesario una cantidad de cal libre de ella, es decir que tenga una determinada basicidad. La sílice (SiO_2) en la escoria fundida proviene de la oxidación de Si de la chatarra y tiende a formar silicatos de calcio o

silicatos complejos de manganeso y calcio, y el anhídrido fosfórico (P_2O_5), decíamos que tiene afinidad con la cal, formando fosfato de calcio, pues bien para que estas combinaciones se produzcan con facilidad debe existir una proporción igual o superior tres veces entre la cantidad de cal (CaO) y la suma de sílice (SiO_2) y el anhídrido fosfórico (P_2O_5) calculado en pesos moleculares, ejemplo:

$$\frac{CaO}{SiO_2 + P_2O_5} \geq 3$$

Peso atómico del P = 31.02

Peso molecular del P_2O_5 = 142.04

Peso atómico de Si = 28.06

Peso molecular de del SiO_2 = 60.06

Peso atómico de Ca = 40.07

Peso molecular de CaO = 56.07

Peso atómico del O = 16.00

Si tenemos 60,000 kg. de chatarra cargada y suponemos que contiene fósforo del orden de 0.050 % de P y 0.35 % de Silicio, que entre chatarra de baja calidad podemos considerar normales, resulta que oxidando ambos elementos formarán:

$$0.050 \times 600 = 30 \text{ kg. de P} = 68.5 \text{ kg. de } P_2O_5$$

$$.0350 \times 600 = 210 \text{ kg. de Si} = 450 \text{ kg. de } SiO_2$$

$$\text{luego } 3 \times (68.5 + 450) = 1.553.5 \text{ kg. de cal}$$

Son necesarios para disponer del índice de basicidad adecuado para la buena condición de desfosforación.

Estas cifras, o cantidad de cal necesaria, son base de cálculo en función de la cual debe aumentarse, si se supone hayan sido cargadas chatarras siliciosas, que a la misma cantidad de cal aportada hará reducir el índice de basicidad indicado.

Por otra parte, si existe en la escoria gran cantidad de sílice (SiO_2) que con la cal formará Silicato de calcio (SiO_3Ca), resulta que éste no se disuelve al anhídrido fosfórico (P_2O_5), y que cuando tal circunstancia exista, es necesario hacer un desescoriado parcial cuanto antes, una vez finalizada la fusión, y a continuación hacer una nueva aportación de cal, grafito en polvo, y aumentar la oxidación si fuere preciso.

d) Contenido de carbono del baño

Inmediatamente finalizada la fusión, el acerista debe proceder a sacar una muestra de control, que permita conocer la situación real del baño fundido. Le definirá si está el carbono normal, realizar la desfosforación y un afino normal, si está bajo la necesidad de aportar manganeso, etc., pues tal importancia, siempre existe exceso de óxido de hierro (FeO) disuelto en el baño, que debe moderarse cuanto antes a límites normales para continuar.

Si por el contrario está el carbono excesivamente alto, no es posible la perfecta desfosforación en tanto no baja el carbono, en cuyo caso es preciso bajarlo, pero sin subir en exceso la temperatura, cosa que no siempre es fácil, ya que al tener carbono muy alto, es frecuente la presencia de silicio en el baño sin oxidar, el manganeso también puede

encontrarse alto, y sus reacciones de oxidación son exotérmicas, el fósforo en consecuencia habrá también fundido alto.

En estos casos debe oxidarse con oxígeno sin corriente de arco y mejor promediando la oxidación con oxígeno y mineral, al ser endotérmica la reacción de descomposición del mineral y que en realidad enfría el baño.

e) Presencia de otros elementos oxidables

La presencia en el baño fundido de altos contenidos de Si, Mn, Cr, residuales de V, Al, etc. dificultan claramente la desfosforación. Cuando éste caso es previsto, conocidas las chatarras, es preciso aumentar la oxidación durante la fusión, y cuando aparece el baño de fin de fusión, de forma imprevista, es necesario oxidar todos los elementos antes de calentar el baño líquido, preferentemente con mineral de Fe, ya que se oxidarán todos ellos en frío. Después de oxidar todos estos elementos con su mayor parte, siempre es conveniente sacar la escoria al menos parcialmente y bonificar con nueva aportación de cal y grafito antes de calentar el baño, para evitar que el fósforo de la escoria vuelva a retornar al mismo, y continuar con el afino normal.

Afino oxidante

Es parte de la preafinación y es realizado en el horno eléctrico al finalizar la fusión. Esta fase de la elaboración, es una de las principales del proceso.

Afinar quiere decir, hacer en este caso el acero más puro, y se caracteriza efectivamente por la eliminación de ciertas impurezas.

El afinado se realiza oxidando el baño metálico en el horno eléctrico, por insuflación de oxígeno.

El carbono es un elemento que juega un papel primordial en el afinado oxidante. Es el único que por oxidación se elimina en forma gaseosa, provocando un "hervido", que es esencialmente importante por las razones siguientes:

a) Ayuda a la toma de calor del baño

Al comienzo de la fusión en los hornos eléctricos de arco, los electrodos perforan la chatarra formando un pequeño baño de acero sobre la solera y continúa la fusión de abajo hacia arriba, debido a éste baño de acero.

El poco baño es sobrecalentado hasta que llega a ocultarse toda la chatarra en este baño líquido. Entonces el horno eléctrico calienta de arriba hacia abajo, es decir, sobrecalienta la superficie.

Solamente el desprendimiento de CO, provocado por oxidación de oxígeno, provoca una buena turbulencia o agitación que permite el fin deseado.

b) Elimina gases

El afino oxidante reduce muy considerablemente los contenidos principalmente de nitrógeno e hidrógeno, actuando las burbujas de CO " con efecto "barredor", arrastrando mecánicamente estos gases mediante un "hervido" o "trabajo de baño", pudiéndose ser rebajados hasta límites admisibles que no supongan graves problemas de calidad.

Debe tomarse en cuenta que hay elementos en el acero que favorecerían la disolución del hidrógeno, como lo son el manganeso, níquel; etc, y por el contrario otros como el silicio disminuyen pero éste concretamente es portador de hidrógeno especialmente en FeSi.

El afino oxidante debe llegar a su fin bajando el carbono, el fósforo y los gases más o menos paralelamente en las situaciones citadas manteniendo el manganeso el límite prudencial.

Al final del afino oxidante es preciso antes de pasar a la fase siguiente no tener mucho exceso de oxígeno disuelto en el baño, supondría formación de abundantes inclusiones.

La solubilidad del oxígeno del baño aumenta de manera alarmante a medida que disminuye el carbono por debajo de 0.10% de C, y hasta límites extremos, cuando el carbono es inferior a 0.06% razón está para que en estos casos sea preciso arreglar la sobreoxidación sacando la escoria cuya oxidación estará más o menos en equilibrio con el baño líquido, aportar o diluir la escoria con nueva cal, proceder a carburar el baño si la composición permite y con manganeso ir desoxidando un poco

para lograr que se elimine el exceso de oxígeno disuelto que en la fase siguiente que con aleaciones nos formarían óxidos o inclusiones.

Desde el comienzo del afino oxidante, la utilización de cal nunca perjudica la calidad del acero, aumenta los consumos de energía y electrodos.

c) Homogenización de la composición

Durante el afino oxidante realizado en condiciones, automáticamente se realiza una perfecta homogenización de la composición química y de la temperatura que el baño recién fundido no dispone, y que durante toda la elaboración es preciso asegurar.

d) Aceleración de las reacciones

Durante el afino oxidante por simple hecho de disponer el baño "hervido", se aceleran las reacciones automáticamente.

e) Acción sobre las inclusiones

Durante el llamado "hervido" o "trabajo de baño" del acero, éste evacua a la escoria todas las impurezas del baño arrastradas por decantación ayudadas por las burbujas de CO que ascienden.

El manganeso hace un papel beneficioso durante el afino oxidante, la razón es la facilidad de combinarse con el oxígeno (FeO en exceso), dando MnO, y disminuyendo el contenido de aquél.



Una vez finalizado el afino oxidante, es de considerar como dato extremadamente importante la necesidad de aportar Mn al baño, que irá reduciendo el exceso de FeO de éste, para descorlar hacer nueva escoria con cal, y continuar aportando Mn, hasta lo que permita su composición a fin de que sin llegar a un "bloqueo" o "calmado total", se vaya produciendo la desoxidación paulatina del metal con formación de inclusiones de manganeso (MnO). Paralelamente irá transformándose los sulfuros de hierro (SFe) en sulfuros de manganeso (SMn).

El paso del período oxidante al reductor, se caracteriza por el desescoriado, consiste en extraer del horno la escoria oxidada y negra.

3.2.3 Vaclado del acero

Hay que cuidar que pase el mínimo de escoria del HEA a la olla y la temperatura de vaclado pues ésta ha de ser máximo 1610⁰C y mínimo 1600⁰ C, dependiendo del carbón equivalente que se vacié (tipo acero). Agregar primero la cal, después las ferroalineaciones y la agitación al máximo así mismo hay que cuidar la cantidad de cal adicionada así como su calidad evitar que esté hidratada).

Condiciones de vaclado de HEA al LF

Se debe vaciar a la temperatura correcta con el carbón de vaciado correcto y el azufre de 0.035 a 0.040 % máximo sin dejar pasar escoria del HEA y con la cantidad de acero requerido 55 tons. Ya que si la cantidad

de acero es menor o mayor el nivel de escoria puede salir de la zona diseñada para ella y el ataque al refractorio de la olla será mayor. En el caso del acero de bajo carbono, se requiere que en el HEA se desoxide antes de vaciar, insuflando al baño de oxígeno y agregando escorias sintéticas, desulfurantes y desoxidantes.

La olla es un recipiente de acero con revestimiento interior de ladrillo refractorio (dolomítico o magnésítico), con tapón poroso en el fondo para inyectar nitrógeno a presión, este tapón es de refractorio poroso permeable al gas pero, no al acero. La olla es precalentada por quemadores de diesel a una temperatura de 1000⁰ C, antes de vaciar el acero en ella, esto se hace para no provocar un cambio demasiado brusco entre el acero y la olla; y pierda demasiada temperatura el acero.

El vaciado se realiza mediante un mecanismo llamado EBT (Excentric Botton Tapping), esta tecnología consiste en la ubicación del agujero de colado en un extremo del fondo del horno (solera).

Las ventajas que se persiguen con la incorporación de este sistema podríamos resumirlas en:

Permite el vaciado del acero a la cuchara (Olla) libre de escoria.

Facilita las operaciones de vaciado al tener la apertura sin el uso de lanza de oxígeno.

Disminuye el tiempo de vaciado.

Al terminar el vaciado hay que cuidar de que quede un pequeño remanente de acero sobre la solera del horno "pie líquido" (5% del baño), ayudará a la fusión de la siguiente colada.

3.3 Afinación (refinación)

La afinación es realizada en el horno de afino con aportación de nueva escoria al agregarle a la olla cal, y agentes desoxidantes, tales como el grafito, carbón en polvo, carburo de calcio, etc. Que se caracteriza a su vez por su color gris o blanco.

Ya en la fase reductora se aumenta el Mn al baño, que reaccionará con el FeO, dando MnO, que pasa más rápida a la escoria ($\text{FeO} + \text{Mn MnO} + \text{Fe}$) de lo que haría el óxido de hierro, pero en ningún caso aportando al baño otros elementos reductores, tales como el Si, Al, etc., que "bloquearán" el baño retardando las reacciones de desulfuración y la decantación.

Si la escoria oxidada se sacó en el HEA, se formó otra escoria nueva con cal, grafito, carbón o carburo, agregados a la olla en el proceso de vaciado, existe una escoria y atmósfera reductora, y sin óxidos de hierro, que con sólo el contacto de ella con el baño aun ligeramente efervescente irá reduciendo los óxidos existentes en el metal, y la desulfuración continuará eficazmente a su vez se reoxidará la escoria por enriquecimiento de óxidos.

3.3.1 Desoxidación

Tal es la teoría, de forma que desoxidando la escoria, ésta se encarga de la desoxidación del metal. Este sistema de desoxidación es llamado "Desoxidación por difusión", y su objetivo es desoxidar el baño, evitando en lo posible la formación de residuos o inclusiones metálicas en él. Por eso, en lugar de introducir desoxidantes en el baño, tales como el Si, Al, etc., se busca únicamente poner en contacto el baño con una escoria tal, que los equilibrios fisicoquímicos, que se establezcan en ambos den como resultado un mínimo contenido de oxígeno en el baño.

Según este sistema de desoxidación se realiza substancialmente las siguientes reacciones:

En el baño $Mn + FeO \longrightarrow MnO + Fe$ (son inclusiones necesarias como mal menor) que incluso se pueden evitar parte, desoxidando la escoria antes de aportar el complemento de FeMn.

El acero continúa semicalmado, evacuando burbujas de CO a la atmósfera. Pero con la nueva escoria desoxidante en un principio carece de óxidos y si contiene C y C₂Ca, primeramente reacciona con el óxido de manganeso formado, y que sube a la escoria debido a la aportación de FeMn, según la reacción anterior y resulta:

$C + MnO \longrightarrow CO \uparrow + Mn$ (CO que va a la atmósfera y Mn que pasa de nuevo al baño)

$C + FeO \longrightarrow CO \uparrow + Fe$

$C_2Ca + 3MnO \longrightarrow CO \uparrow + 2Mn + CaO$

Como la reacción con el carburo de calcio es más enérgica como desoxidante que el propio manganeso, debido al calcio del carburo, reacciona incluso con el óxido de hierro posible en el baño.



La desoxidación por el carbono, tiene otra buena propiedad, y es que su afinidad por el oxígeno crece con la temperatura, al contrario que ocurre con el resto de los desoxidantes, cuyos óxidos tienden a disociarse a elevada temperatura. Esto es lo que explica que a elevada temperatura el carbono reduzca casi todos los óxidos, aún los más reacios.

El sistema de desoxidación, conocido como desoxidación por difusión, el comienzo es relativamente activo, pero a medida que es reducido el FeO y MnO del acero pierde su efervescencia, y la desoxidación final es extremadamente lenta.

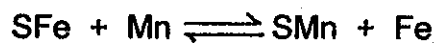
Durante el estudio de la desoxidación del acero, no podemos omitir una de las dificultades que con mayor frecuencia se presenta en la práctica, y es la oxidación de la solera.

En el comienzo de la fase de fusión el baño está excesivamente rico en óxidos el hierro (FeO), y que los refractarios tienden a absorber una parte de este óxido.

Al pasar a la fase de desoxidación pasa de nuevo al metal y tiene que forzar y alargar el período de desoxidación.

3.3.2 Desulfuración

De igual forma que los óxidos de hierro (FeO), van pasando a los óxidos de manganeso, durante la desoxidación con manganeso ocurre también que el azufre (S) que se encuentra en forma de sulfuro de hierro (SFe), sulfuro de manganeso (SMn); o de sulfuro de doble manganeso y hierro (S₂MnFe), van paralelamente a la desoxidación, transformándose y produciéndose la desulfuración, la primera reacción que se produce es:



El SMn formado, son inclusiones que por decantación suben fácilmente a la escoria. Por otra parte éste S Mn, reacciona con la cal de la escoria en condiciones favorables, dando lugar al SCa.



La reacción fundamental de desulfuración, suele expresarse mediante la reacción siguiente:

$\text{SFe} + \text{CaO} \rightleftharpoons \text{SCa} + \text{FeO}$ es evidente la acción del manganeso para mejorar la desulfuración.

Es evidente que la presencia de carburo de calcio en la escoria, da lugar a C₂Ca libre, favorece, y asimismo la aportación de siliciuro de calcio de donde puede suponerse otra serie de reacciones de los sulfuros.

También puede desulfurarse aportando escorias sintéticas, de carácter altamente desoxidantes, y desulfurante, bien en el horno, bien en la olla (horno de afino) con agitación o activación de las reacciones en ambos casos.

Existen varios tipos de escorias sintéticas, cuyas composiciones difieren según la forma de aplicar al horno o a la olla, de más o menos poder exotérmico, con posibilidad de dejar o no al residual en el acero, así como Si y C.

La cantidad de estos tipos de escoria total a aplicar, suele oscilar según necesidades entre los 7 y 15 kg./ton. y las desulfuraciones que se logran son del orden de 30 a 60 % del contenido, con lo que permiten reducir el tiempo de afino reductor y desulfurante.

La importancia de la desulfuración que se produce durante el vaciado del horno a la olla con la fuerte agitación y gran contacto acero-escoria después de un proceso de desoxidación bien elevado, confirma el hecho de que si se continúa a la agitación una vez llena la olla, mediante nitrógeno, supone extremar, tanto a la desoxidación como la desulfuración, si se mantiene la escoria caliente.

Para que la desoxidación como la desulfuración discorra según los fundamentos descritos, es preciso indicar las condiciones óptimas que se precisan:

- 1) Índice de basicidad superior a 3 con máximo contenido de CaO, y mínimos óxidos. La cantidad debe superar el 1 (deseable 1.5%) del acero en especial, cuando el baño está alto de azufre.
- 2) Contenido de Mn, tan elevado como permita su composición. El calzado completo del acero y escoria bien desoxidada, es necesario para mayor desulfuración.
- 3) Fluidez de la escoria.
- 4) Temperatura elevada, pero sin llegar a puntos extremos, que facilitarían la disolución de gases, entre otros el oxígeno.

En cuanto al índice de basicidad desde el momento que se trata de una escoria formada a continuación de un desescoriado, que debe ser prácticamente completo y la nueva escoria formada, está exenta de SiO_2 , y anhídrido fosfórico, desoxidantes, como el carbón en polvo, grafito y carburo, que si es de tener en cuenta, la cantidad de escoria formada, que normalmente debe oscilar entre 1 y 1.5% del acero. El motivo está fundado en la saturación de la escoria con el sulfuro de calcio, formado con el azufre del baño, esta saturación se produce con un contenido de orden de 4% de S_{Ca} en la escoria, es decir un poco menos de 2% de azufre puede retener la escoria. De aquí la necesidad de aumentar la cantidad de cal, cuando el baño esté alto de azufre.

Tanto la cal como el carbón utilizado, deben tener mínimo azufre en composición. En cuanto al contenido de manganeso, tanto para la

desoxidación, como para la desulfuración debido a los óxidos y sulfuros que forma.

Resulta que la desoxidación no es instantánea y paralelamente al continuar el pequeño movimiento del baño, continúa la desulfuración, resultando claramente necesario el manganeso para la mejor desulfuración.

En cuanto a la elevada temperatura, es esencial que para desulfurar, de la misma forma que para la desfosforación se requiere bajas temperaturas.

Desulfuración a través de la fase gaseosa en el horno de arco

Durante el afino oxidante (fase de desfosforación) existe además de la desulfuración por las reacciones citadas, otra desulfuración más importante a través de la fase gaseosa.

Cuando se agrega en el horno de arco, cal en polvo, arrastrado por oxígeno gaseoso, se observa al mismo tiempo que una extraordinaria desfosforación, otra importante disminución del contenido de azufre (que suele representar del 20 al 50% del contenido inicial de azufre).

Esta desulfuración por fase gaseosa, puede ser en condiciones óptimas de 2 a 5 veces superior a la desulfuración producida en el horno de afino, según las anteriores reacciones, en fase oxidante.

3.3.3 Procesos importantes para la operación del horno olla (horno de afino)

Para la fabricación de aceros bajo contenido de carbón se debe llevar una secuencia lógica en el horno de afino inmediatamente después de vaciado el acero.

Durante el vaciado del acero del horno a la olla se debe adicionar, cal, escorias sintéticas, y ferroaleaciones como FeSi, y FeSiMn. Cuando el acero vaciado llega más o menos a una quinta parte de la altura total de la olla se debe asegurar que exista burbujeo de nitrógeno por medio del tapón poroso de la olla, abriendo y cerrando la llave de paso de nitrógeno. La adición de ferroaleaciones en el vaciado depende del tipo de acero a fabricar y el carbón con que se vacíe.

El cálculo de ferroaleaciones a agregar al acero durante el vaciado del acero y el proceso de afinación se hace por medio de la siguiente fórmula:

$$W_f = \frac{W_a \times \%E}{\text{Ley de ferroaleaciones}}$$

Ley de ferroaleaciones

W_f = Peso a agregar al baño de ferroaleaciones en Kgrs.

W_a = Peso del acero líquido en Kgrs.

$\%E$ = Puntos necesitados de elementos a ajustar.

Ley de ferroaleaciones = Estas concentraciones vienen definidas por el fabricante.

Ley de FeSiMn = 60-65% Concentración de Mn

Ley FeMn = 72-75% Concentración de Mn

Ley FeSi= 45-75% Concentración de Si

Después de vaciado el acero a la olla, es llevada por un carro transportador al horno de afino, y a su llegada se debe asegurar un buen burbujeo de nitrógeno, checando su presión y observando el baño, se toma una muestra del metal líquido, una muestra de la escoria y se toma la temperatura del baño.

Si la temperatura es baja (1550°C más o menos) usar un tap alto por 15 min. aproximadamente, para mantenerse en una temperatura de 1595°C - 1600°C .

Es muy importante controlar la oxidación del acero pues la calidad depende de esto, se controla observando el contenido de C, Si, Al, a través de muestras sacadas del baño y enviadas al laboratorio, y el color de la escoria, que debe ser café claro o blanco.

Cuando se tiene el carbón demasiado bajo se debe agregar en el horno de afino escorias sintéticas, desoxidantes, y agregar Mn si el análisis lo permite, después se debe ajustar el carbón con grafito en polvo, teniendo una buena agitación con nitrógeno para homogenizar el baño.

3.3.4 Homogenización de la temperatura y análisis químico del acero

Se debe mantener una presión adecuada de nitrógeno para poder homogenizar la temperatura del baño y su composición química, antes de llevar la olla del horno de afino a la máquina de colada continua debe

tomarse una última temperatura del baño de acero líquido. Ésta debe ser 100°C arriba de la temperatura de solidificación, correspondiente al tipo de acero del proceso.

El análisis químico debe hacerse siempre sobre un acero ya bien desoxidado, preferentemente a través de una escoria perfectamente desoxidada, con posteriores adiciones de Mn, etc., en forma de ferroaleaciones carburadas, siempre que el contenido en carbono lo permita hasta prepararlo con una composición química de cada elemento en proporción igual o ligeramente inferior al deseado.

Con excepción del Si, tiene que ser ajustado durante el tiempo del proceso de refinación, de manera compensatoria a la oxidación de este elemento; tomando en consideración la necesidad de desoxidar la escoria, ya que una escoria bien desoxidada da como resultado un acero bien desoxidado.

4. PROCESO DE SOLIDIFICACIÓN DEL ACERO

4.1 Máquina de colada continua

La máquina de colada continua, es una mecanización, del sistema tradicional de colada. Y consta básicamente de las siguientes partes:

- Torreta giratoria.
- Distribuidor.
- Lingoteras.
- Mecanismo de oscilación.
- Vía de rodillos con refrigeración directa a los lingotes.
- Sistema de arrastre a velocidad controlada.
- Enderezado.
- Sistema de corte por cizallas hidráulicas mecánicas.
- Camino de rodillos de evacuación de lingotes.

-Torreta giratoria

Es un mecanismo con dos brazos giratorios independientes, provistos con bases para sentar la olla procedente del horno de afino.

-Distribuidor

Recibe el acero de la olla y alimenta de acero en forma continua a través de boquillas a las lingoteras o moldes de cobre refrigerados con caudal de agua y presión.

-Lingoteras

En las lingoteras el acero se solidifica a través de los moldes de cobre refrigerados con agua por las cuatro caras, formando una capa que ha de tener la suficiente resistencia para soportar los efectos de presión ferrostática del cráter líquido (del interior del lingote en período de formación) a la salida del molde o lingotera. A esta refrigeración se le conoce como primaria.

-Mecanismo de oscilación

Este mecanismo le proporciona un movimiento de ascenso y descenso a la lingotera para que la barra pueda deslizarse sobre el molde y no se pegue a las paredes del molde. Este mecanismo se puede operar manual o automáticamente.

-Vía de rodillos con refrigeración directa

El lingote a la salida de la lingotera, aún contiene cráter líquido en su interior, por lo que se le aplica agua a base de aspersores a una distancia

y presión controladas en donde se termina de solidificar el lingote. Este sistema de enfriamiento se conoce como secundario.

-Sistema de arrastre a velocidad controlada

Son rodillos que ejercen presión sobre el lingote ya solidificado para su extracción de la vía de rodillos.

-Enderezado

Es un mecanismo que endereza la forma curva que trae el lingote al salir de los rodillos de enfriamiento del secundario.

-Sistema de corte por cizallas hidráulicas mecánicas

Una vez fijado el corte a medida la cizalla cortará por presión hidráulica ejercida sobre las cuchillas.

4.2Vaciado

La olla es llevada desde el horno de afinado (LF) hasta la torreta por medio de una grúa aérea. Cuando la olla se encuentra en posición exacta para colar el acero el operador acciona la válvula flocon (corredora lineal) cuya finalidad es poder regular el caudal de acero hacia el distribuidor.

El distribuidor reparte el acero sobre las líneas, forma una pequeña reserva de acero para compensar irregularidades de abastecimiento, puede adaptar el flujo de acero a la velocidad de colado y mantiene una

constante presión en el molde. Está fabricado de una chapa de acero recubierta interiormente de refractorio, los distribuidores para proceder al colado deben calentarse para sacar humedad y evitar en lo posible el enfriamiento del acero procedente de la olla, el cual es protegido a su vez con una placa fría aislante.

El distribuidor tiene además la función de eliminar las escorias o inclusiones que tiene el acero y las que se forman en él, como consecuencia de la liberación de oxígeno y sus reacciones con el silicio de composición del acero en el enfriamiento entre olla y distribuidor.

Para evitar la pérdida de temperatura el trayecto que debe recorrer el acero debe ser lo más corto posible. El fondo y las paredes deben ser lisas para evitar que se dificulte el flujo de acero, debe haber buena visibilidad para poder dosificar polvos de colado sobre el acero.

Para el comienzo a la operación de la colada, como es lógico, la base de la lingotera está cerrada con una pieza denominada "falsa barra", la cual lleva además colocada una pieza en forma de "T" llamada "anzuelo", cuya función es lograr casi al instante, una zona de fusión entre el acero y la falsa barra.

Para facilitar la solidificación del primer acero vertido normalmente, se coloca sobre la cabeza de la falsa barra virutas de acero (varillas de laminación) y material refractorio, para evitar filtración de acero a la falsa barra.

La falsa barra, además de taponear la lingotera y unir en forma sólida con el comienzo del lingote en formación, tiene la función de hacer posible la extracción del lingote, por lo que tiene una longitud ligeramente superior a la distancia entre los rodillos de extracción o enderezadora y la lingotera.

4.3 Enfriamiento

Las lingoteras de colada continua tienen en su interior el molde que es de cobre electrolítico en forma de tubo cuadrado de 100X100mm ó 130X130mm.

El conocimiento de los diferentes parámetros que influyen en la solidificación, es condición clave para la buena utilización de la máquina de colado continuo, como por ejemplo; la influencia de la:

- velocidad de colado.
- sección a colar.
- temperatura de colado.
- cantidad y forma de refrigeración.

La primera solidificación del lingote, es una pequeña capa o corteza que se produce en la zona próxima al nivel del acero líquido como consecuencia de la refrigeración por contacto directo entre la lingotera refrigerada por agua y el acero líquido.

En la medida que el lingote en período de formación desciende dentro de la lingotera aumenta el espesor de la capa solidificada, pasando

del enfriamiento directo que se produce en la zona alta de la lingotera al enfriamiento por aspersion y convección.

Debe tenerse en cuenta que las líneas a la salida de la lingotera, son muy fáciles de romper, debido al tiro que ofrece el peso del lingote que baja por la cámara y los reductores de extracción o enderezadoras.

En el preciso instante en que el lingote sale de la lingotera se recalienta exteriormente, debido a la transmisión de calor del interior al exterior, siendo éste el punto crítico donde debe dar comienzo la aplicación de la refrigeración directa o llamada refrigeración secundaria.

Este peligro de rotura de las líneas a la salida de la lingotera, es más agravado cuando el contenido de S en el acero es alto, dado la menor resistencia que proporciona al acero a altas temperaturas. Los altos contenidos de Mn pueden contrarrestar un poco la acción negativa que produce los altos contenidos de azufre.

La camisa de agua para refrigeración de las lingoteras para lingotes medianos debe ser de 5 a 6 mm. de sección, para que con caudales y presión de agua necesaria, la velocidad de paso de las láminas de agua sea la más adecuada.

El rendimiento de la refrigeración en la lingotera, aumenta con la temperatura del acero, con la velocidad de colada en kg. de acero por minuto, con la mayor sección de la lingotera y mayor conicidad de la lingotera, para una misma cantidad de agua, es decir que, hay más

calorías extraídas del acero, por metros cúbicos de agua. El gradiente térmico del agua de entrada y salida, no debe sobrepasar los 8°C.

Cuando la temperatura del acero en el distribuidor llega a ser de 1570°C procede preferentemente bajar la velocidad de colada. Si la velocidad de colada no fuere posible reducir bajando el nivel de acero en el distribuidor procede aumentar el caudal del agua. Lo recomendado es trabajar con temperaturas de acero en el distribuidor de 1530^o/1550^o C.

La lubricación en la lingotera es de gran importancia en la colada continua, esto es necesario ya que el aceite que se quema próximo a la superficie elimina la atmósfera oxidante en esa zona, lubrica la zona de contacto, limitando la fricción en ambos lados. Los aceites empleados suelen ser de tipo vegetal.

La refrigeración secundaria correcta debe ser la que permita en todo el trayecto por las cámaras una temperatura superficial del lingote totalmente uniforme por toda la periferia, procurando sea la menor diferencia de temperaturas la del interior del lingote y del exterior; es decir, mínimo gradiente térmico y poniendo especial cuidado en que la temperatura superficial de la parte más próxima a la lingotera que será del orden de 1250^o C, descienda sin ninguna brusquedad en determinadas zonas hasta los 900^oC aproximadamente.

Es importante disponer adecuadamente posicionados y en cantidad suficiente y tamaño, los rociadores para aplicar la necesaria cantidad de agua, evitando siempre la profundidad de penetración de la refrigeración

por exceso de caudal o presión, para lograr la forma de enfriamiento indicada.

4.4 Evacuación

Los lingotes una vez cortados, son llevados por vía de rodillos al final, transferidos y luego llevados a un patio por un montacargas para seguir en su proceso de enfriamiento.

La temperatura del lingote al entrar en dicha zona es superior a los 700°C y aún está dentro de las temperaturas críticas de transformación, por lo que requiere un enfriamiento lento, además de evitar posibles torsiones fáciles a esa temperatura.

5. CONTROL DE LA CALIDAD DE LOS ACEROS AL CARBONO

5.1 Control de proceso

En el proceso de fabricación de acero es importante llevar un registro detallado de todos los eventos involucrados en esta operación. Entre los datos que se deben registrar se encuentran: El producto que se fabrica, fecha de fabricación, la práctica de operación, etc. Toda esta información es recopilada, para mejorar las condiciones de operación.

Este registro indica problemas típicos tales como disminución de la producción, aumento en el consumo de materiales, deficiencias en el análisis químico del acero líquido, sirve como una guía útil para múltiples propósitos.

5.1.1 Informe de HEA

A continuación se detallan todos los eventos en el proceso de fusión:

- Indicar el total de toneladas de chatarra cargadas: su origen y cantidad de fundentes.
- Tiempo intercolada: la totalidad del tiempo que se utilizó entre vaciar una colada y el inicio de otra.
- Tiempo de fusión: es el tiempo que se lleva fundir todas las cestas menos el tiempo que se utilizó para hacer los recargues y las demoras.
- Tiempo de afino: (Preafinación): incluye demoras.

- Tiempo neto de afino (Preafinación): tiempo total del afino menos las demoras.
- Demoras de Producción: es el tiempo total que se suspende la producción por un error operativo.
- Demoras de mantenimiento (Mecánico o Eléctrico): es el tiempo total que se suspende la producción por una falla mecánica o eléctrica.
- Otras demoras: Es el tiempo que se suspende la producción en las cuales no interviene mantenimiento ni producción (Falta de energía eléctrica, etc.).
- Tiempo total de demoras: sumatoria de demoras (Producción, Mantenimiento y otras).
- Tap to Tap: tiempo de vaciado de una colada e inicio de la siguiente colada.
- Tiempo neto de Tap to Tap: tiempo de vaciado de una colada e inicio de la siguiente colada menos la sumatoria de demoras.
- Toneladas de acero líquido: es igual al peso de los lingotes, despuntes, remanente en el distribuidor y acero derramado.
- Rendimiento metálico: diferencia entre el peso de la chatarra cargada y el acero líquido.

Kwh de fusión: Kwh consumidos hasta el final de la fusión.

Kwh de afino (Preafinación): Kwh consumidos desde el final de la fusión hasta el momento de vaciar.

Kwh: total: Es la suma de los Kwh de fusión y de afino (preafinación).

Al final del reporte se anota la temperatura de vaciado, el total de muestras enviadas a laboratorio, m³ de oxígeno consumidos, la cantidad de material usado para tapar el tap hole (agujero de vaciado).

Al terminar de llenar este reporte por colada se obtiene importante información en la cual se puede evaluar la producción y corregir problemas.

5.1.2 Informe del LF

El informe del LF contiene la siguiente información:

- Calidad de acero a fabricar.
- Hora de llegada de la olla al LF, temperatura del baño y el análisis químico de la primera muestra.
- El peso de los materiales agregados al fondo de la olla.
- El peso de los materiales agregados durante el vaciado del acero a la olla.
- Los fundentes y ferroaleaciones agregados a la olla durante el afino.
- Número de termocoplas y muestreadores utilizados.
- Consumo de energía durante el afino en Kwh.
- Hora de salida del LF, temperatura del baño y el análisis químico de la última muestra.

5.1.3 Informe de la MCC

El informe de la MCC debe contener la siguiente información:

- Calidad de acero a fabricar longitud y sección del lingote.
- La hora de llegada de la olla a la MCC, temperatura del acero en el distribuidor a cada 20 minutos y el análisis químico del acero líquido.

- Presión y temperatura del agua del enfriamiento primario a la entrada y salida del molde, por cada línea de colado.
- Velocidad de colado de cada línea durante la colada.
- Problemas eléctricos o mecánicos del equipo durante la colada.
- Presión y caudal del agua del enfriamiento secundario, por cada línea de colado.
- Total de producción: chatarra producida por alguna falla, despuntes, acero remanente en la olla, acero remanente en el distribuidor, acero en desviadores, producción bruta y rendimiento metálico.

5.2 El espectrómetro electrónico

El espectrómetro es una caja metálica que contiene el sistema óptico, la caja es controlada por un termostato (38⁰C) para evitar la deformación por dilatación. El ajuste de la temperatura se alcanza por medio de una resistencia cuyo interruptor es controlado por un termistor. El sistema óptico contiene cinco elementos. El orificio primario, la rejilla, los orificios secundario, los espejos y los fotomultiplicadores.

Determina la composición química del acero, en el cual se le suministra energía eléctrica a la muestra de acero excitando los átomos y los electrones cambian de una órbita a otra, cuando ha cesado la excitación el electrodo regresa a su órbita liberando energía la cual es captada por un sistema de espejos que están conectados a una terminal computarizada en donde puede leerse las concentraciones de los elementos.

Al obtener la composición química del acero ésta nos determinará el grado del acero, en base a las concentraciones de los elementos que contenga la muestra.

6.3 Principales defectos de los lingotes

Los defectos que con mayor frecuencia se observan en los lingotes de acero de fabricación normal en calidades comunes son por:

- romboicidad.
- grietas Internas.
- depresiones en las caras.
- grietas transversales de superficie.
- grietas longitudinales de superficie.
- rechupe y porosidad interior.

Romboicidad

El defecto de romboicidad, o forma de rombo de la sección transversal del lingote, se calcula de la siguiente forma.

$$\frac{D2 - D1}{2} \times 100 = \% \text{ De romboicidad}$$

Siendo D2 la diagonal mayor y D1 la diagonal menor en mm. del lingote, debiendo resultar la romboicidad inferior al 5%. La romboicidad en

los lingotes, se origina principalmente por exceso de agua en la lingotera, por irregularidades de corriente de agua entre lingotera y portalingotera y por chorro de acero descentrado en la lingotera.

Además de ello, también puede pronunciarse más la romboicidad por exceso de agua mal aplicada en la refrigeración secundaria, principalmente en la zona superior.

Grietas internas

Las grietas internas, son en general debidas a tensiones mecánicas (por acción de rodillos, etc.) y por causas térmicas (brusquedad en el enfriamiento, etc.).

La sensibilidad a la formación de estas grietas aumenta con los altos contenidos de azufre principalmente, aunque algo también influyen los altos contenidos de fósforo, cobre y estaño así como el tamaño del grano del acero.

Facilita el logro de lingotes sin grietas internas, la mayor velocidad de colado con el riguroso control de refrigeración secundaria, produciendo mínimo gradiente entre superficie e interior de los lingotes con la mayor uniformidad posible.

Depresiones

El defecto de depresión de los lingotes aparece en general, cuando hay grietas internas en diagonal, muy pronunciadas, la causa es la misma

que origina las citadas grietas, sólo que la depresión se produce cuando se extrema la cantidad de agua o la presión de ella en la parte superior del enfriamiento secundario, creando zonas oscuras cuando aún existe cráter líquido.

Grietas transversales

Se presentan principalmente a consecuencia de: Mala alineación entre lingotera y tablero de rodillos de cámaras, mala alineación entre rodillos de cámaras y de enderezadoras, tirones entre rodillos de extracción y bancos oscilantes con alteraciones constantes de radio de curvatura del lingote dentro de la cámara.

Altos contenidos de azufre y/u óxidos de hierro disueltos en el acero, que proporciona al acero falta de cohesión.

Grietas longitudinales de superficie

Generalmente éste defecto aparece cuando hay grietas internas en diagonal y depresiones superficiales. Un enfriamiento lento y uniforme de los lingotes desde su comienzo hasta la temperatura ambiente, es importante para evitar todo tipo de grietas y defectos internos.

Rechupes y porosidad interna

Su origen procede de una estrangulación del sumidero de acero líquido del interior. Tanto más velocidad de colada más puntiagudo será el ángulo de solidificación y más facilidad de aparición de este defecto.

Disminuyendo la velocidad de colado con reducción proporcional a las aguas de refrigeración en la zona alta del secundario y manteniendo la misma refrigeración del secundario en la zona baja, se logrará el ángulo de solidificación más abierto, alimentará mejor y el rechupe disminuye. Dicho de otra forma "menor velocidad de colado, menos agua arriba y más agua abajo".

5.4 Los ensayos de tracción

El lingote constituye la materia prima para el proceso de laminación, en donde nuevamente es calentado en un horno "solera" hasta una temperatura de 1200° C, para ser procesado en un tren laminador, este proceso se efectúa por la acción de dos cilindros laminadores que giran en la misma dirección pero en sentido contrario, bajo la acción de fuerzas de compresión ocasionando así un alargamiento en sentido longitudinal y un ensanchamiento en sentido transversal.

El comportamiento de los aceros frente a sollicitaciones mecánicas es complejo y depende del tipo de sollicitación, teniendo en cuenta que los aceros se usan sobre todo, como elementos estructurales, se justifica que se le preste especial atención al comportamiento mecánico de los mismos.

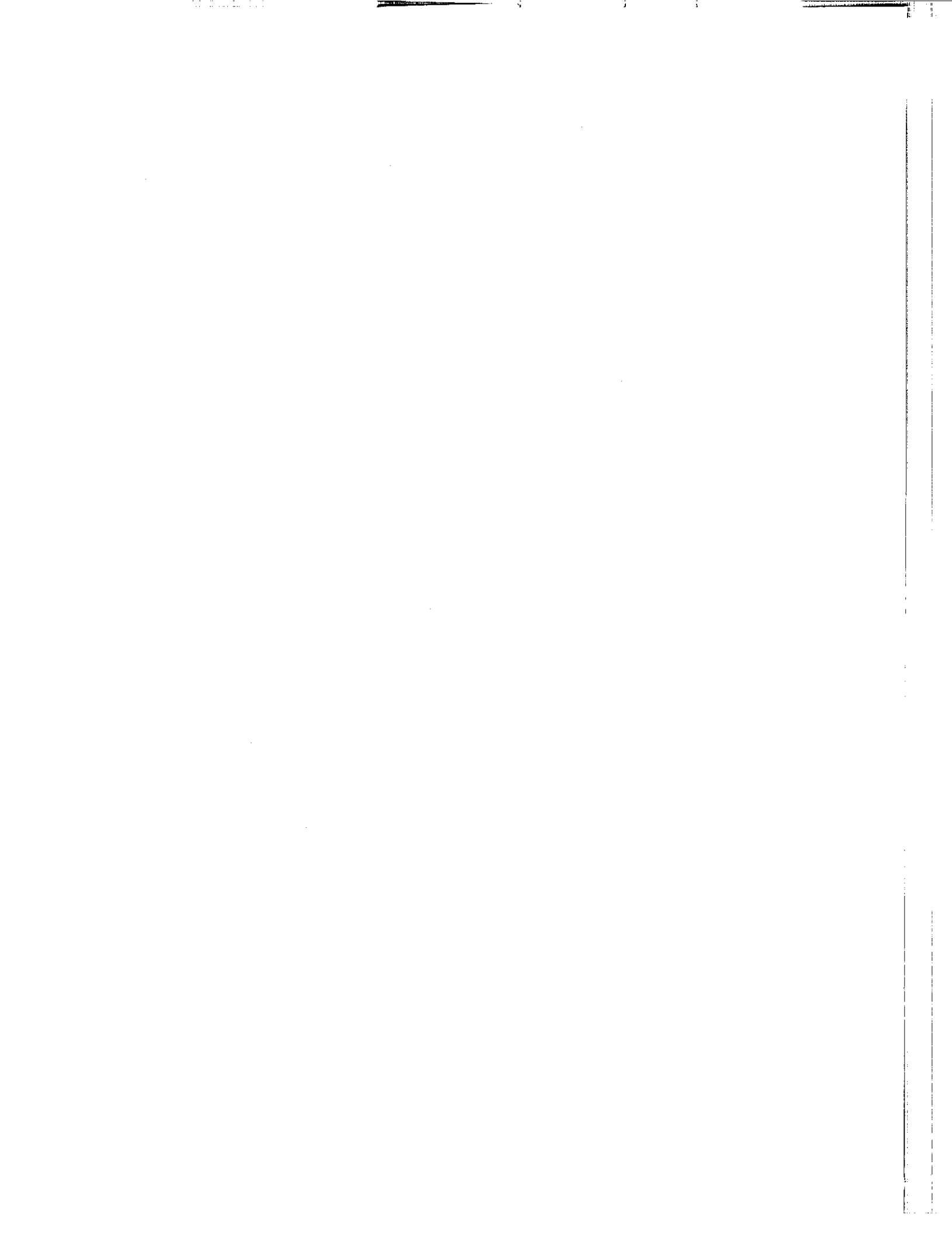
Para determinar el grado del acero después de haber pasado por el proceso de laminación se selecciona una muestra al azar (probeta) y se le efectúa el ensayo de tracción, que consiste en estirar la probeta de forma y dimensiones generalmente normalizadas en condiciones de tensión uniaxial y medir los valores de la fuerza aplicada en los extremos de la probeta simultáneamente con el alargamiento de la misma.

Para que se cumplan las condiciones de uniaxialidad la probeta debe ser: Homogénea; es decir, no poseer defectos tales como porosidad interior o entalles, isotropa; es decir iguales propiedades mecánicas en todas direcciones.

Los resultados del ensayo se pueden expresar como un gráfico cuya ordenada es la fuerza (F) aplicada por unidad de área (A) en las mordazas y cuya abcisa es la deformación expresada como $L_0L = \Delta l$, siendo la longitud entre dos puntos de la probeta antes de aplicar la fuerza (F).

Del diagrama de tracción se obtiene valiosa información sobre el comportamiento mecánico.

Los datos más importantes son el límite elástico, tensión de fluencia y tensión de rotura, este valor de tensión es el más importante para el cálculo de estructuras.



6. EJEMPLOS PARA LA FABRICACIÓN DE ACERO AL CARBONO

6.1 Fabricación de acero G-40

Este acero puede ser usado en plantas laminadoras para la fabricación de barras corrugadas de 3/8 y 1/2 de pulg., con un análisis de carbón 0.15-0.17%, manganeso 0.60-0.65%, azufre 0.020-0.030%, fósforo 0.008-0.030%, silicio 0.15-0.20% y aluminio 0.005%, según norma nacional.

6.1.1 Preparación de la carga

La carga dentro del horno debe ser más o menos 63 Tn. de chatarra, de la siguiente constitución aproximadamente:

- 25.0 Tn. demolición automotriz o similar.
- 28.0 Tn. despuntes de laminación o similar.
- 09.1 Tn. pacas de chapa o similar.
- 00.9 Tn. hierro fundido.
- 63.0 Tn. total

La carga de los fundentes está constituida aproximadamente de la siguiente forma:

- 0.750 Tn. coke

0.500 Tn. cal dolomilica

2.200 Tn. cal calcilica

3.750 Tn. total

La carga total es acondicionada en cuatro cestas y está distribuida de la forma siguiente:

Primera cesta 20 Tn.

Segunda cesta 16 Tn.

Tercera cesta 15 Tn.

Cuarta cesta 12 Tn.

Los fundentes están de la siguiente forma, la cal dolomilica en la primera cesta (0.500 Tn.), el coque en la segunda cesta (0.75Tn.) y la cal calcilica en la segunda y tercera cesta (1.300-1.200Tn.) respectivamente.

6.1.2 Fusión de la carga

La fusión de la carga inicia a las 19:39 hrs. con un tiempo de intercolada de 10 min. para calibrar electrodos y tapar el agujero de vaciado (EBT).

Fusión de las cestas

	hr. de inicio	hr. de fin	tiempo min.	consumo Kwh
Primera cesta	19:59	20:18	19	5643
Recargue				
Segunda cesta	20:19	20:33	14	3991
Recargue				

Recargue				
Tercera Cesta	20:35	20:49	14	4454
Recargue				
Cuarta cesta	20:54	21:03	09	3004

Se aplica oxígeno desde la segunda cesta, aportando energía química al baño, lo cual significa un ahorro de energía con un caudal de 400 metros cúbicos por hora, se trabaja el acero con escoria espumosa, a los 1550^o C aproximadamente se escorifica y a los 1580^o C se toma la primera muestra.

El análisis de la primera muestra indica 0.12%C, 0.07% Mn, 0.08% Si 0.42% S y 0.010% P.

La energía consumida en la fusión de la carga completa fue de 17091 KWH.

6.1.3 Preafinación y vaciado

La preafinación inicia a las 21:03 hrs. no se insufla oxígeno durante este período porque el carbón está debajo del valor deseado, se agrega grafito en polvo con palas para formar escoria espumosa e incrementar la temperatura del baño.

Se agregan 130 kg. aproximadamente de FeMn con palas, en base al resultado obtenido del manganeso en el primer análisis (0.07%) para que al momento de vaciar el contenido de Mn, no sea tan bajo respecto al análisis deseado (0.60-0.65%). La adición de FeMn se hace en base a la

experiencia de resultados obtenidos (10kgs. de Fe Mn incrementan un punto de Mn en el HEA).

Se calienta el baño y a las 21:38 hrs. se está listo para vaciar el acero a la olla con una temperatura de 1620^o C.

La energía consumida en el proceso de preafinación fue de 11006 KWH.

6.1.4 Afinación (Refinación)

En el fondo de la olla se colocan 11 kg. de grafito en base al último análisis (0.12% C), 4 kg. de grafito incrementan un punto de carbón en la olla aproximadamente y 4 kg. de aluminio; el aluminio se agrega de 4 a 8 kg. dependiendo del nivel de oxidación en el acero, el cual se establece por los contenidos bajos de carbón, manganeso y silicio del primer análisis.

Luego durante el vaciado se le agregan 350 kg. de FeSiMn, 50 kg. de FeSi para el cálculo de aportación de ferroaleaciones ver apéndice "A".

También se le agregan 25 kg. de cal calcítica y 30 kg. de desulfurantes para bajar el nivel de azufre ya que la suma de fósforo más azufre debe ser menor o igual a 0.060%, el aporte de cal y desulfurantes sólo depende del valor de esta suma, aunque, la aportación de cal siempre es buena, para conseguir una mejor escoria que ayudará a proteger la línea de escoria de la olla.

La temperatura de llegada del acero al LF es 1599 ° C y su análisis es 0.13% C, 0.55%Mn, 0.15% Si, 0.44% S, 0.015% P, 0.002% Al.

Se agregan en el LF los siguientes materiales para llegar al análisis deseado, grafito 15 kg., FeMn 30 kg., FeSiMn 40 kg., para el cálculo de ferroaleaciones ver apéndice "A", 50 kg. de desulfurantes y 150 kg. de cal calcítica.

Se toma otra muestra del baño y da el siguiente análisis 0.15% C, 0.60% Mn, 0.17% Si, 0.040% S, 0.015% P, 0.002% Al; la temperatura del baño es de 1628° C, está listo para enviar la olla a la máquina de colada continua a las 22:00 hr.

La afinación tuvo un consumo de energía de 2782 KWH, haciendo un total de energía consumida hasta el horno de afino de 30879 KWH.

6.1.5 Colado

La colada llega a la torreta de la colada continua a las 22:00 hr., la olla abre sin dificultad e inicia la colada a las 22:05 hr. con cuatro líneas de colado con una temperatura de 1560° C y se termina de colar a las 23:35 hr.

Salen 196 lingotes netos de 100x100 mm. y 3.40 m. De longitud haciendo un total de 49.196 Tn. son llevados al patio de lingotes por un montacarga para terminar de enfriarse.

6.2 Fabricación de acero G-60

Este acero puede ser usado en plantas laminadoras, para la fabricación de barras corrugadas de 3/8, 1/2 y 5/8 de pulg. Con un análisis de carbón 0.30-0.32%, manganeso 1.10-1.15%, azufre 0.020-0.30%, fósforo 0.008-0.030%, silicio 0.19-0.20% y aluminio 0.005%, según norma nacional.

6.2.1 Preparación de la carga

La carga dentro del horno debe ser más o menos 55 Tn. de chatarra de la siguiente constitución aproximadamente:

- 25.0 Tn. demolición automotriz o similar
- 20.0 Tn. despuntes de laminación o similar
- 08.0 Tn. lámina negra o pacas de chapa
- 02.0 Tn. hierro fundido
- 55.0 Tn. total

La carga total de fundentes está constituida aproximadamente de la siguiente forma:

- 0.750 Tn. coke
- 1.100 Tn. cal dolomítica
- 1.350 Tn. cal calcítica
- 3.200 Tn. total

La carga es acondicionada en tres cestas y está distribuida de la forma siguiente:

Primera cesta	23 Tn.
Segunda cesta	20 Tn.
Tercera cesta	12 Tn.

Los fundentes están de la siguiente forma: la cal dolomítica en la primera cesta (1.100 Tn), el coque en la segunda cesta (0.750 Tn.) y la cal calcítica en la tercera cesta (1.350 Tn.) respectivamente.

6.2.2 Fusión de la carga

La fusión de la carga se inicia a las 00:03 hrs. con un tiempo de intercolada de 10 min. para calibrar electrodos y tapar el agujero de vaciado (EBT).

Fusión de las cestas				
	hr. inicio	hr. fin	tiempo min.	consumo Kwh
Primera cesta	00:13	00:38	25	8503
Recargue				
Segunda cesta	00:41	01:00	19	6177
Recargue				
Tercera cesta	01:02	01:10	08	1220

Se aplica oxígeno desde la segunda cesta con un caudal de 700 metros cúbicos por hora, se trabaja el acero con escoria espumosa a los

1560⁰ C aproximadamente se escorifica y a los 1585⁰ C se toma la primera muestra.

El análisis de la primera muestra indica 0.459% C, 0.096% Mn, 0.02% Si, 0.049% S y 0.022P.

La energía consumida en la fusión de la carga completa de 17736 KWH.

6.2.3 Preafinación y vaciado

La preafinación inicia a las 01:10 hrs. se insufla oxígeno durante 10 min. con un caudal de 400 metros cúbicos ya que el carbón está arriba del valor deseado (según experiencia obtenida en el proceso 2 min. de oxígeno bajan un punto de carbón) y se desconecta la energía de los electrodos para evitar que aumente demasiado la temperatura. Se agrega grafito en polvo con palas para formar escoria espumosa.

Se agregan 130 kg. aproximadamente de FeMn, con palas, en base al resultado obtenido del manganeso en el primer análisis (0.096%) para que al momento de vaciar el contenido de Mn no sea tan bajo respecto al valor deseado (1.10-1.15%). La adición de FeMn se hace en base a la experiencia de los resultados obtenidos (10 kg. de FeMn incrementan un punto de Mn en el HEA).

Se calienta el baño y a las 01:45 hr. se está listo para vaciar el acero a la olla con una temperatura de 1610⁰ C.

La energía consumida en el proceso de preafinación fue de 9978 KWH.

6.2.4 Afinación (Refinación)

En el fondo de la olla se colocan 4 kg. de aluminio por el contenido bajo de manganeso y silicio del primer análisis.

Luego durante el vaciado se le agrega 300 kg. de FeSiMn, 350 kg de FeMn, 35 kg. de FeSi, para el cálculo de aportación de ferroaleaciones ver apéndice "B".

También se le agregan 100 kg. de cal calcítica y 55 kg. de desulfurantes para bajar el azufre ya que el análisis indica que la suma de fósforo y azufre está arriba del valor máximo. (0.060%).

La temperatura de llegada del acero al LF es 1585⁰C y su análisis es 0.29%C, 1.053 Mn, 0.049% S, 0.027 P, 0.16 Si y 0.002 Al.

Se agregan en el LF los siguientes materiales para llegar al análisis deseado, 8 kg. de grafito, 200 kg. de FeSiMn, para el cálculo de ferroaleaciones ver apéndice "B".

También se agregan 110 kg. de desulfurantes y 200 kg. de cal calcítica, debido a que el análisis indica que aún está alta la suma de fósforo más Azufre.

Se saca otra muestra y da el siguiente análisis: 0.308% C, 1.124 % Mn, 0.043% S, 0.027% P, 0.188 Si y 0.002% Al, la temperatura del baño es de 1628⁰ C, está listo para enviar la olla a la máquina de colada continua, a las 02:18 hr.

La afinación tuvo un consumo de energía de 2791 KWH, haciendo un total de energía consumida hasta el horno de afino de 30879 KWH.

6.2.5 Colado

La olla llega a la torreta de la colada continua a las 02:20 hr. la olla abre sin dificultad e inicia la colada a las 02:25 hr. con cuatro líneas de colado, con una temperatura de 1563⁰ C y termina de colar a las 03:50 hr.

Salen 192 lingotes netos de 100x100 mm. y 3.40 m. De longitud haciendo un total de 48.192 Tn. son llevados al patio de lingotes por un montacarga para terminar de enfriarse.

CONCLUSIONES

1. Es importante que el personal operativo y técnico conozca el proceso y equipo para garantizar una operación satisfactoria y confiable.
2. Se debe conocer el orden lógico del proceso y funcionamiento del equipo, para detectar problemas que provocan paros en el proceso de fabricación de acero.
3. Es esencial que los operadores del horno eléctrico conozcan muy bien todos los aspectos de fabricación y conceptos eléctricos básicos, como: voltaje, amperaje y potencia, ya que uno de sus objetivos es conseguir una fusión rápida con el mínimo consumo de energía.
4. Una adecuada clasificación de chatarra y un correcto llenado de las cestas son funciones del tipo de acero que se desea fabricar, con buena calidad, el mejor rendimiento y a un bajo costo.
5. Con el uso de la técnica de la escoria espumosa se logra un mejor aprovechamiento de la potencia del transformador; hay mayor protección de las paredes del horno, se evita fuga de temperatura incrementándose ésta más rápido y disminuyendo el ruido.

6. Una buena preafinación del acero y vaciar a la temperatura correcta nos garantiza que en el proceso de afinación los rangos de los elementos por ajustar no varien demasiado y por consiguiente, no se consuman más ferroaleaciones, fundentes y energía de lo calculado.
7. Se deben conocer los diferentes parámetros que influyen en la solidificación del lingote, tales como: velocidad de colado, la sección a colar, temperatura de colado y refrigeración ya que de ellos depende la calidad del producto final y roturas de las líneas de colado.
8. El control del proceso es importante en la fabricación de acero, recopila información para mejorar las condiciones de trabajo, registra el aumento o disminución de producción, etc., y sirve como guía para diferentes propósitos.

RECOMENDACIONES

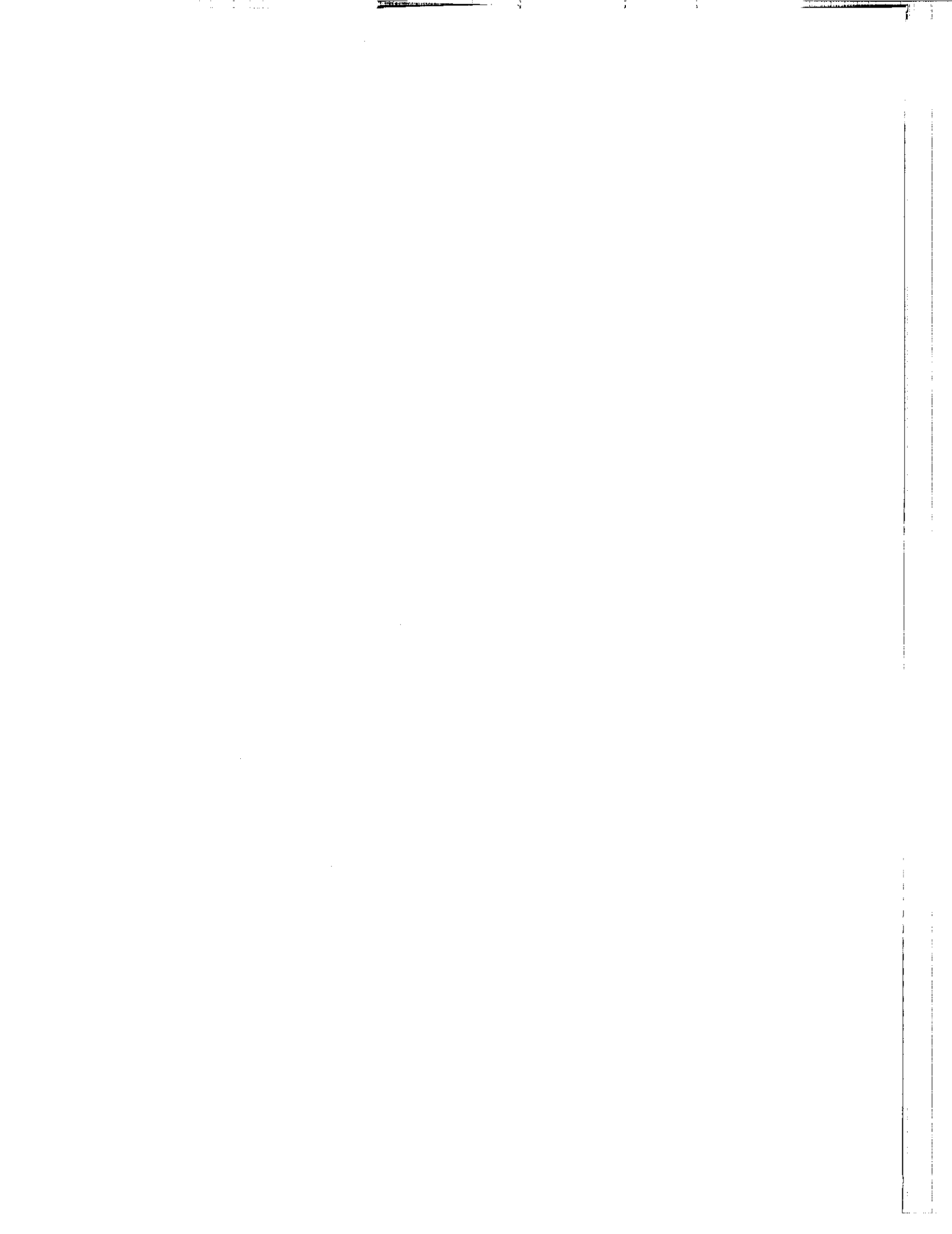
1. La chatarra debe encontrarse lo mejor distribuida en el patio de chatarra para poder localizar con facilidad materiales que afecten la calidad de acero a fabricar y también evitar maniobras innecesarias de las máquinas de patio.
2. Se debe compactar la chatarra voluminosa y de baja densidad, considerando que, este tipo de chatarra trae problemas después de efectuar un recargue, tales como: pérdida de tiempo por aplastamiento de la misma; además, se incrementan los movimientos de las grúas y suceden frecuentes fallas.
3. La utilización de los más altos niveles de potencia, disponibles en la fusión y durante el resto de la operación, la más alta que nos permita el normal seguimiento del proceso de afino.
4. Que el tiempo total sin corriente eléctrica entre colada y colada (reparación, ajuste de electrodos, recargues, desconexiones por cambio de tensión, etc.) sean mínimos, para lograr una productividad adecuada, que incide en los consumos y costos; tanto de energía eléctrica, refractorios, electrodos y mano de obra.
5. Sincronizar todas las operaciones de seguimiento, evitando todo tipo de espera y operaciones que puedan ocasionar cualquier retraso y así poder hacer posible un fácil seguimiento del ritmo.

REFERENCIAS

1. Prosid de México. Rinconada del Bosque N. 17. Comunicación Personal
2. UCAR, electrodos de graffito. (México) pp. 20-60
3. Análisis del Proceso de Fabricación acero mediante el uso de escoria espumosa. Citado por Perales Aguilera, Lauro. **III Encuentro Tecnológico de la Industria Siderúrgica.** (México; Editorial del Instituto Tecnológico e Tlalneplanta, 1985) pp 8-9
4. Ibid. pp. 44-45
5. Hierro, Florencio y otros. **Tecnología Elemental de los Aceros** (España: s.e., s.a.) pp. 8-9
6. Aguilar Rivas, Roberto, **Metalurgia Básica para ensayos no destructivos.** Proyecto regional de ensayos no destructivos para América Latina y el Caribe. (Guatemala: s.e., 1986) pp. 1-5

BIBLIOGRAFÍA

1. AMSTEAD, B.H. y otros. **Procesos de Manufactura**. 6ª. Reimpresión, México: Editorial Continental, 1989
2. AVNER, Synder, **Introducción a la Metalurgia Física**. 2ª. Edición, México: Editorial McGraw-Hill, 1991
3. BAUMEISTER, Theodore y otros. **Manual de Ingeniero Mecánico**. 2ª. Edición en español, volumen 2. México: Editorial McGraw-Hill, 1992
4. HILTY, D.C. y otros. **Electric Furnace Steel Making**. 2ª. Reimpresión, volumen 1 y 2. United States of America: Editorial Metalurgical Society of AIME, 1967
5. "INGENIERIA, Diseño y Construcción de Equipos Siderúrgicos" **Revista Bascotecnia Empresas Agrupadas**. (España), (5): 2-17, 1980
6. "REVISTAS Circulares de Información Técnica" Francia, s.e.



APENDICE A

La fórmula para el cálculo de ferroaleaciones a agregar al acero es

$$W_f = \frac{W_a \times \% E}{\text{Ley de las ferroaleaciones}}$$

El análisis deseado para el acero G-40 es: 0.15-0.17% C, 0.60-0.65% Mn, 0.020-0.030% S, 0.008-0.030% P, 0.15-0.020% Si y 0.005% Al

El cálculo para 350kg. De FeSiMn con una concentración de 60% de Mn y 16% de Si con más o menos 50 Tn. (50,000kg.) de acero en la olla.

$$\% E = \frac{350 \text{ kg.} \times 60}{50000 \text{ kg.}} = 0.42\% \text{ puntos de Mn}$$

$$\% E = \frac{350 \text{ kg.} \times 16}{50000 \text{ kg.}} = 0.11\% \text{ puntos de Si}$$

Para 50 kg. de FeSi con una concentración de 75% puntos de Si.

$$\%E = \frac{50 \text{ kg.} \times 75}{50000 \text{ kg.}} = 0.70\% \text{ puntos de Si}$$

Para 30 kg. de Fe Mn con una concentración de 72% de Mn.

$$\%E = \frac{30 \text{ kg.} \times 72}{50000 \text{ kg.}} = 0.04\% \text{ puntos de Mn}$$

Para 40kg. de FeSiMn con una concentración de 60% de Mn y 16% de Si.

$$\%E = \frac{40 \text{ kg.} \times 60}{50000 \text{ kg.}} = 0.048\% \text{ puntos de Mn}$$

$$\%E = \frac{40 \text{ kg.} \times 16}{50000 \text{ kg.}} = 0.01\% \text{ puntos de Si}$$

APÉNDICE B

El análisis deseado para el acero G-60 es: 0.30-0.32%C, 1.10-1.15%Mn, 0.020-0.030%S, 0.008-0.030%P, 0.19-0.20%Si y 0.005Al.

El cálculo para 300kg. de FeSiMn con una concentración de 60% de Mn y 16% de Si, con más o menos de 50Tn. (50000 kg.) de acero en la olla.

$$\frac{\%E = 300\text{kg.} \times 60}{50000 \text{ kg.}} = 0.36\% \text{ puntos de Mn}$$

$$\frac{\%E = 300\text{kg.} \times 16}{50000 \text{ kg.}} = 0.09\% \text{ puntos de Si}$$

Para 350kg. de FeMn con una concentración de 72% de Si

$$\frac{\%E = 350\text{kg.} \times 73}{50000 \text{ kg.}} = 0.50\% \text{ puntos Mn}$$

Para 35 kg. de FeSi con una concentración de 75% puntos de Si

$$\frac{\%E = 35\text{Kg.} \times 75}{50000 \text{ kg.}} = 0.05\% \text{ puntos de Si}$$

Para 300kg. de FeSiMn con una concentración con una
concentración de 60% de Mn y 26% de Si.

$$\%E = \frac{200\text{kg.} \times 60}{50000 \text{ kg.}} = 0.24\% \text{ puntos de Mn}$$

$$\%E = \frac{200\text{kg.} \times 16}{50000 \text{ kg.}} = 0.6\% \text{ puntos de Si}$$

Como se puede observar los cálculos difieren un tanto de los resultados obtenidos de la muestra de aceros, pero esto depende del nivel de pureza de las ferroaleaciones.