

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**ELABORACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO PARA FUNDIR
ACERO DE MEDIO CARBONO EN EL HORNO DE INDUCCIÓN
PARA EL LABORATORIO DE FUNDICIÓN**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

MARTÍN EFRAÍN PORTILLA CARRERA

martinportilla0875@yahoo.com.ar

DIRECTOR: ING. FAUSTO HERNÁN OVIEDO FIERRO MSc.

fausto.oviedo@epn.edu.ec

Quito, febrero 2012

DECLARACIÓN

Yo, Martín Efraín Portilla Carrera, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional, y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mi derecho de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, su Reglamento y la normativa institucional vigente.

Martín Efraín Portilla Carrera

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por el Sr. Martín Efraín Portilla Carrera bajo mi supervisión.

Ing. Fausto Oviedo MSc.

DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Un agradecimiento infinito y total a mi Padre Dios, por haberme devuelto a la vida y ser lo que soy.

DEDICATORIA

A mis padres Efraín Eduardo y María Rosario (+).

CONTENIDO

DECLARACIÓN	I
CERTIFICACIÓN	II
AGRADECIMIENTO	III
DEDICATORIA	IV
CONTENIDO	V
ÍNDICE DE FIGURAS	XII
ÍNDICE DE TABLAS	XIV
ANEXOS	XVI
RESUMEN	XVII
PRESENTACIÓN	XIX
CAPÍTULO I: METALURGIA DEL ACERO	1
1.1 Procesamiento del acero	1
1.1.1 Proceso con convertidores.	1
1.1.2 Comparación de los procesos de aceración.	6
1.1.3 Procesos de reciclaje de chatarra.	7
1.2 Proceso de producción de acero a partir de chatarra.	10
1.3 Termodinámica y cinética del acero.	12
1.3.1 Influencia de diversos elementos en las propiedades del acero.	12
1.3.2 Desoxidación.	16
1.3.3 Descarburación.	19
1.3.4 Desulfuración.	21
1.3.5 Defosforado.	24

1.3.6 Eliminación del hidrógeno	24
1.3.7 Eliminación del nitrógeno.	26
1.3.8 Eliminación del silicio.	26
1.4 Producción de aceros en el Ecuador.	27
1.4.1 Producción industrial de acero en el país.	27
1.4.2 Perspectiva de desarrollo de nuevos productos.	29
CAPÍTULO II: HORNOS ELÉCTRICOS DE INDUCCIÓN.	30
2.1 Funcionamiento.	30
2.1.1 Ventajas y desventajas del horno de inducción.	31
2.1.2 Principios físicos.	32
2.1.3 Transmisión del calor.	39
2.1.4 Propiedades características de la carga.	41
2.1.5 Hornos de inducción de crisol.	46
2.2 Revestimientos y refractarios.	50
2.2.1 Ensayos aplicados a materiales refractarios.	51
2.3 Mantenimiento preventivo de crisoles y material refractario.	51
2.3.1 Inspección del material refractario del horno.	52
2.3.2 Costos de mantenimiento.	54
2.4 Sistemas de enfriamiento.	55
2.5 Pruebas eléctricas en hornos de inducción.	56
CAPÍTULO III: CLASIFICACIÓN DE CHATARRA.	57
3.1 Características de la chatarra de acero.	57
3.2 Procesamiento de la chatarra de acero.	59

3.2.1 Clasificación de la chatarra según norma INEN NTE 2505:10	61
3.3 Disconformidades y dudas.	62
3.3.1 Resolución de disconformidades.	62
3.3.2 Resolución de dudas.	63
3.3.3 Materiales contaminantes.	63
3.3.4 Elementos indeseables.	63
3.3.5 Guía de dudas.	64
3.4 Diagrama de flujo para clasificar chatarra.	64
CAPÍTULO IV: INSUMOS Y EQUIPOS.	67
4.1 Reactivos químicos	67
4.1.1 Fundentes.	67
4.1.2 Ferroaleaciones.	68
4.1.3 Recarburantes y desulfurantes.	70
4.1.4 Cálculos metalúrgicos.	72
4.2 Equipos y accesorios.	76
4.2.1 Medición de la temperatura en la colada.	76
4.2.2 Medición de oxígeno en la colada	76
4.2.3 Uso de isótopos radiactivos.	77
4.2.4 Impulsión de gases en la colada.	77
4.2.5 Accesorios.	79
4.3 Mantenimiento preventivo de equipos y accesorios.	79
4.4 Costos de producción.	80
4.4.1 Balance energético.	80

4.4.2 Balance de explotación.	85
4.4.3 Funcionamiento real de una instalación de fusión.	86
CAPÍTULO V: OPERACIÓN DE LA FUNDICIÓN DE ACERO..	88
5.1 Factores que influyen en la fundición de acero.	88
5.1.1 Densidad del acero.	88
5.1.2 Modelación del acero líquido.	88
5.2 Seguridad industrial.	89
5.3 Procesos para la producción de acero.	90
5.3.1 Proceso en una sola escoria.	90
5.3.2 Proceso en doble escoria.	90
5.4 Secuencia de operaciones.	91
5.4.1 Fase de fusión.	91
5.4.2 Fase de afino.	92
5.4.3 Control del proceso.	92
5.4.4 Hornadas típicas.	93
5.5 Metalurgia secundaria. Desgasificado.	96
5.6 Tratamientos de escoria a la cuchara y trasvase. Post fundición.	98
5.7 Exigencias para fundir acero al carbono.	98
5.7.1 Primera exigencia: Ajuste de composición.	98
5.7.2 Segunda exigencia: Ajuste de temperatura.	99
5.7.3 Tercera exigencia: Desoxidación.	99
5.7.4 Cuarta exigencia: Desulfuración.	99
5.7.5 Quinta exigencia: Eliminación de inclusiones.	100

	10
5.7.6 Sexta exigencia: Descarburación.	100
5.7.7 Séptima exigencia: Eliminación de hidrógeno.	101
5.7.8 Revisión inicial antes del proceso de fundición.	101
5.8 Diagrama de flujo para fundir acero.	101
CAPÍTULO VI: NORMATIVA VIGENTE.	103
6.1 Normas técnicas.	103
6.1.1 Normalización.	103
6.1.2 Norma tecnológica.	105
6.1.3 ASTM	107
6.1.4 AISI-SAE	108
6.1.5 ASME	109
6.1.6 INEN	109
6.2 Normas ambientales.	110
6.3 Normas de seguridad industrial.	113
6.4 Ensayos en los aceros.	114
6.4.1 Ensayos no destructivos.	114
6.4.2 Ensayos destructivos.	115
6.4.3 Otros ensayos.	115
6.4.4 Propósito de los ensayos.	116
6.4.5 Política estadística de un laboratorio.	116
6.4.6 Técnicas de muestreo.	119
CAPÍTULO VII: ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD.	119
7.1 Responsabilidad.	119

7.1.1 Principios generales del control de calidad.	120
7.1.2 Importancia del control y aseguramiento de la calidad.	120
7.2 Actividades.	121
7.2.1 Check list.	122
7.2.2 Matriz de aspectos e impactos.	123
7.2.3 Políticas de fundición.	123
7.2.4 Informe de la revisión inicial.	124
7.3 Análisis de diferencias.	125
7,4 Plan de implementación del sistema de gestión.	126
7.5 Formatos.	128
7.6 Fundiciones realizadas en el laboratorio.	128
7.7 Ensayos realizados a probetas.	129
ANÁLISIS DE RESULTADOS	XX
CONCLUSIONES	XXIV
RECOMENDACIONES	XXVI
BIBLIOGRAFÍA	XXVIII

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Convertidor Bessemer, Kelham Island Museum, Inglaterra	3
Figura 1.2: Horno Martin-Siemens	4
Figura 1.3: Horno eléctrico de arco.	8
Figura 1.4: Horno de inducción de baja frecuencia.	9
Figura 1.5: Pacas de chatarra para reciclaje.	11
Figura 1.6: Diagrama de Ellingham.	17
Figura 1.7: Curvas de equilibrio Al-O a 3 diferentes temperaturas.	18
Figura 1.8: Esquemas de desgasificación empleados.	21
Figura 1.9: Relación de azufre en la colada.	23
Figura 1.10: Relación azufre-nitrógeno.	26
Figura 2.1: Factor de potencia para hornos de inducción.	38
Figura 2.2: Resistividad de metales.	43
Figura 2.3: Resistividad de diferentes aceros.	43
Figura 2.4: Entalpía de diferentes aceros.	45
Figura 2.5: Conductividad térmica de aceros.	45
Figura 2.6: Esquema de horno de inducción.	46
Figura 2.7: Utilización de potencia del horno en función del llenado.	48
Figura 2.8: Potencia y factor de agitación en media frecuencia.	49
Figura 3.1: Diagrama de flujo para clasificar chatarra,	65
Figura 4.1: Sistema CAS-OB.	78
Figura 4.2: Diagrama Sankey.	85
Figura 5.1: Gráfico esquemático de operaciones.	97

Figura 5.2: Diagrama de flujo para fundir acero al carbono. 102

Figura 7.1: Diagrama de flujo para el informe de la revisión final. 125

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Comparación de procesos de aceración.	6
Tabla 1.2: Composición característica de la chatarra.	16
Tabla 1.3: Valores típicos de actividad en acero líquido.	19
Tabla 1.4: Propiedades, aplicaciones y nivel de carbono típico.	20
Tabla 1.5: Concentración de hidrógeno a diversa presión atmosférica.	25
Tabla 2.1: Rendimiento eléctrico en hornos de inducción.	37
Tabla 2.2: Factor K.	38
Tabla 2.3: Resistividad y coeficientes de conductividad.	42
Tabla 2.4: Permeabilidad magnética máxima de ferrosos.	44
Tabla 2.5: Calor específico de aceros.	44
Tabla 2.6: Emisividad de varios metales.	46
Tabla 2.7: Coeficiente de agitación.	49
Tabla 2.8: Tipo de ensayo ASTM.	51
Tabla 2.9: Tabla AMFE para el crisol del horno de inducción.	53
Tabla 2.10: Índice de prioridad de riesgo para el crisol.	53
Tabla 3.1: Guía de disconformidades.	63
Tabla 3.2: Guía de dudas.	64
Tabla 3.3: Densidades de especies metálicas.	64
Tabla 4.1: Composición de cal para acería.	67
Tabla 4.2: Composición química del ferrocromo.	68
Tabla 4.3: Composición química del silicomanganeso.	69
Tabla 4.4: Datos tomados en una fundición.	81

Tabla 4.5: Datos de resistencia eléctrica para el acero.	82
Tabla 5.1: Densidades de aceros.	88
Tabla 5.2: Principales reacciones químicas en el afino,	92
Tabla 5.3: Proporciones para formar escoria reductora.	95
Tabla 6.1: Algunos Organismos nacionales de normalización.	105
Tabla 7.1: Matriz de implementación del SGI.	127

ANEXOS

ANEXO A: Fotografías de la fundición de acero.

ANEXO B: Fotografías del horno de inducción del laboratorio de fundición.

ANEXO C: Documentación.

Anexo C.1: Formato de Check List.

Anexo C.2: Formato de Hoja de Bitácora.

Anexo C.3: Matriz de aspectos e impactos inicial.

Anexo C.4: Bitácoras de fundiciones realizadas.

Anexo C.5: Preparatorios realizados (órdenes de trabajo).

Anexo C.6: Plano de taller.

Anexo C.7: Diagrama de proceso.

Anexo C.8: Hoja de proceso indicada.

Anexo C.9: Plano del crisol del horno de inducción.

Anexo C.10: Vocabulario técnico.

ANEXO D: Ensayos realizados.

Anexo D.1: Análisis de la probeta utilizando espectroscopia LIPS.

Anexo D.2: Metalografías.

Anexo D.3: Ensayo de tracción.

Anexo D.4: Norma ASTM A588. Especificación.

Anexo D.5: Composición química del acero ASTM A36.

Anexo D.6: Plano de taller de la probeta. Norma INEN NTE ISO 377.

RESUMEN

El presente proyecto se inscribe en el ámbito de las fundiciones de acero de medio carbono (aceros con contenido menor a 0.4% en peso de carbono) debido a la facilidad de adquirir chatarra por ser el tipo de acero comúnmente usado en el Ecuador; además, se realiza un breve comentario sobre la realidad de la industria siderúrgica en el Ecuador y sus perspectivas.

Este proyecto es una descripción del reciclaje del acero, utilizando el horno de inducción y chatarra previamente clasificada. No describe modo alguno de obtención de acero a partir de materia prima (arrabio).

Se incluye una breve teoría acerca del funcionamiento de los hornos de inducción y los parámetros principales para su buen desempeño. Se toma en cuenta criterios de mantenimiento preventivo para el crisol del horno, que es la parte crítica o que demanda mayor atención del personal que da servicio a este horno.

Se menciona un criterio para la clasificación de chatarra ferrosa, sin dejar de lado la norma vigente establecida por el INEN.

Si bien se menciona los costos de producción involucrados en un proceso de fusión, estos no se realizaron porque el propósito del laboratorio es de investigación y docencia, mas no para obtener utilidad. Sin embargo, se puede tener una idea de los costos de producción del horno, si se desarrolla los rubros establecidos en equipos e insumos.

Se enumeran los principales procesos de metalurgia secundaria aplicados a nivel mundial, uno de los cuales se adapta al laboratorio de fundición y para un horno de inducción.

Como todo proceso está normado o estandarizado se menciona lo referente a organismos de normalización, desde el punto de vista de cada asociación. De esta normativa se infiere que se deben realizar ensayos para certificar el producto obtenido.

Y finalmente, se realiza un pequeño ensayo sobre calidad, su aseguramiento y un breve análisis de la gestión de la calidad en la operación de fundición de

acero en el horno de inducción del laboratorio, expresada en la Matriz de aspectos e impactos. Esta matriz se la obtuvo después de implementar un procedimiento adecuado para fundir acero en el horno de inducción. Se implementa una documentación para tal procedimiento.

Además, se realizó un ensayo de tracción sobre una probeta extraída de la colada, un análisis de composición química utilizando espectrografía LIPS y metalografías de muestras de dos fundiciones de acero realizadas. Los resultados se muestran en los anexos. La última fundición simula una fundición de una pieza de acero.

PRESENTACIÓN

Este proyecto se presenta para aplicar los conocimientos científicos de metalurgia adquiridos durante la carrera, y complementar con conocimientos tecnológicos nuevos.

En el Laboratorio de Fundición se ha venido realizando prácticas de laboratorio con materiales tales como fundición gris, latón, bronce, y especialmente aluminio. Este trabajo se presenta para suplir el vacío existente en fundiciones de acero, y que servirá de base para otras investigaciones o prácticas.

En este trabajo se investiga lo referente a revestimientos refractarios para tener un conocimiento e implementar un plan de mantenimiento preventivo del horno de inducción. Además, se desarrolla una temática sobre insumos que se necesitan para la fundición de acero. Esto servirá para desarrollar experiencias en futuras fundiciones y sus correspondientes estudios.

También sirve para desarrollar criterios de selección, clasificación y manejo de chatarra ferrosa.

Este trabajo se realizó para detallar un proceso de fundición de acero en horno de inducción porque la información que existe con mayor detalle, se refiere a hornos eléctricos de arco.

El presente trabajo se realizó para:

- Establecer un procedimiento documentado para fundir acero de medio carbono en el horno de inducción del laboratorio.
- Establecer la gestión de calidad del entorno, expresado en una matriz, la misma que debe ir actualizándose después de cada operación de fundición.
- Proponer una documentación del proceso de fundición, que deberá presentarse como respaldo de las actividades realizadas en futuras operaciones de fundición, las mismas que incluyen ensayos y análisis.

CAPÍTULO I

METALURGIA DEL ACERO.

1.1 PROCESAMIENTO DEL ACERO.

Existen varios procedimientos para obtener acero a partir de arrabio, que a su vez se obtiene de mineral de hierro en altos hornos. Estos altos hornos necesitan para producir una tonelada de arrabio un requerimiento de 2 toneladas de mineral de hierro, 1/2 tonelada de coque, 1/3 de tonelada de piedra caliza y 4 toneladas de aire. Los procesos para fabricar acero a partir de arrabio se lo realiza en convertidores y los que usan chatarra de acero como materia prima utilizan hornos eléctricos.

Los procesos que utilizan convertidores son los siguientes:

- Proceso Bessemer-Thomas.
- Proceso Siemens-Martin.
- Proceso de oxígeno básico.

Los procesos que reciclan acero como chatarra son:

- Proceso en horno de arco eléctrico.
- Proceso en horno de inducción.

1.1.1 PROCESOS CON CONVERTIDORES.

1.1.1.1 Proceso Bessemer-Thomas.

El Proceso Bessemer fue el primer proceso industrial barato para la fabricación en serie de acero en lingotes fundidos. El proceso es nombrado por su inventor, Henry Bessemer, quien sacó una patente del proceso en 1855. El proceso fue independientemente descubierto en 1851 por William Kelly. El principio clave es la retirada de impurezas del hierro mediante la oxidación producida por el insuflado de aire en el hierro fundido. La oxidación causa la elevación de la temperatura de la masa de hierro y lo mantiene fundido. El

equipo ideado por el inglés Henry Bessemer se llama convertidor por cuanto convierte el arrabio en acero. Consiste en un gran recipiente piriforme, forrado con una gruesa plancha de acero y revestida interiormente de material refractario; la parte superior está abierta y el cuerpo es cilíndrico y móvil en torno de un eje horizontal, es taladrado en su parte inferior por pequeños agujeros para la insuflación del aire. El aparato descansa sobre dos soportes uno de los cuales posee un mecanismo que hace girar el recipiente para que sea posible cargar la fundición sin que se tapen los agujeros del fondo, y para facilitar la salida de la colada del acero una vez realizada la conversión. Esta operación se desarrolla en tres periodos:

Escorificación: es cuando se trata la primera conversión y se retiran las cenizas; luego se coloca en sentido horizontal y se carga de fundición hasta 1/5 de su capacidad. Se le inyecta aire a presión y enseguida se devuelve al convertidor a su posición normal. El oxígeno del aire, a través de la masa líquida, quema el silicio y el manganeso que se encuentra en la masa fundente y los transforma en los correspondientes óxidos. Esta primera fase se efectúa sin llamas dentro de unos 10 min, y recién al término de la operación aparecen chispas rojizas que salen de la boca del convertidor.

Descarburación: continuando la acción del soplete, el oxígeno empieza la oxidación del carbono, lo que se efectúa con mucha violencia y con salidas de llamas muy largas, debido a las fuertes corrientes del aire y al óxido de carbono en combustión.

Recarburación: quemándose el carbono, el oxígeno llegaría a oxidar totalmente el hierro dejándolo inservible; a este punto se corta el aire, se inclina el convertidor y se añade a la masa líquida una aleación de hierro, carbono y manganeso en una cantidad relacionada con la calidad del acero que se desea obtener. Se endereza luego el aparato y simultáneamente se le inyecta otra vez aire por pocos minutos y por último se vierte por su boca primero las escorias y después el acero obtenido.

Este proceso requiere de refractarios ácidos, posteriormente se emplearon refractarios básicos. Ambos procesos de aceración requería un arrabio con

composición definida de azufre y de fósforo, además de manganeso y carbono. El proceso con refractario básico se llama procedimiento Thomas, ampliamente utilizada en Europa Oriental, debido al tipo de arrabio obtenido, con mayor contenido de azufre y fósforo. La principal causa para que estos procedimientos sean menos usados fue la dificultad de desulfurar el acero obtenido, llegando incluso a desechar hornadas enteras.



Figura1.1: Convertidor Bessemer, Kelham Island Museum, Sheffield, Inglaterra

1.1.1.2 Proceso Siemens-Martin.

El proceso Martin-Siemens se realiza con hornos de reverbero y se utilizan principalmente para la fusión y afinado del acero destinado a la fabricación de lingotes, es la forma de fabricación de acero más extendido en Gran Bretaña y Estados Unidos. Su capacidad puede variar entre 25 y 500 toneladas. También se empleaban hornos más pequeños, de 15 a 30 toneladas. El horno Martin-Siemens es calentado con aceite o con gases combustibles como gas de coquería, gas de gasógenos o una mezcla de gas de alto horno y de coquería.

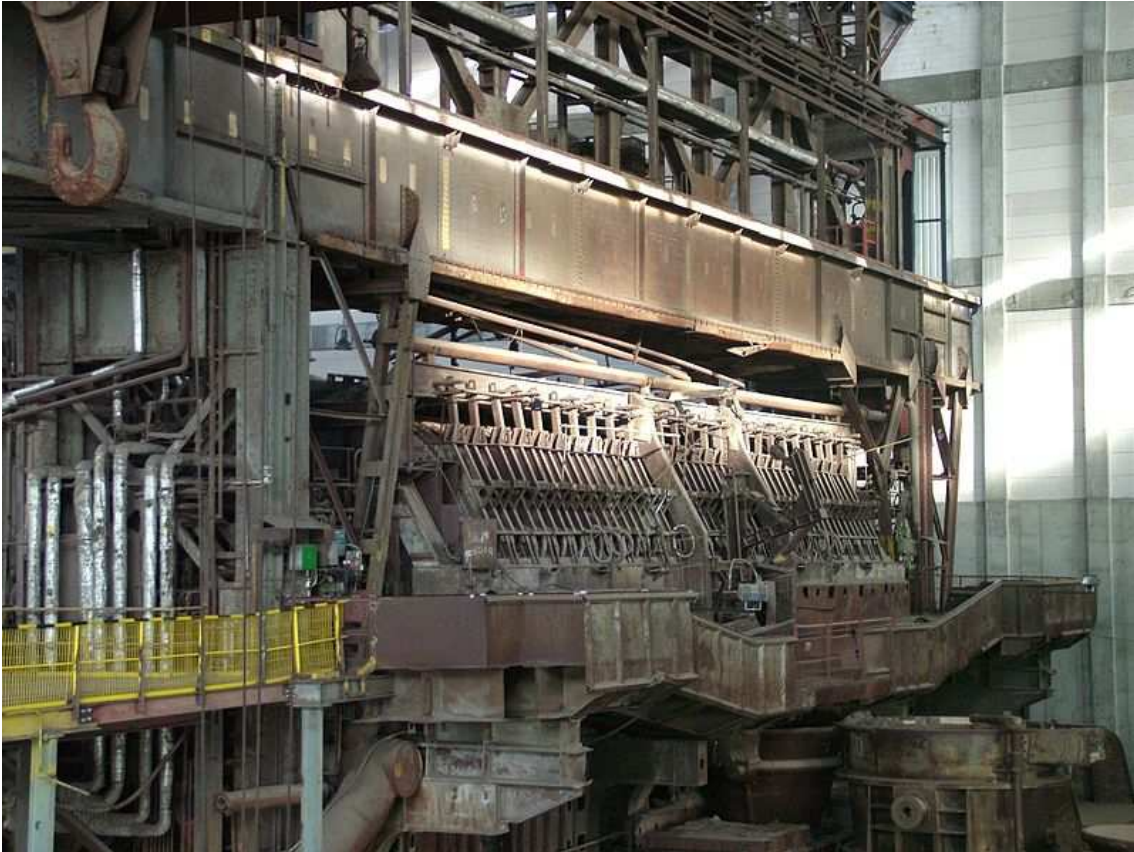


Figura 1.2: Horno Martin-Siemens.

El horno es un recipiente rectangular con puertas para combustible y gases en ambos extremos. Estas puertas pueden responder a diversos diseños, pero en todo caso deben dirigir los gases hacia abajo, hacia la carga o baño del metal. La llama y los gases calientes pasan por encima del baño y salen por el extremo opuesto del horno. Los gases de la combustión atraviesan uno o dos regeneradores antes de perderse en la chimenea; frecuentemente se colocan calderas después de los regeneradores para recuperar el calor perdido y conseguir la mejor recuperación posible de los productos de la combustión mediante válvulas enfriadas con agua y entonces al horno se le calienta desde el extremo opuesto.

Existen dos procedimientos Martin-Siemens utilizados: básico y ácido. El horno Siemens básico tiene paredes y fondo de gran espesor, de magnesita o dolomita sinterizada, con una bóveda en arcos construida con ladrillo silicioso. La solera de los hornos ácidos se hace con arena cuarzosa. El frente del horno situado en la plataforma de carga, tiene de 3 a 7 puertas, enfriadas con agua y accionadas hidráulicamente, a través de las cuales se carga el horno y se

observa el proceso de fusión y afino. En el centro de la parte posterior del horno se halla el orificio de sangrado, taponado firmemente en los hornos fijos y cerrados ligeramente en los basculantes. Los hornos básicos tienen otro orificio al nivel de la escoria, por donde se evacua parte de la escoria formada. Ordinariamente para fabricar los aceros Siemens se emplea una gran cantidad de chatarra de acero. En las grandes acererías donde se fabrican perfiles de construcción y raíles se carga casi el 50% de chatarra, y el resto de la carga está constituido por arrabio líquido. Inmediatamente después de efectuada la colada, todos los residuos de acero son removidos del horno y se pone dolomita calcinada sobre el fondo y paredes laterales para reemplazar las pérdidas ocasionadas en la operación anterior. Después se carga el horno con caliza, después mineral y, finalmente la chatarra de acero. Todos los grandes hornos Siemens se cargan en la actualidad mecánicamente. Después de unas dos horas, la chatarra de acero empieza a fundirse y al llegar a este punto se añade el hierro fundido. La acción del material sobre el lingote origina la ebullición del baño, formándose una escoria clara, parte de la cual se retira. Después que la chatarra está completamente fundida, la caliza empieza a descomponerse en anhídrido carbónico, el cual asciende a través del metal y escoria, y también en óxido cálcico, que va a la superficie y contribuye a formar una escoria más espesa. La acción del mineral, junto con la de la escoria, hace bajar el contenido de carbono del baño, de tal suerte que en una operación bien conducida queda alrededor de un 1% de carbono cuando la caliza se ha descompuesto totalmente. La operación siguiente consiste en eliminar más carbono hasta dejarlo en valor deseado, el cual depende del tipo de acero que se trata de fabricar, y de calentar el baño hasta la temperatura conveniente para poder hacer la colada y llenar las lingoteras.

1.1.1.3 Proceso de oxígeno básico.

El proceso de oxígeno básico (llamado BOS, BOF, Linz-Donawitz-Verfahren, convertidor LD, proceso COBOX) es un método de producir acero en el cual el hierro fundido rico en carbono e impurezas se transforma en acero. El proceso es una mejora sobre el proceso de Bessemer históricamente importante. El convertidor L-D es conocido por los topónimos austriacos Linz y Donawitz (un distrito de Leoben). Tras la segunda guerra mundial se iniciaron experimentos

en varios países con oxígeno puro en lugar de aire para los procesos de refinado del acero. El éxito se logró en Austria en 1949, cuando una fábrica de acero situada cerca de la ciudad de Linz y de Donawitz comenzó a desarrollar el proceso del oxígeno básico o L-D. Actualmente es un procedimiento muy empleado en todo el mundo. El proceso de oxígeno básico tiene lugar en un recipiente de forma semejante al convertidor Bessemer. En él se introduce arrabio fundido y chatarra de acero, y se proyecta sobre la superficie un chorro de oxígeno a una presión muy grande. El carbono y las impurezas se queman rápidamente. Un crisol BOS típico sostiene aproximadamente 500 toneladas de acero. El crisol está recubierto con ladrillos refractarios resistentes al calor que pueden resistir la alta temperatura del metal fundido.

1.1.2 COMPARACIÓN DE LOS PROCESOS DE ACERACIÓN.

En el siguiente cuadro se menciona aspectos económicos, operativos y metalúrgicos de los tres principales procesos de aceración que se aplican a nivel mundial. De estos procesos, dos emplean como materia prima en buen porcentaje al arrabio, aunque no se descarta la utilización de chatarra de acero en las fundiciones. El cuadro establece una comparación entre procesos de obtención de acero a partir de arrabio y un proceso, muy extendido, que recicla chatarra. No se incluye un proceso en horno de inducción, debido a su baja utilización a gran escala.

TABLA 1.1: Comparación de procesos de aceración. No se incluye el proceso Bessemer-Thomas debido a su desuso⁽¹⁾.

Proceso	Horno Siemens-Martin	Convertidor LD	Horno de arco eléctrico.
Inversión inicial	Alta	Baja a media	Variable, baja si se incluye colada continua (concast)
Producción	Más de 2 millones de toneladas	½ millón de toneladas	Producción variable.
Costo de operación	Medio	Bajo	Medio a alto, especialmente aceros aleados, bajo si la energía es barata.
Materia prima	Grande	Escasa	Escasa.

Combustible	Líquido o gaseoso	Ninguno	Ninguno
Energía eléctrica	Baja	Baja	Alta
Uso de oxígeno	Medio	Alto	Bajo para aceros no aleados, medio para aceros aleados.
Productividad por hora.	Bajo con carga fría.	Alta	Media.
Flexibilidad de productos (límites)	Aceros de medio carbono y aceros aleados.	Aceros de medio carbono y aleados.	Alta, cualquier acero.
Exactitud de control	Bueno	Bueno para bajo carbono, regular para medio carbono.	Muy bueno.
Contenido de N, %	0.003-0.008	0.002-0.008	0.008-0.016
Tamaño del horno, toneladas	Carga fría: 50 a 180; arrabio líquido: 80 a 450.	50-350	50-400 o 5-50 para prácticas.
Frecuencia de suministro a colada continua	Intermitente	Alta, cada hora o menos.	Intermitente.
Observaciones	No se planean nuevas instalaciones		Común para fundiciones o forjas, facilidad de paros.

1.1.3 PROCESOS DE RECICLAJE DE CHATARRA.

1.1.3.1 Proceso en horno de arco eléctrico directo.

Es un horno que calienta la carga por medio de un arco eléctrico. Los tamaños van desde una tonelada hasta 400 toneladas de capacidad. La temperatura en el interior de un horno de arco eléctrico puede alcanzar los 1800 grados Celsius. El primer horno eléctrico de arco fue diseñado por el francés Paul Héroult, en una planta comercial establecida en EE.UU. en 1907. En principio, el acero obtenido por horno eléctrico era un producto especial para la fabricación de máquinas herramienta y de acero para resorte. Los hornos de

arco eléctrico fueron utilizados en la Segunda Guerra Mundial para la producción de aleaciones de acero.

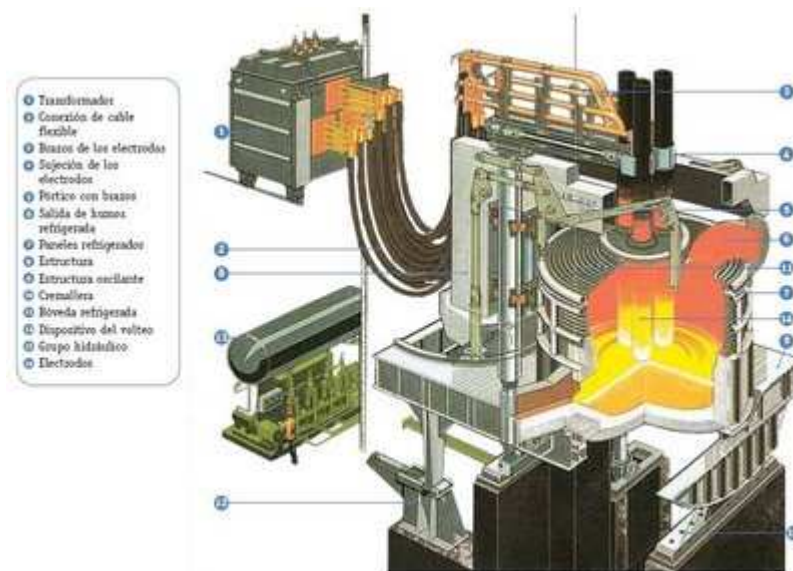


Figura 1.3: Horno eléctrico de arco.

1.1.3.2 Proceso en horno de inducción.

En los hornos eléctricos de inducción, el calor se genera debido a corrientes inducidas por una corriente alterna. Se distinguen tres clases de hornos de inducción:

- *Hornos de baja frecuencia.* En estos hornos el calor se produce por el efecto joule de la corriente inducida en la carga que se trata de fundir, y que actúa como arrollamiento secundario de un transformador. Los primeros modelos estaban formados por un crisol en forma de anillo que constituía la espira del secundario de un transformador, cuyo primario estaba conectado a la red. Pero en la actualidad los hornos de esta clase están formados por un crisol cuyo fondo está en comunicación con un conducto circular, que forma la espira secundaria del transformador de inducción. El metal contenido en el conducto es el que se funde, desplazándose su masa y comunicando el calor al resto del material.

- *Hornos de alta frecuencia.* En los hornos de alta frecuencia el calor lo producen las corrientes de Foucault, ordinariamente consideradas como parásitas, inducidas en el metal, que actúa como núcleo de un solenoide o arrollamiento primario. Estos hornos están formados por un crisol refractario que contiene el metal, rodeado de un arrollamiento de tubo de cobre por el que circula una corriente de alta frecuencia, que crea un campo magnético variable, calentándose la masa de metal contenida en el crisol por las corrientes de Foucault inducidas por el campo magnético. El tubo de cobre del arrollamiento que rodea el crisol está enfriado por agua que circula en su interior. En general las frecuencias de las corrientes eléctricas para la alimentación de este tipo de hornos, varía de 300 a 30000 ciclos por segundo, producidas por osciladores de tubos catódicos en un principio. La potencia del horno y por tanto, la temperatura, se regula variando la frecuencia. Los hornos eléctricos de alta frecuencia tienen la ventaja de que en ellos puede fundirse cualquier metal o aleación en las condiciones más rigurosas, en atmósferas especiales o al vacío, ya que los hornos pueden trabajar herméticamente cerrados. Tienen el inconveniente de su elevado coste de instalación, que todavía encarece más la necesidad de instalar condensadores para mejorar el factor de potencia que es muy bajo. Por todo esto no se emplean, generalmente, más que para fundir metales preciosos, níquel y aleaciones de níquel, aceros inoxidable y en experiencias de laboratorio.

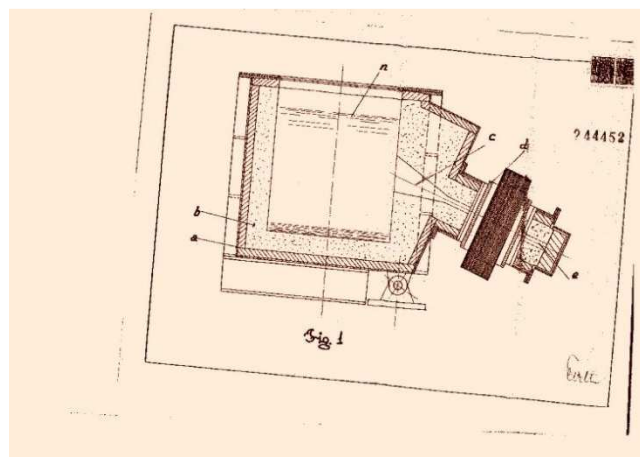


Figura 1.4: Horno de inducción de baja frecuencia.

1.1.3.3 Cualidades de los hornos eléctricos de inducción.

Los hornos eléctricos de inducción se emplean cada día más para la fusión de metales, pues tienen las siguientes cualidades:

- Su rendimiento es muy elevado, por generarse calor únicamente en la masa metálica a fundir.
- Las corrientes electromagnéticas que circulan por el metal producen movimientos en la masa fundida, que uniformizan su composición.
- La temperatura puede regularse con gran precisión.
- Con estos hornos es posible fundir en vacío.
- Las pérdidas por volatilización y oxidación son muy reducidas.

1.2 PROCESO DE PRODUCCIÓN DE ACERO A PARTIR DE CHATARRA.

Todos los metales tienen una propiedad que desde el punto de vista ambiental es muy buena, que pueden ser reciclados una vez que su vida útil ha llegado a su término. De esta manera todas las máquinas, estructuras, barcos, automóviles, trenes, etc., se despiezan al final de su vida útil y se separan los diferentes materiales que los componen, originando unos desechos seleccionados que se conocen con el nombre de chatarra.

Esta chatarra se prensa y se hacen grandes compactos en las zonas de despiece que se envían nuevamente a las acerías, donde se consiguen otra vez nuevos productos siderúrgicos, tanto aceros como fundiciones. Se estima que la chatarra reciclada cubre el 40% de las necesidades mundiales de acero (año 2006).

El acero se puede obtener a partir de mineral (ciclo integral) en instalaciones que disponen de Altos Hornos o partiendo de chatarras férricas (ciclo electro siderúrgico) en Hornos Eléctricos.

Las chatarras seleccionadas contenidas en la cesta de carga se introducen en el horno eléctrico por su parte superior, en unión de agentes reactivos y escorificantes, desplazando la bóveda giratoria del mismo. Se funde la chatarra de una o varias cargas por medio de corriente eléctrica hasta completar la

capacidad del horno. Este acero es el que va a constituir una colada. Se analiza la fundición y se procede a un primer afinado para eliminar impurezas, haciendo un primer ajuste de la composición química por adición de ferroaleaciones que contienen los elementos necesarios.

El acero líquido obtenido se vuelca en un recipiente revestido de material refractario, denominado cuchara de colada. Este recipiente hace de cuba de un segundo horno de afinado denominado horno cuchara, en el que se termina de purificar el acero, se ajusta su composición química y se calienta a la temperatura adecuada.

La cuchara se lleva a una máquina de colada continua, en cuya artesa receptora se vierte el acero fundido por el orificio del fondo o buza. La artesa lo distribuye en varias líneas, cada una con su molde o lingotera, en donde se enfría de forma controlada para formar las palanquillas, que son los semiproductos de sección rectangular que se someterán a las operaciones de forja y conformación subsiguientes. En todo el proceso de reciclado hay que respetar las normas sobre prevención de riesgos laborales y las de carácter medioambiental.



Figura 1.5: Pacas de chatarra para reciclaje.

Al ser muy alto el consumo de electricidad, el funcionamiento del horno debe programarse cuando la demanda de electricidad es menor. Por otro lado, en la entrada de los camiones que transportan la chatarra a las industrias de reciclaje tiene que haber detectores de radioactividad, así como en diferentes fases del proceso.

1.3 TERMODINÁMICA Y CINÉTICA DEL ACERO.

La producción de acero tenía 50 años cuando se formó el Comité de física-química del acero de la AIME (American Institute of Mining Engineers) para comprender el proceso más allá de la química inorgánica básica.

Ahora, pese a muchas discusiones, no se cuenta con explicaciones claras para muchos fenómenos; y los programas para control por computadora contiene factores falsos, por lo que la intuición y experiencia del metalúrgico juega un papel muy importante. En la práctica es un sistema de fases múltiples, altamente contaminado por un líquido corrosivo a alta temperatura, por lo que se considera conveniente alejarse del equilibrio químico para que las reacciones ocurran a mayor rapidez, y alcanzar productividad con bajo costo unitario.

El valor práctico de los mejores datos termodinámicos es escaso y solo indican probabilidad de tendencias si no hay movimiento. Además la imposibilidad de conservar una muestra líquida en su estado original, dificulta un examen completo de la colada en el interior del horno. No es práctico hacer el análisis químico de una hornada, y se confía en los datos de una muestra.

El control administrativo de las operaciones se basa en el conjunto de datos de un análisis estadístico, con los cuales se confirma o no cierta relación entre una condición y los resultados. Por lo que la evaluación es función de la experiencia y la habilidad administrativa, sin entender a fondo las bases complejas de la aceración.

1.3.1 INFLUENCIA DE DIVERSOS ELEMENTOS EN LAS PROPIEDADES DEL ACERO.

En la química del acero al carbono se emplean varios elementos que tienen diferentes roles como componentes principales, generadores de alguna propiedad mecánica y otros como simples modificadores.

1.3.1.1 El principal: el carbono (C).

El carbono se disuelve en el hierro o existe como carburo y es el que controla la dureza y la resistencia en laminado, el endurecimiento por temple, el incremento de la tenacidad por revenido o templabilidad, la contracción del acero y tendencias de agrietamiento. Los aceros que tienen menos del 0.05%C se llaman suaves y se usan para esmaltado, material de buena resistencia a la corrosión y para máquinas eléctricas. Desde 0.05 hasta 0.15%C se usa en láminas y tiras, que sirven para conformado profundo, incluyen aceros aleados en esta escala. De 0.15 a 0.33%C se consideran estructurales, que incluyen algunos aceros aleados en esta categoría. De 0.34 a 0.65%C se laminan o forjan para elementos de gran resistencia, por lo que se añaden microaleantes para elevar su resistencia, por lo que se llaman HSLA (High Steering Low Alloy). De 0.65 a 1%C son aceros duros y frágiles, se emplean en maquinaria caminera y agrícola, herramientas no sujetas a impacto y resortes para cargas fuertes. Los aceros más de 1%C rara vez se usan.

1.3.1.2 El generador de tenacidad: el manganeso (Mn).

Todos los aceros tienen manganeso, debido a las materias primas y se lo requiere para revertir el efecto fragilizador del azufre. Este elemento promueve la resistencia y es un débil endurecedor, pero no fragiliza al acero y lo conserva dúctil. La mayoría contiene de 0.3 a 0.9%Mn. De 0.9 a 1.6%Mn se usa en aceros resulturados para bajar la fragilidad tanto en frío como en caliente.

1.3.1.3 Los endurecedores: fósforo (P), nitrógeno (N), niobio (Nb), vanadio (V), níquel (Ni), cromo (Cr), molibdeno (Mo) y boro (B).

El fósforo y el nitrógeno son indeseables en el acero, pero en ciertas especificaciones se usan como endurecedores en niveles de bajo carbono. El niobio y el vanadio aumentan la resistencia, después de un tratamiento térmico, para partes livianas. El niobio estabiliza al carbono en los inoxidables previniendo su migración a los límites de grano y evitar la corrosión

intergranular. El vanadio evita el crecimiento de grano a elevadas temperaturas por lo que emplea para aceros de herramientas. El níquel es un endurecedor y promueve tenacidad que otros elementos lo quitan. El cromo y el molibdeno aumentan la dureza y la resistencia del acero laminado, logrando mejores índices después de templado y revenido. El cromo es el único material que concede al acero el adjetivo de inoxidable si está en cantidades superiores al 12% en peso. El boro como carburo, en cantidades mínimas aumenta el endurecimiento y es más efectivo que el cromo y el manganeso, pero requiere titanio para no formar nitruros. Todas estas aleaciones hacen al acero sensible a choques térmicos.

1.3.1.4 Modificadores magnetizantes: silicio (Si), aluminio (Al).

En cantidades pequeñas tienen gran influencia en las propiedades del acero, siendo el aluminio el más poderoso, con una variación de 0.005 a 0.015%Al o de 0.01 a 0.03%Si se cambia completamente la estructura del lingote. En cantidades de 0.6 a 3%Si se mejora fuertemente las propiedades magnéticas del acero, lo que permite su uso en máquinas eléctricas. De 0.2 a 0.4%Al, se refuerza la acción del silicio, pero bajan la conductividad térmica del acero. En aceros para forja se necesita 0.02%Al para obtener grano fino.

1.3.1.5 Ayudantes de maquinabilidad: azufre(S), plomo (Pb), telurio (Te), bismuto (Bi), selenio (Se).

La presencia de estos elementos permite un corte rápido y un acabado fino y uniforme, porque lubrican y conservan el filo de la herramienta y producen virutas cortas fácilmente desprendibles. El azufre permite fragilizar el acero en caliente, pero puede agrietarlo si se lo lamina.

1.3.1.6 Aleantes para herramientas de corte: wolframio (W), molibdeno (Mo), cobalto (Co).

Se presentan como carburos y permiten conservar la dureza y estabilidad a altas temperaturas. Llamados aceros de alta aleación para herramientas. El tungsteno es el más presente. El cobalto estabiliza aún más a los carburos e incrementa las propiedades de corte a alta velocidad a altas temperaturas incluyendo matrices de trabajo en caliente, en un rango del 1 al 2%.

1.3.1.7 Modificadores: titanio (Ti), circonio (Zr), cerio (Ce).

Estos elementos fijan el carbono, el nitrógeno y el azufre, en glóbulos iniciosos, además son poderosos desoxidantes, pero sus óxidos son abrasivos y perjudican la maquinabilidad.

1.3.1.8 Anticorrosivos: cobre (Cu).

En cantidades mayores al 0.2%Cu se mejora la resistencia a la corrosión atmosférica, aumenta la dureza pero baja la ductilidad.

1.3.1.9 Residuales: estaño (Sn), arsénico (As), antimonio (Sb), además cobre, níquel, molibdeno, cobalto y tungsteno.

La mayoría de estos elementos salen por refinación de la colada y eliminan en la escoria; algunos no siempre y quedan atrapados. Todos son endurecedores y el estaño es fragilizante, por lo que deben estar en cantidades mínimas, lo que se logra seleccionando de mejor forma la chatarra.

1.3.1.10 Fragilizador: hidrógeno (H).

El hidrógeno se disuelve en el acero y está presente por la humedad del crisol o de la chatarra, pero tiene poca solubilidad durante la solidificación. Produce grietas capilares, por lo que se recomienda que los crisoles, materia prima, lingoteras y bases de colado deben estar secas y calientes.

1.3.1.11 Otros elementos.

Existen otros elementos aleantes como uranio (U), torio (Th), paladio (Pd) y platino (Pt) que se encuentran en aleaciones especiales, que rara vez se lo usa.

1.3.1.12 Composición y límites de composición de aceros al carbono ⁽²⁾.

En el cuadro siguiente se especifica las características requeridas en las chatarras para fundición de acero. Este cuadro comprende una mezcla imprecisa de la carga y un análisis de la colada.

Tabla 1.2: Composición característica de la chatarra para aceros al carbono.

	C	Mn	P	Si	S	Residual
Límites de especificación	0,04/1,00	0,04/1,65	0,02 máx.	0,3 máx.	0,025 máx.	0,2/0,4
Mezcla teórica de carga						
30% chatarra-COBOX	2,9	0,9	0,04	0,71	0,04	0,1
50% chatarra-SM	2,1	0,8	0,085	0,52	0,05	0,13
100% chatarra-EAF	0,2	0,6	0,02	0,04	0,06	0,2
Análisis típico de la colada.						
COBOX	0,2	0,2	0,01/0,02	0,01	0,02	0,11
S-M	0,3/0,9	0,1/0,3	0,01/0,03	0,01	0,03	0,15
EAF	0,2	0,3	0,01/0,02	0,02	0,03	0,22

COBOX-convertidor de oxígeno básico. S-M-horno Siemens Martin. EAF-horno eléctrico de arco.

1.3.2. DESOXIDACIÓN⁽³⁾.

La aceración es un proceso de refinación que emplea la oxidación. Por definición, la refinación es la eliminación de impurezas de un líquido. Para la facilidad de formación de un óxido se toma en cuenta la diferencia entre la energía libre de formación del óxido y la del óxido del metal principal (hierro), en otras palabras se juega con la afinidad química. Los elementos con más afinidad por el oxígeno que la del hierro se oxidarán, mientras los que tengan menor afinidad que la del hierro quedarán atrapados. No existen límites claros en la formación de óxidos pero siempre ocurren en la secuencia Si-P-C-Cr-Mn-Fe, y con excepción del carbono que escapa como CO, se quedan como escoria. La solubilidad del oxígeno en el acero líquido es 0.16%, pero en el acero sólido es solo 0.003%. Se realiza la desoxidación antes de la solidificación, para prevenir orificios durante la fundición, además de productos porosos creados por precipitación de FeO. La principal fuente de oxígeno es la añadida al recipiente durante el proceso de aceración. La adición de óxidos sólidos es el método más comúnmente usado para reducir el oxígeno de la colada. Se emplea el diagrama de Ellingham para este propósito.

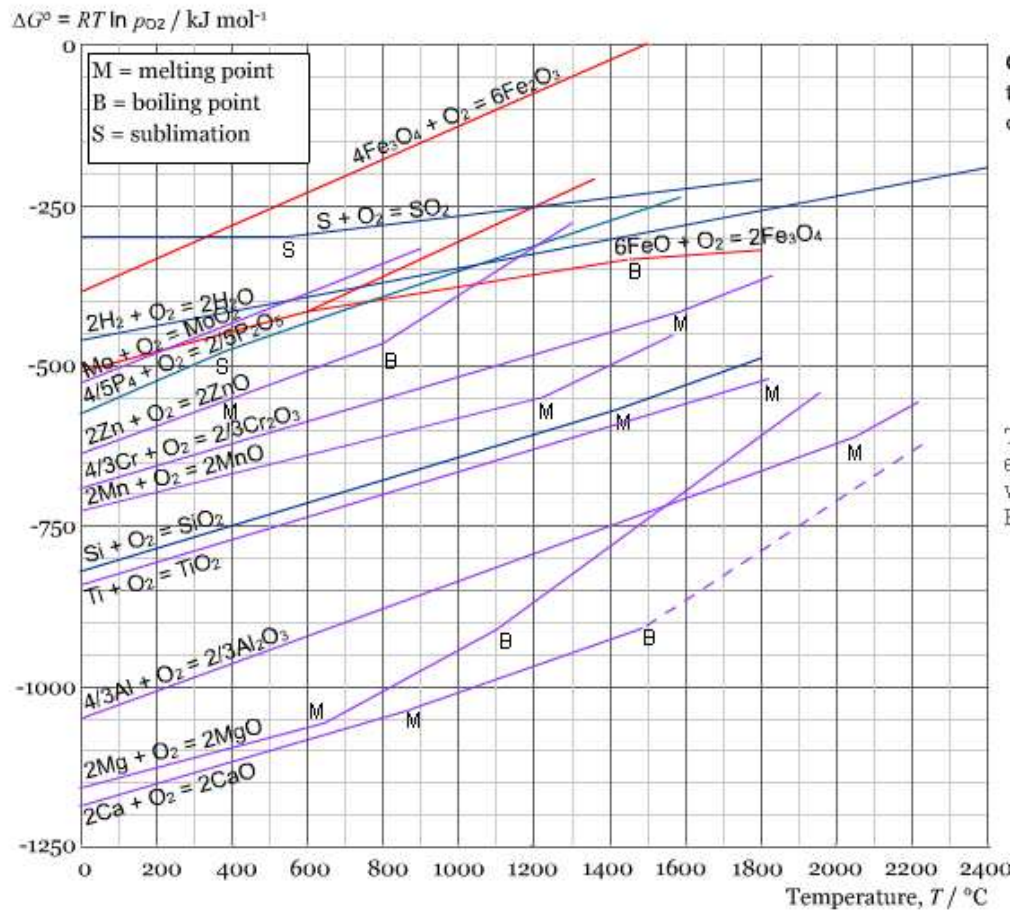
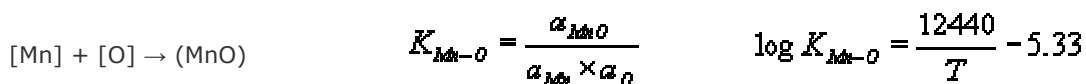
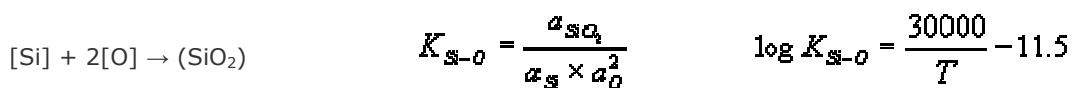
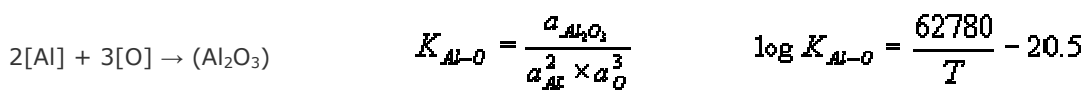
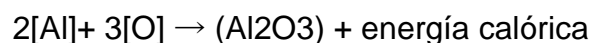


Figura 1.6: Diagrama de Ellingham.

Los óxidos más efectivos son los de aluminio, manganeso, titanio, calcio, magnesio y silicio. Los óxidos de titanio, calcio y magnesio tienen un costo alto. Las reacciones químicas y sus respectivas constantes de equilibrio, para el aluminio, silicio y manganeso son las siguientes:



El aluminio es un agente desoxidante muy potente que controla la actividad del oxígeno en el acero líquido mediante reacciones químicas



Donde la constante de equilibrio está dada por:

$$K_{Al-O} = \frac{a_{Al_2O_3}}{a_O^3 * a_{Al}^2} \quad [1]$$

$$\text{Donde } \log K_{Al-O} = \frac{62.78}{T[K]} - 20.5. \quad [2]$$

Al despejar de la ecuación [1] la actividad del oxígeno, da como resultado:

$$a_O = \sqrt[3]{\frac{a_{Al_2O_3}}{a_{Al}^2 * K_{Al-O}}}$$

La relación entre a_O y a_{Al} ha sido graficada para tres temperaturas diferentes en el siguiente gráfico ⁽⁴⁾.

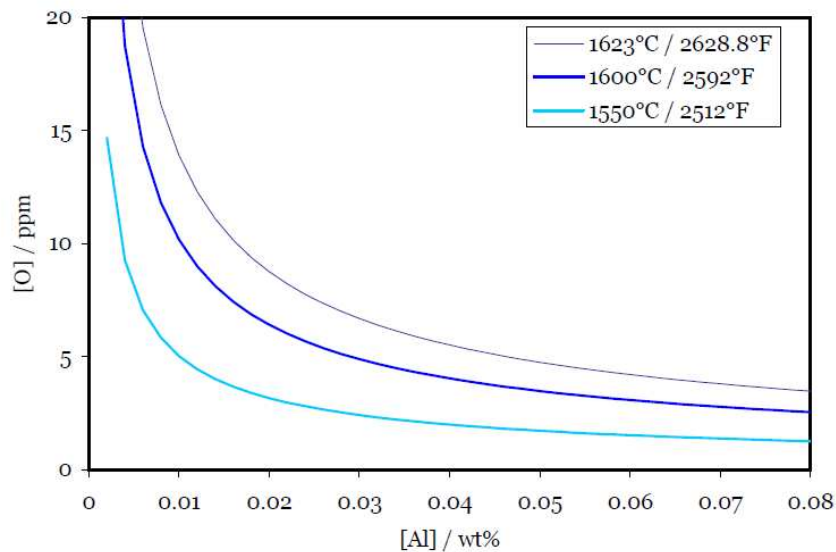


Figura 1.7: Curvas de equilibrio Al-O a tres diferentes temperaturas.

Se puede observar que la desoxidación con aluminio es más eficaz a bajas temperaturas. La desoxidación con aluminio da como resultado la formación de partículas de Al_2O_3 en el acero líquido. Si estas partículas no pueden flotar hacia la escoria antes de la colada, quedan atrapadas en el producto final como inclusiones. Para muchas aplicaciones, una cierta cantidad de inclusiones de Al_2O_3 no afecta significativamente las propiedades. Sin embargo, ciertas aplicaciones, tales como tuberías para distribución de petróleo y gas requieren de aceros "muy limpios", es decir, con muy poco nivel de inclusiones de óxidos y sulfuros, porque las mismas pueden actuar como sitios de iniciación de fisuras. La química de las formaciones de óxidos y sulfuros y su posterior eliminación durante la metalurgia secundaria es extremadamente compleja y objeto actual de investigaciones. Un tratamiento integral de las inclusiones está por lo tanto más allá del alcance del presente proyecto. Sin embargo, se deberá considerar los amplios efectos de la desoxidación en la formación de

Al_2O_3 , y asegurar que se dará el tiempo suficiente para que las partículas de Al_2O_3 puedan flotar. Este proceso podrá acelerarse mediante una suave agitación de la cuchara.

Tabla 1.3: Valores típicos de actividad y coeficientes de actividad en acero líquido (concentración en solución al 1% en peso)⁽⁵⁾.

Metal		Al	C	Mn	P	S	Si	Ti	H	N	O	Cr	Ni
Carbon	% _i		0.05	0.45	0.02	0.01	0.3	0.05					
steel	f _i	1.05	1.06	1.0	1.1	1.0	1.15	0.93	1.0	0.97	0.85		
1600 °C	a _i		0.053	0.45	0.022	0.01	0.345	0.046					
Stainless	% _i		0.05	0.45	0.02	0.01	0.3	0.05				18	8
steel	f _i	3.6	0.49	1.0	0.32	0.66	1.24	9.4	0.93	0.17	0.21	0.97	1.0
1600 °C	a _i		0.025	0.45	0.006	0.007	0.372	0.47				17.5	8.0

1.3.3 DESCARBURACIÓN.

El carbono es el elemento más importante en la estructura del acero. El metal líquido proveniente del alto horno todavía contiene aproximadamente un 4.7%C, es decir, excediendo los niveles indicados anteriormente. El proceso BOS implica la reducción de la mayor parte del carbono, silicio, manganeso y fósforo del metal caliente soplando un chorro supersónico de oxígeno en la carga. Al momento de la colada el acero tendrá entre el 0.03 y 0.07% C. Por lo tanto, para muchos grados y/o aplicaciones se debe agregar nuevamente carbono al acero durante la metalurgia secundaria.

La eliminación del carbono en el acero se logra a través de la reacción con oxígeno disuelto para formar burbujas de monóxido de carbono gaseoso, es decir:



Aplicando la ley de acción de masas:

$$K_{\text{CO}} = p_{\text{CO}} / a_{\text{C}} a_{\text{O}}$$

donde K_{CO} es la constante de equilibrio, p_{CO} es la presión de CO, y a_C y a_O son las concentraciones molares de C y O respectivamente.

La constante de equilibrio en sí misma está dada por: $\log K_{C-O} = - (1168/T) + 2.07$ donde T es la temperatura absoluta, en K. Las ecuaciones nos muestran que la reacción se verá influida tanto por la presión como por la temperatura.

TABLA 1.4: Propiedades, tratamiento, aplicaciones y niveles de carbono típicos⁽⁶⁾.

	Acero de ultra bajo carbono	Acero de bajo carbono	Acero de medio carbono	Acero de alto carbono
Carbono	<0.01 %C	<0.25 %C	0.25-0.7 %C	0.7-1.3 %C
Propiedades	<ul style="list-style-type: none"> •Alta resistencia •Alta tenacidad •Buena conformabilidad 	<ul style="list-style-type: none"> •Resistencia razonable •Alta ductilidad •Fabricabilidad 	<ul style="list-style-type: none"> •Alta resistencia • Alta tenacidad 	<ul style="list-style-type: none"> •Muy duro •Baja tenacidad
Tratamiento	Templado	Recocido, normalizado	Templado y revenido	Templado y revenido
Aplicaciones	Chapa para automóviles, tuberías, etc.	Aceros estructurales, chapa para automóviles, línea blanca, etc.	Ejes, engranajes, bielas, rieles, etc.	Resortes, matrices, herramientas de corte, etc.

Para desgasificar el metal fundido se emplea dos métodos:

- Desgasificación en tanque al vacío. El horno se encuentra dentro de una cámara al vacío, esto genera que los gases disueltos en la colada sean arrastrados por la diferencia de presiones, y por el chorro de argón que se insufla desde la parte inferior del crisol. Se dispone de un dispensador por donde se agregan aleantes a la colada.
- Desgasificación por recirculación y chorro de gas inerte a presión ambiental. Aquí se coloca una campana en la superficie de la colada, ésta sube por el vacío causado y se insufla argón a chorro. Se dispone de una lanza que introduce oxígeno en la colada. La colada va recirculando mientras la campana se mueva por la superficie de la misma.

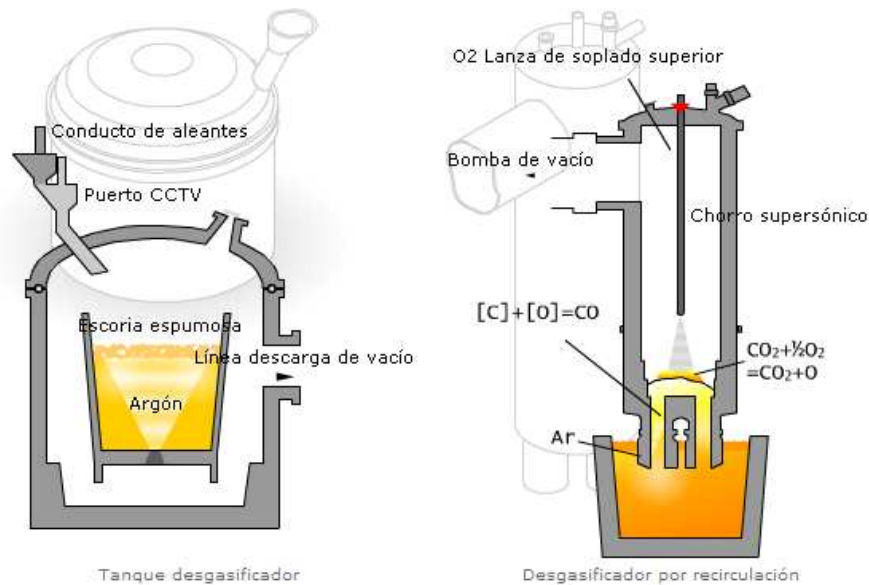


FIGURA 1.8: Esquemas de desgasificación empleados.

1.3.4 DESULFURACIÓN.

El azufre está presente en el acero sólido como inclusiones de sulfuro de manganeso (MnS). El volumen, el tamaño, la forma y la distribución de las inclusiones dependen de la concentración de azufre, concentración de oxígeno, velocidad de solidificación, grado de deformación en caliente y en frío y de las temperaturas de conformado en caliente.

Estas inclusiones de MnS tienen diversos efectos en el procesamiento y las propiedades del acero. Dichos efectos son fundamentalmente nocivos porque estas inclusiones son más bien plásticas y no metálicas. Por lo tanto, durante la deformación actúan como sitios de inicio de fisuras y zonas débiles.

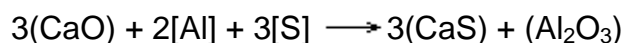
El azufre afecta la ductilidad, tenacidad, conformabilidad, soldabilidad y resistencia a la corrosión. Sin embargo, el azufre beneficia la maquinabilidad.

El acero debe tener suficiente manganeso para evitar la formación de sulfuro de hierro que es altamente nocivo para el trabajo en caliente y conduce a un agrietamiento severo durante la laminación en caliente (fragilidad en caliente).

Las aplicaciones más específicas del acero requieren que los niveles de azufre se reduzcan a niveles muy bajos (<0.001% S) a fin de lograr la combinación adecuada de resistencia, ductilidad, conformabilidad y soldabilidad. Para aquellas aplicaciones que son sustancialmente maquinadas durante la fabricación, se requiere de niveles más elevados de azufre.

La concentración de azufre en el convertidor LD (BOF) y el horno de arco eléctrico (EAF) es generalmente de 0.01 - 0.02%. A fin de satisfacer las especificaciones de una baja concentración de azufre se necesita eliminarlo del acero durante el proceso de metalurgia secundaria. El azufre es eliminado mediante reacciones químicas entre la escoria y el metal líquido, bajo condiciones reductoras donde el azufre es transferido desde el acero a la escoria, a través de la interfaz del metal - escoria y dentro de la misma.

La reacción química básica en la desulfuración es:



La partición (L_s) entre el azufre de la escoria (S) y en el acero [S] está dada por:

$$L_s = \frac{(\text{S})}{[\text{S}]} = \frac{C_s}{[a_o]}$$

donde C_s es la capacidad de azufre de la escoria y a_o es la concentración del oxígeno en el acero.

La escoria es una solución iónica de varios óxidos y fundentes. El tipo de escoria que estas reacciones necesitan es bastante diferente de la escoria altamente oxidante producida en los convertidores BOS/EAF.

Una parte importante de la metalurgia secundaria es la producción de la escoria requerida para reducir el azufre.

La escoria resultante del convertidor LD (BOF) y del horno de arco eléctrico (EAF) es típicamente 45% CaO, 23% FeO, 15% SiO₂, 8% MnO, 7% MgO, 2% P₂O₅.

La escoria básica es aquella que contiene iones libres de oxígeno, alimentada por la presencia de CaO y MgO. La escoria ácida es aquella con escaso O₂ y que contiene SiO₂ y P₂O₅. La basicidad (B) de la escoria se define como $B = \frac{\%CaO + 1.4\%MgO}{\%SiO_2 + 0.84\%P_2O_5}$. Se requiere de una escoria de alta basicidad para la desulfuración.

El calcio es un desulfurante y desoxidante muy potente y a menudo se agrega a la cuchara en un alambre tubular que contiene calcio metálico o CaSi en polvo. El calcio tiene un punto de ebullición de 1491°C, menor al punto de fusión del acero, y se vaporiza. Por lo tanto, es necesario introducir el calcio o sus compuestos lo más profundamente posible en la cuchara cuando se lo agrega al acero, a fin de que la presión ferrostática evite su vaporización. El calcio modifica la forma de las inclusiones de sulfuro en los niveles bajos de azufre, tornándolas más globulares, y por consiguiente, reduce el efecto nocivo del azufre sobre la ductilidad y la tenacidad.

El calcio casi no se utiliza como desoxidante en sí mismo, ya que es más caro que otros desoxidantes. Sin embargo, se utiliza para modificar las inclusiones de alúmina a una fase líquida de aluminato de calcio. La modificación de la composición y de la morfología de las inclusiones por acción del calcio, también aumenta la maquinabilidad.

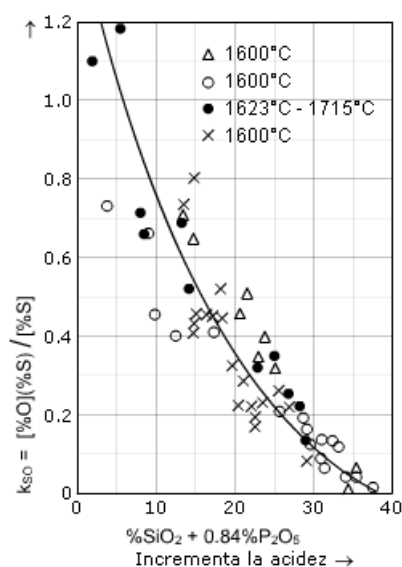


FIGURA 1.9: Relación de azufre en la colada ⁽⁷⁾.

1.3.5. DEFOSFORADO.

La escoria muy básica, ideal para desulfuración, alienta la reversión del fósforo presente como P_2O_5 en la escoria arrastrada desde el convertidor o el horno eléctrico, resultando en un alto contenido de fósforo en el acero. Esto implica que es importante minimizar el arrastre de escoria.

La eliminación del fósforo del acero por la escoria de la cuchara es gobernada por la misma ecuación de reacción que para la eliminación de azufre con la siguiente relación aproximada para la constante de reacción:

$$k_p \text{ (min}^{-1}\text{)} = 0.0019 \epsilon^{0.28}$$

Un tapón bien centrado permite una mayor emulsificación de la escoria y el metal con un incremento de la velocidad de flujo del gas.

1.3.6 ELIMINACIÓN DEL HIDRÓGENO.

El hidrógeno en el producto final sólido, especialmente en aquellas secciones de mayor espesor, se puede difundir hasta las imperfecciones y, por encima de niveles críticos, generar suficiente presión como para provocar o contribuir a la formación de fisuras. Por lo tanto, en ciertas aplicaciones es necesario reducir el nivel de hidrógeno a 1 ppm, respecto de las concentraciones típicas de 4ppm al momento de la colada. El hidrógeno disuelto es eliminado del acero líquido mediante el proceso de desgasificación por vacío mediante la reacción $[H] \rightarrow \frac{1}{2}H_2$, donde:

$$\log \frac{[\text{ppm H}]}{(P_{H_2})^{1/2}} = -\frac{1,900}{T} + 2.423$$

En la práctica, los desgasificadores modernos pueden alcanzar presiones de aproximadamente 0.001atm. Las presiones ultra bajas mencionadas anteriormente sólo se logran en la capa superficial del acero cuando se lo expone al vacío. En el fondo de la cuchara, la presión ferrostática es de alrededor de 2 atmósferas que es equivalente a un nivel de hidrógeno en equilibrio de 57 ppm, a una temperatura de 1600°C.

La relación entre la concentración de hidrógeno disuelto en equilibrio y la presión a una temperatura de 1600°C está dada a continuación.

TABLA 1.5: Concentraciones de hidrógeno a diversas presiones atmosféricas ⁽⁸⁾.

pH ₂ / atm	ppm H
1.0	25.6
0.1	8.1
0.01	2.56
0.001	0.81

Por lo tanto, se requiere de una alta velocidad de circulación en el metal junto con una fuerte agitación para desgasificar el metal por completo. La velocidad de eliminación del hidrógeno durante el proceso de desgasificación está controlada por la transferencia de masa en el acero líquido. La ecuación de velocidad está dada por:

$$\ln \left\{ \frac{[H]_f - [H]_e}{[H]_i - [H]_e} \right\} = -k_H t$$

donde

[H]_f = la concentración de hidrógeno luego de la desgasificación por tiempo t, mins;

[H]_i = la concentración inicial de hidrógeno;

[H]_e = la concentración de hidrógeno en equilibrio, determinada por la presión en el sistema;

k_H = la constante de velocidad general para la eliminación de hidrógeno.

En la mayoría de los desgasificadores modernos, la presión lograda está por debajo de las 0.01 atm y por consiguiente, se puede desestimar [H]_e con respecto a [H]_i y a [H]_f. Esto resulta en la siguiente ecuación de velocidad simplificada:

$$\ln \left\{ \frac{[H]_f}{[H]_i} \right\} = -k_H t$$

Si se reordena la ecuación en términos de concentración de hidrógeno final, se obtiene una ecuación de velocidad simplificada:

$$[H]_f = [H]_e + ([H]_i - [H]_e) \exp(-k_H t)$$

En los tanques desgasificadores, la constante de velocidad k_H está determinada principalmente por la velocidad del flujo de gas argón en el proceso de agitación.

1.3.7 ELIMINACIÓN DEL NITRÓGENO.

La solubilidad de nitrógeno en acero líquido se incrementa significativamente a los bajos niveles de azufre resultantes de una desulfuración efectiva. Es importante minimizar la exposición del acero a la atmósfera durante las últimas etapas de la metalurgia secundaria, manteniendo una capa continua de escoria sobre el mismo. La eliminación de nitrógeno se incrementa con tasas altas de flujo de argón y bajo contenido de azufre en el acero. Es, entonces, posible remover el nitrógeno del acero líquido durante el desgasificado al vacío.

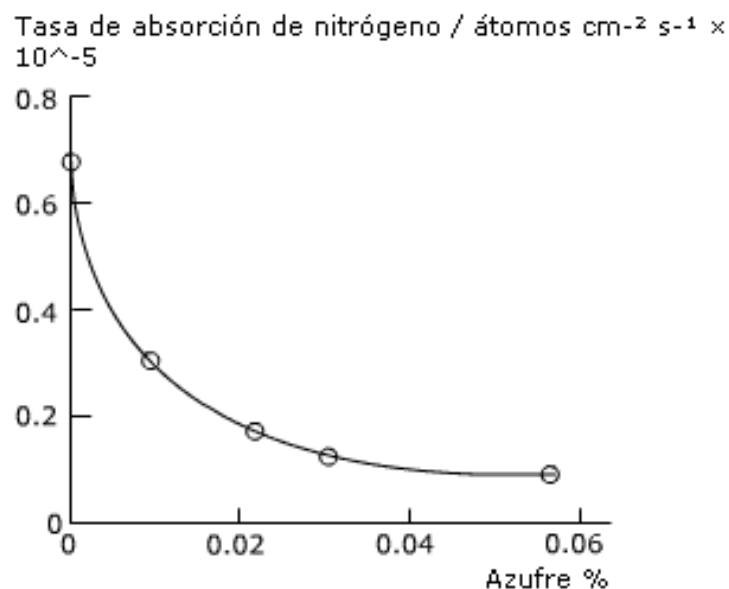
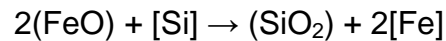


FIGURA 1.10: Relación azufre – nitrógeno⁽⁹⁾.

1.3.8 ELIMINACIÓN DEL SILICIO.

Debido a su posición en la secuencia de energías libres de óxidos, el silicio se oxida fuera de la colada temprana y rápidamente, al igual que el aluminio al oxidarse a alúmina casi instantáneamente. Esta oxidación procede a través del hierro, o en su forma disociada, en la que el oxígeno monoatómico es indiferente en un proceso básico.



La sílice resultante es un fuerte óxido ácido y se neutraliza a silicato dicálcico, $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, con cualquier óxido de calcio presente. Tal vez esta forma no se disocie en la colada y permanezca inerte en la escoria. Para la eliminación del silicio es una acción de dos pasos: primero una oxidación, seguida de una neutralización. Más tarde se forma $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$. Esta reacción es exotérmica, calienta la colada y va bien a bajas temperaturas, es decir al inicio del proceso.

No se recomienda la introducción de ferrosilicio para que el horno no trabaje lentamente, esta acción no favorece la desulfuración y es nociva para el revestimiento del horno.

1.4 PRODUCCIÓN DE ACEROS EN EL ECUADOR.

1.4.1 PRODUCCIÓN INDUSTRIAL DE ACERO EN EL PAÍS.

El lento perfeccionamiento de las técnicas correspondientes a la fusión, afinado y aligación de las aleaciones ferrosas, las cuales alcanzaron su máximo desarrollo en los siglos XVIII y XIX, permiten correlacionar la realidad de la producción siderúrgica en el Ecuador.

Debido a la información geológica existente, en el Ecuador no se puede establecer un alto horno para obtener arrabio, porque no se han descubierto yacimientos con minerales que contengan hierro en cantidades suficientes para ser explotados. Además de la casi ausencia de carbón mineral de alto poder energético, que es empleado en la fundición primaria.

Además algunos métodos desarrollados, no se han afirmado plenamente entre los fundidores. Estos son el afino por medio de convertidores, presentes en

grandes fundidoras de acero (por ejemplo Funasa), pero en medianas y pequeñas no se utilizan siquiera, debido al costo y al desconocimiento sobre este tema.

Otra técnica, que está desarrollándose con conocimiento empírico es la fabricación de fundición maleable y nodular, llegándose a confusiones metalúrgicas debido a que en las fundidoras no se cuenta con equipo de análisis para certificar la composición y la metalurgia obtenida.

Hay una buena aceptación del horno eléctrico, especialmente del tipo de arco, que es empleado en grandes y medianas fundidoras. El horno de inducción recién se está introduciendo, en parte debido al cambio de matriz energética planteada por el Estado, y por otro lado por comparación de costos y operación, con el horno de arco. Esto en grandes y medianas fundidoras.

En fundidoras que tienen acceso a conocimiento tecnológico, actualmente se aplican técnicas de desoxidación y desgasificación de metales ferrosos y no ferrosos. Hay empleo de ferroaleaciones en cantidades calculadas previamente. En la totalidad de plantas no se emplean técnicas de desgasificado del acero, por lo que no se obtienen productos de excelente calidad. En otras instalaciones, donde el conocimiento empírico se aplica, el empleo de ferroaleaciones se usa de manera arbitraria y sin sustento técnico.

Todavía no se está investigando sobre técnicas de aligación para fabricar aceros aleados con níquel, cromo, cobalto, etc. Tampoco se tiene conocimiento de alguna planta que re fusione acero aleado, ni tampoco de investigaciones de orden tecnológico en las universidades, aunque hay esfuerzos de muy pocas fundidoras por fabricar acero inoxidable en hornos de inducción.

Hay aplicación de técnicas de laminación y estampación en caliente, a partir de palanquillas importadas, para fabricar especialmente acero tratado para construcción de obras civiles, con un buen control de calidad en el proceso. También para fabricar elementos de tornillería, láminas metálicas para estructuras metálicas. Algunos tipos de perfiles se lo hacen por laminación en

frio. No se conoce aplicación de otras técnicas de conformado del acero tales como aceros forjados, extruidos, centrifugados y a presión.

Existen pocas plantas de tratamiento post fundición, de excelente nivel, debido a que estas plantas cuentan con un staff preparado académicamente. Estas plantas actualmente son las que mejor desarrollo tecnológico tienen a nivel de país, llegando incluso a tener clientes extranjeros, especialmente en tratamientos superficiales y tratamientos térmicos.

En plantas pequeñas todavía se emplea el cubilote y hornos de combustible, siendo estos últimos utilizados en fundiciones no ferrosas. El horno de cubilote se lo emplea intensivamente para fundiciones grises, con baja calidad en los productos debido al conocimiento empírico que se aplica.

1.4.2 PERSPECTIVA DE DESARROLLO DE NUEVOS PRODUCTOS.

La perspectiva de desarrollo de nuevos productos de acero va ligada al nivel de inversiones que se realicen, tanto en investigación científica y tecnológica. Una planta siderúrgica está encasillada dentro de las plantas industriales con mayor inversión inicial, solo superadas por plantas químicas y farmacéuticas.

Para desarrollar nuevos productos es necesario invertir en investigación científica, especialmente en laboratorios de las universidades de primer nivel, en coordinación con plantas industriales que deseen ampliar su gama de productos. Los temas son varios, desde técnicas de fundición y reciclado, micro aleaciones, aleaciones totales, técnicas de modelado y su simulación, desarrollo de tecnología post fundición, etc.

La variedad de aceros para desarrollar son amplios: aceros aleados de gran resistencia, aceros de cementación, aceros para nitruración, aceros de fácil mecanización, aceros de fácil soldadura, aceros con propiedades magnéticas, aceros de baja y alta dilatación, aceros resistentes a la fluencia, aceros inoxidable, aceros para válvulas, aceros refractarios, aceros rápidos, aceros micro aleados.

CAPÍTULO II.

HORNOS ELECTRICOS DE INDUCCIÓN.

2.1 FUNCIONAMIENTO.

Es un horno eléctrico en el que el calor es generado por la inducción eléctrica a un medio conductor (un metal) en un crisol alrededor del cual se encuentran enrolladas bobinas magnéticas.

El principio de calentamiento de un metal por medio de la inducción fue descubierto por Michael Faraday en 1831 mientras se encontraba experimentando en su laboratorio.

Unas ventajas del horno de inducción es la limpieza y la eficiencia desde el punto de vista energético, además es un proceso de fundición y de tratamiento de metales más controlable que la mayoría de los demás modos de fundición. Otra de sus ventajas es la capacidad para generar una gran cantidad de calor de manera rápida. Los principales componentes de un sistema de calentamiento por inducción son: bobina de inducción, fuente de alimentación, el acoplamiento de la carga, estación de enfriamiento y la carga metálica a ser fundida.

Las fundiciones más modernas utilizan este tipo de horno y cada vez más talleres de fundición están sustituyendo sus equipos por hornos de inducción, debido a que se generaba mucho polvo y contaminantes. El rango de capacidades de los hornos de inducción abarca desde menos de un kilogramo hasta cien toneladas y son utilizados para fundir hierro, acero, cobre, aluminio y metales preciosos. Uno de los principales inconvenientes de estos hornos es la imposibilidad de refinamiento; la carga de materiales debe estar libre de productos oxidantes y ser de una composición conocida; algunas aleaciones pueden perderse debido a la oxidación y deben ser reañadidos a la colada.

El rango de frecuencias de operación va desde la frecuencia de red (50 ó 60 Hz) hasta los 10 KHz, en función del metal que se quiere fundir, la capacidad

del horno y la velocidad de fundición deseada. Normalmente un horno de frecuencia elevada (más de 3000 Hz) es más rápido, siendo utilizados generalmente en la fundición de aceros, porque la elevada frecuencia disminuye la turbulencia y evita la oxidación. Frecuencias menores generan más turbulencias en el metal, reduciendo la potencia que puede aplicarse al metal fundido.

En la actualidad los hornos de frecuencia de línea han quedado en desuso, porque los mismos poseían muy poca eficiencia energética y además cargaban con un alto costo de mantenimiento, además contenían una gran cantidad de elementos electromecánicos. En las últimas décadas se han incorporado equipos de estado sólido, conformados en su etapa de potencia con componentes electrónicos tales como tiristores (diodos SCR) y transistores de potencia tipo IGBT, con lo que el rendimiento y eficiencia de estos equipos ha aumentado considerablemente.

Un horno precalentado y de capacidad de una tonelada puede fundir una carga fría en menos de una hora. En la práctica se considera que se necesitan 600 KW para fundir una tonelada de hierro en una hora.

Un horno de inducción en funcionamiento normalmente emite un zumbido, silbido o chirrido (debido a la magnetostricción), cuya frecuencia puede ser utilizada por los operarios con experiencia para saber si el horno funciona correctamente o a qué potencia lo está haciendo.

2.1.1 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL HORNO DE INDUCCIÓN.

Las ventajas son las siguientes:

- Los hornos son siempre rebatibles, sea mecánica o hidráulicamente.
- Las pérdidas de material por oxidación son mínimas, son funcionalmente económicos y por ende hay una producción de gran calidad.
- Supresión de electrodos, que implica una economía en gastos de funcionamiento por el menor consumo de energía eléctrica.
- Son menos riesgosos para la planta de fundición.

- No hacen ruido. Menor contaminación ambiental.

Las desventajas son las siguientes:

- El factor de potencia es aproximadamente 0.4, lo que obliga a acoplar bancos de condensadores para aumentar a 0.8.
- Gasto de instalación elevado, y los insumos para mantenimiento deben ser importados.
- No son construidos en el país, por lo que la garantía, equipamiento y guía técnica no son seguras o incompletas, e implican realizar ingeniería de detalle para su mantenimiento.

2.1.2 PRINCIPIOS FÍSICOS.

Los hornos de inducción se pueden clasificar de una manera primaria:

- Hornos con núcleo magnético a frecuencia de red que se aplica a fusión y mantenimiento del metal líquido, llamados hornos de canal.
- Sin núcleo magnético, a frecuencia de red, a media o alta frecuencia que se aplican a hornos de fusión, también para calentamiento de metal para deformación plástica y/o tratamientos térmicos. Estos son llamados hornos de crisol, como el que está instalado en el laboratorio.

En este capítulo se estudiará a hornos de inducción sin núcleo magnético y de media frecuencia porque es el tipo de horno que está instalado en el laboratorio. Además es del tipo de horno de fusión de crisol.

El horno del laboratorio tiene un arrollamiento o devanado primario envolviendo a la carga. La corriente alterna que circula por este devanado crea un campo magnético alternativo y variable. La ley de Lenz indica que se crea una corriente eléctrica en la carga metálica, de naturaleza alterna y también un campo magnético opuesto. Se tiene lo siguiente:

- Las corrientes eléctricas en primario y carga son de sentidos opuestos. El secundario está en cortocircuito.

- Si la carga es maciza, el campo magnético es nulo en el centro y máximo en la superficie. La intensidad de corriente en la carga tendrá un máximo en la superficie y nula en el centro.

Estas corrientes inducidas, llamadas corrientes parásitas (o de Foucault) disipan calor por efecto Joule en la carga. El calor producido es proporcional al cuadrado de la intensidad.

La bobina inductora, no es generalmente un solenoide. La forma depende de la aplicación (fusión, calentamiento, tratamiento térmico, soldadura, etc.) como también la geometría de la carga y la disposición adecuada de calentamiento.

En la fusión por inducción se suceden simultáneamente tres fenómenos físicos:

- Transferencia de energía del inductor a la carga por electromagnetismo.
- Transformación en la carga, de la energía eléctrica en calor por efecto Joule.
- Transmisión de calor por conducción en el interior de la carga.

En el horno instalado se tiene una bobina cilíndrica de diámetro interior D1 y altura h que envuelve a una carga metálica maciza de diámetro D2 y la misma altura. La corriente eléctrica generada en la carga se debe a la expresión:

$$I = I_0 \cdot e^{-x/p}$$

Donde p es la profundidad de penetración, que es el espesor superficial donde se considera constante la corriente inducida en la carga y de igual valor al de la superficie en cuestión. Entonces en el interior $i_p = i_0 \cdot e^{-1} = 0.37i_0$, es decir la corriente en el espesor p se ha reducido al 37%. A doble profundidad, en el 14%. La potencia generada por efecto Joule en la carga, y en el espesor p es $(1-0.37^2) \cdot 100 = 86\%$ de la potencia total.

2.1.2.1 Profundidad de penetración.

De las leyes de Maxwell la profundidad de penetración se define como:

$$p = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot f \cdot \mu}}$$

Donde:

- ρ = resistividad de la carga ($\Omega \cdot m$).
- f = frecuencia (Hz).
- μ = permeabilidad magnética (H/m). Se aplica en la realidad $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$, siendo μ_0 la permeabilidad magnética del vacío ($4\pi \cdot 10^{-7}$) y μ_r la permeabilidad magnética relativa.

La profundidad de penetración da las siguientes deducciones:

- Materiales más conductores que otros dan menores valores de p .
- Al aumentar la frecuencia se reduce p por lo que piezas de menor diámetro exigen mayor frecuencia.
- En materiales no magnéticos (Cu, Al, aceros amagnéticos y aceros magnéticos por encima del punto de Curie) el valor de la permeabilidad relativa es 1, que se aplica con el metal líquido.

2.1.2.2 Potencia transmitida a la carga.

La resistencia eléctrica de la carga es: $R_2 = \rho \cdot \frac{1}{S} = \frac{\rho \cdot \pi \cdot D^2}{h \cdot p} =$

$$= 6.24 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{D^2 \cdot \sqrt{\rho \cdot f \cdot \mu_r}}{h}$$

El campo magnético eficaz se define como los amperios-vuelta por unidad de longitud: $H_e = (I_1 \cdot n_1)/h$. Por lo que: $P_2 = 6.24 \cdot 10^{-3} \cdot H_e^2 \cdot D^2 \cdot h \cdot \sqrt{\rho \cdot \mu_r \cdot f}$ (w).

Interesa la potencia por unidad de área: $\frac{P_2}{A} = 4 \cdot 10^{-3} \cdot H_e^2 \cdot \frac{\rho}{p}$ (w/m²).

Se deduce que para aumentar la potencia específica transmitida a la carga es necesario::

- Aumentar la frecuencia, porque se limita a una capa superficial de espesor p y solo hay un calentamiento superficial.
- Aumentar el campo magnético, es decir los amperios-vuelta, de la bobina inductora, aunque está limitado por el tamaño del horno y la distancia entre espiras.

Se debe tomar en cuenta las propiedades físicas importantes:

- Una resistividad baja (Cu, Al) lleva a un menor valor de potencia específica. La resistividad aumenta con la temperatura y favorece este mecanismo para la fusión.
- En los materiales magnéticos se puede jugar con la frecuencia y la permeabilidad magnética, de modo que se opera a frecuencia baja hasta el punto de Curie, y por encima de éste se opera a mayor frecuencia. El punto de Curie se define como la temperatura de transformación del material de magnético en amagnético. Para el acero es 730 °C.

2.1.2.3. Rendimiento del calentamiento por inducción.

El rendimiento eléctrico es la relación entre la potencia transmitida a la carga y la potencia total consumida en los bornes del inductor.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1 + P_2} = \frac{1}{1 + \frac{P_1}{P_2}}$$

Donde:

- P_2 = potencia transmitida a la carga.
- P_1 = potencia perdida por efecto Joule en el inductor.

Si la resistencia eléctrica del inductor es R_1 , y al intensidad que circula I_1 , entonces $P_1 = I_1^2 \cdot R_1$. Para aumentar el rendimiento hay que reducir P_1 , que implica disminuir R_1 utilizando un buen conductor como cobre electrolítico desoxidado y dar a las espiras la máxima área transversal posible. Se considera un factor de llenado que tiene en cuenta el espesor de aislamiento

entre espiras. El espesor de la espira es s , el factor de llenado será $K = n_1 \cdot s / h$, donde n_1 es el número de espiras del inductor.

En forma general, el rendimiento se expresa mediante la siguiente fórmula ⁽¹⁰⁾.

$$\eta = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho \cdot \mu_r} \frac{1}{F_1 \cdot F_2 \cdot K} \frac{C_1 \cdot h_1}{C_2 \cdot h_2}}}$$

Donde:

- ρ_1 = resistividad del material del inductor. Cobre electrolítico de valor $1.72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$.
- ρ = resistividad de la carga.
- F_1 = factor de corrección por el diámetro o espesor de la carga.
- F_2 = factor de corrección por las dimensiones relativas de inductor y carga.
- K = factor de llenado del inductor por el aislamiento de las espiras.
- C_1 y C_2 = perímetros respectivos de inductor y carga.
- h_1 y h_2 = alturas respectivas de inductor y carga.
- μ_r = permeabilidad relativa de la carga. Siendo 1 para materiales no magnéticos

La complejidad de la formula deduce las siguientes consecuencias de diseño óptimo:

- Es necesario que ρ_1 sea mínimo, que obliga a construir el inductor con cobre electrolítico de alta conductividad. Además como la resistividad aumenta con la temperatura es importante enfriar rápidamente el inductor para mantener baja la temperatura de trabajo mediante agua a presión en circuito cerrado.
- El factor F_1 debe mantenerse en un valor de 0.7 que exige una relación D_2/p adecuada, sin embargo disminuir p implica aumentar la frecuencia, entonces es necesario fijar la frecuencia mínima por debajo del cual el rendimiento eléctrico sería muy bajo.

- El acoplamiento entre inductor y carga debe ser lo mejor posible que influye en el factor F_2 y en la relación C_1/C_2 . Esta relación es difícil en hornos de fusión, debido a las temperaturas alcanzadas, por lo que se recomienda un revestimiento refractario entre 80 y 200 mm.
- El perfil de cobre del inductor se elige de acuerdo al rango de frecuencias. El efecto de película o efecto Kelvin también se presenta en inductores con una penetración de la corriente.
- Una permeabilidad magnética elevada afecta al rendimiento en forma directa (μ_r) e indirectamente (disminuyendo la penetración en la carga y aumentando el valor de F_1).

La siguiente tabla muestra rendimientos eléctricos en equipos normales de calentamiento por inducción.

TABLA2.1: Rendimientos eléctricos en equipos de inducción⁽¹¹⁾.

Material	Rendimiento (%)
Acero magnético hasta 700-750 °C	90
Acero amagnético	70-75
Aluminio	50
Cobre	45

2.1.2.4 Factor de potencia.

En general en los equipos sin núcleo magnético, el factor de potencia varía entre 0.08 y 0.4, en función de la carga, el acoplamiento entre inductor y carga y la frecuencia de trabajo. Por lo que se dispone de una batería de condensadores de corrección del factor de potencia hasta un valor de 1 o por lo menos de 0.8.

Una formula general del factor de potencia es:

$$\cos \varphi = \frac{P_1 + P_2}{(Q_e + Q_1)^2 + (P_1 + P_2)^2}$$

- P_1 y P_2 son las potencias por pérdidas por efecto Joule en el inductor y la carga respectivamente.

- Q_e es la potencia reactiva por el mal acoplamiento entre inductor o carga, llamada entrehierro.
- Q_1 es la potencia reactiva por la carga referida al inductor.

Para calcular Q_e y Q_1 se emplean las siguientes fórmulas:

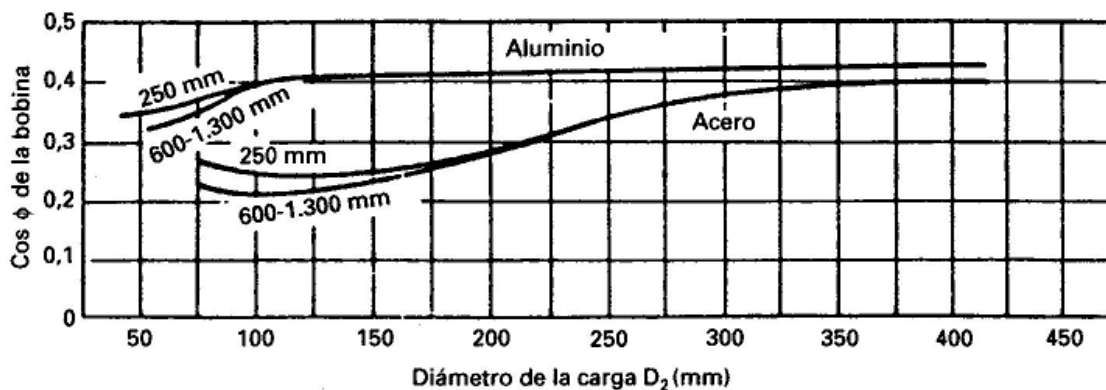
$$Q_e = \frac{\mu_0 \cdot \pi^2 \cdot (D_1^2 - D_2^2) \cdot f \cdot n_1^2 \cdot I_1^2}{2h}$$

$$Q_1 = \frac{K \cdot \pi \cdot D_2 \cdot \rho \cdot n_1^2 \cdot I_1^2}{h \cdot p}$$

Donde K es un factor que depende de D_2/p . Unos valores típicos son:

TABLA 2.2: Factor K.

D_2/p	0	0.75	1.5	2	3	4	5	6
K	0	0.25	0.6	1	1.1	1.05	1.01	1



250, 600, 1.300 mm - longitudes de la bobina

FIGURA 2.1: Factor de potencia para hornos de inducción ⁽¹²⁾.

Para hornos de crisol resulta suficiente la siguiente expresión:

$$\tan \varphi = 1 + \frac{2e}{p_b + p_c}$$

Donde:

- e = espesor del revestimiento

- p_b = profundidad de penetración en la bobina
- p_c = profundidad de penetración en la carga.

2.1.3 TRANSMISIÓN DE CALOR.

El calor generado por inducción en la carga se transmite al resto de la carga por conducción en estado sólido, por convección en estado líquido y produciéndose pérdidas por radiación y convección al ambiente, y por conducción a través del revestimiento del horno.

En los hornos de fusión de crisol el calor inducido en la carga eleva su temperatura, en un tiempo corto, provocando fusión en la periferia. Como consecuencia de las fuerzas electromagnéticas que se originan se produce un movimiento de metal fundido que provoca la introducción de metal sólido en la colada, dando lugar a un baño fundido de temperatura prácticamente uniforme.

2.1.3.1 Transmisión del calor en la carga.

Al inicio, la transmisión del calor se transmite por conducción en estado sólido. Se aprecian tres periodos transitorios hasta la fusión de la carga.

- Un periodo inicial en que la temperatura superficial sube rápidamente.
- Un periodo de elevación permanente en toda la masa que termina con la disgregación de toda la masa.
- Un periodo de empapamiento en que tiende a igualarse la temperatura en toda la masa debido a la inminente fusión.

Durante la etapa líquida, la transmisión de calor por convección es parecida al mecanismo de convección natural debido al flujo laminar que adquiere el metal durante el movimiento debido a fuerzas electromagnéticas. Debido a que el gradiente de temperatura es mínimo, se puede considerar a este mecanismo como casi nulo.

2.1.3.2 Pérdidas de calor por radiación.

Las pérdidas por radiación tienen escasa importancia, pero se toman en cuenta en los balances energéticos finales. La pérdida de calor se produce por la boca del horno y cuando la carga se encuentra en estado líquido, por lo que emite radiación en forma de luz. Responde a la expresión $P_r = 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot A \cdot e \cdot (T_s^4 - T_a^4)$ medido en [w]; donde A es el área de la boca del horno, e es la emisividad superficial de la carga, T_s es la temperatura superficial absoluta y T_a es la temperatura ambiental absoluta. Como valores de e pueden tomarse los valores de 0.8 para el acero, 0.5 para cobre y 0.3 para aluminio oxidado.

2.1.3.3 Pérdidas de calor por convección.

Además de las pérdidas de calor por radiación, se produce pérdida de calor por convección natural, que pueden calcularse mediante las siguientes fórmulas, siendo U el coeficiente por convección y P_c la potencia de pérdida por convección, establecidas para una superficie horizontal hacia arriba, típica en los hornos de fusión:

- $U = 2.49 \cdot (\Delta T)^{0.25}$ medida en (W/m²K).
- $P_c = 2.49 \cdot (\Delta T)^{1.25}$ medido en (W/m²).

Donde ΔT es la diferencia de temperatura entre la superficie y el aire ambiente.

2.1.3.4 Pérdidas de calor por conducción.

Se presenta en los hornos de fusión, en forma representativa, a través del revestimiento refractario, desde el interior del crisol hacia la bobina de cobre enfriada por agua. Si el revestimiento está compuesto de varias capas de espesores L_1 , L_2 , y conductividades térmicas k_1 , k_2 , el coeficiente de transmisión total K, asumiendo como pared cilíndrica con espesores pequeños respecto al diámetro del crisol D será:

$$\frac{1}{K} = \frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2}$$

Y las pérdidas de calor por conducción: $P_k = K \cdot (T_c - T_b)$ (W/m²) donde:

- T_c es la temperatura de la colada.

- T_b es la temperatura de la bobina.

2.1.3.5 Pérdidas por el agua de enfriamiento.

El agua utilizada en este tipo de hornos enfría bobinas, placas exteriores, calderería sujeta a campo magnético, fondo del horno, cables flexibles, circulando por tuberías apropiadas.

El calor absorbido por el tubo pasa al agua por convección estableciéndose un balance térmico:

$$P_a = M_a \cdot C_p \cdot \Delta T \text{ (KW)}$$

Donde:

- P_a = potencia cedida al agua de enfriamiento.
- M_a = caudal de agua (Kg/s)
- C_p = calor específico del agua (KJ/Kg·K)
- ΔT = gradiente de temperatura del agua (K).

Estas pérdidas comprende las generadas por efecto Joule y pérdidas a través del revestimiento refractario.

2.1.4 PROPIEDADES CARACTERÍSTICAS DE LA CARGA.

En el calentamiento por inducción se utilizan las propiedades de:

- Resistividad eléctrica.
- Permeabilidad magnética relativa.

En la transmisión de calor en la carga, aplicables a los cálculos de pérdidas de calor se aplican las propiedades de:

- Calor específico y entalpía.
- Conductividad térmica.
- Emisividad.

Estas propiedades, en conjunto, son función de la temperatura, por lo que se debe llevar documentación estadística.

2.1.4.1 Resistividad eléctrica.

En muchos metales la variación es lineal con la temperatura mediante la relación: $\rho = \rho_0 \cdot [1 + b(T - 20)]$. Donde:

- ρ_0 = resistividad del metal puro estándar medido a 20 °C ($\Omega \cdot m$)
- b = coeficiente de resistividad ($^{\circ}C^{-1}$)
- T = temperatura de trabajo ($^{\circ}C$)

TABLA 2.3: Resistividades y coeficiente de resistividad ⁽¹³⁾.

Material	Resistividad ($\Omega \cdot m$) $\cdot 10^{19}$	Coeficiente de resistividad ($^{\circ}C^{-1}$)
Aluminio (recocido)	28.28	0.0039
Cobre (recocido)	17.24	0.00393
Oro	24.4	0.0034
Hierro (99.99+%)	97.1	0.00651
Plomo (99.73+%)	206.48	0.00336
Magnesio (99.8%)	44.6	0.01784
Mercurio	958	0.00089
Níquel	68.4	0.0069
Nicrom (66%Ni+Cr y Fe)	1000	0.0004
Platino (99.99%)	106	0.003923
Plata (99.78%)	15.9	0.0041
Acero (cable)	107-175	0.006-0.0036
Wolframio	55.1	0.0045
Zinc	59.16	0.00419

En las figuras siguientes se aprecia que en los aceros y en el níquel la variación es no lineal, variando irregularmente con la temperatura, debido al contenido del carbono y de otros elementos en los aceros aleados. Por encima de 800 °C, las resistividades se igualan.

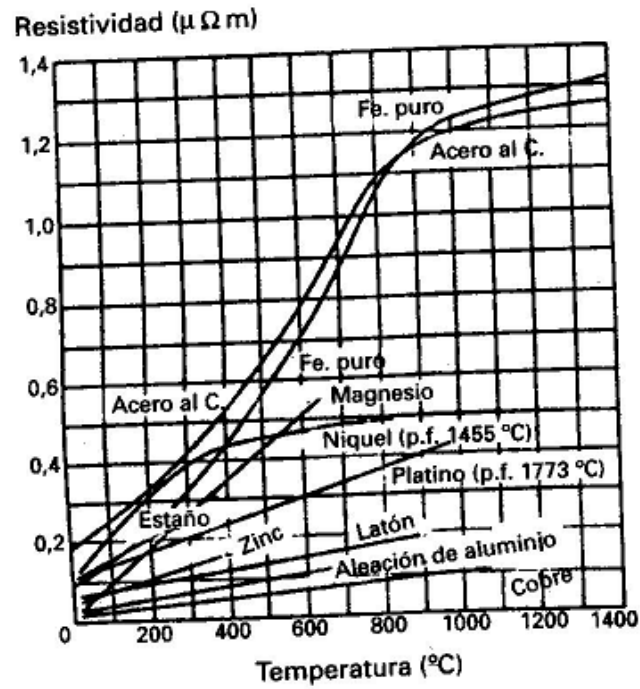


FIGURA 2.2: Resistividade de metais ⁽¹⁴⁾.

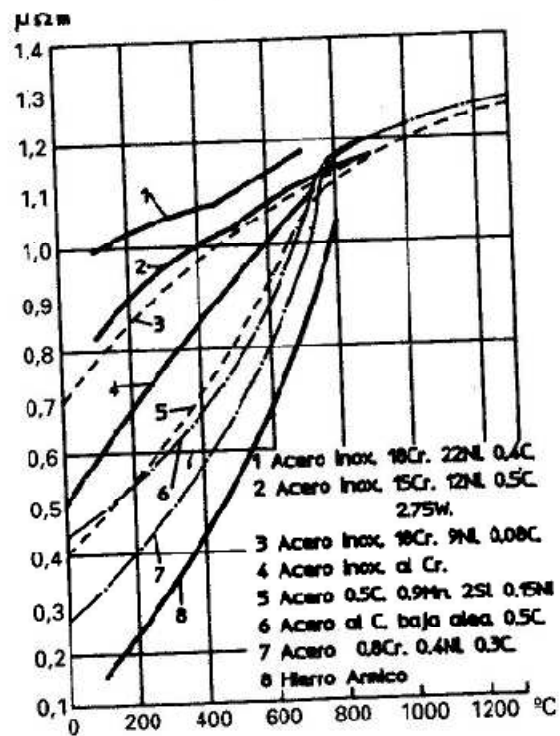


FIGURA 2.3: Resistividade de diferentes aços ⁽¹⁵⁾.

2.1.4.2 Permeabilidade magnética.

La permeabilidad magnética en materiales amagnéticos es uno, pero se alcanza valores elevados en materiales ferro magnéticos y aleaciones de níquel. La permeabilidad magnética está relacionada con la permeabilidad magnética del vacío $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$, mediante la expresión $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$.

La variación depende de varios factores: temperatura, composición química, impurezas accidentales, intensidad del campo magnético. El punto de Curie se establece en 730-750 °C para el acero.

TABLA 2.4: Permeabilidad magnética máxima de materiales ferrosos ⁽¹⁶⁾.

Material	Permeabilidad relativa máxima (μ_r)
Hierro puro	14000
Acero dulce	2000
Acero templado	100
Fundición de hierro	300-900

2.1.4.3 Calor específico y entalpía.

El calor específico interviene directamente en el cálculo del tiempo de calentamiento. Es una función de la temperatura, en los aceros hay variaciones importantes debido a la composición química del mismo, por este motivo es preferible operar con las entalpías entre las temperaturas límites que determinan el calor específico medio. En la tabla siguiente se muestra la variación del calor específico para dos tipos de aceros.

TABLA 2.5: Calor específico de aceros en KJ/Kg·K ⁽¹⁷⁾

Temperatura (°C)	Acero 0.2%C	Acero inoxidable 19/9
50-100	0.486	0.511
150-200	0.519	0.532
250-300	0.557	0.548
350-400	0.599	0.569
450-500	0.662	0.595
550-600	0.749	0.649
650-700	0.846	0.624
750-800	0.950	0.641
850-900	0.649	0.641
950-1000	0.649	0.649
1050-1100	0.649	0.662
1150-1200	0.666	0.674
1250-1300	0.687	0.682

La entalpía de los aceros también depende de la composición química, especialmente por encima de 750 °C. En la figura siguiente se indica las curvas de entalpía correspondientes a tres tipos de aceros al carbono y un acero inoxidable amagnético. El aumento en los aceros al carbono explica las fuertes diferencias en los calores específicos a temperaturas entre 700 y 800 °C.

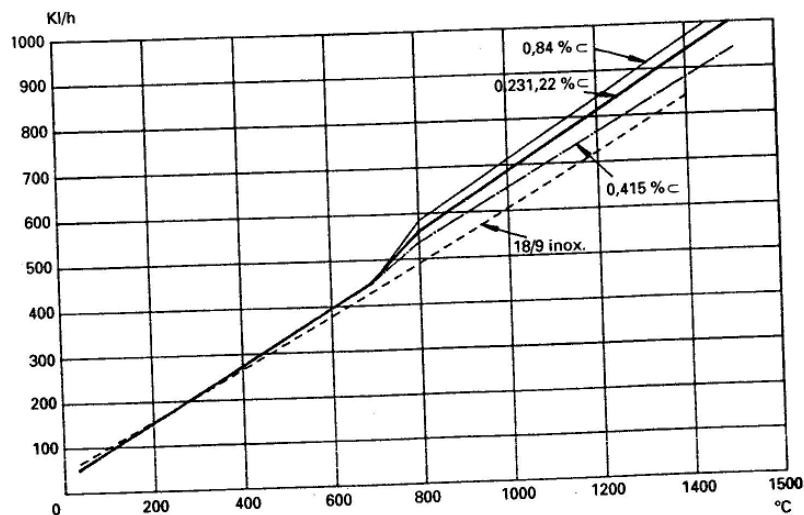


FIGURA 2.4: Entalpía de diferentes aceros⁽¹⁸⁾.

2.1.4.4 Conductividad térmica.

Se utiliza en el cálculo de la transmisión de calor por conducción desde la periferia (profundidad de penetración) hacia el resto de la carga. En el gráfico siguiente se muestra la conductividad de aceros al carbono y un inoxidable.

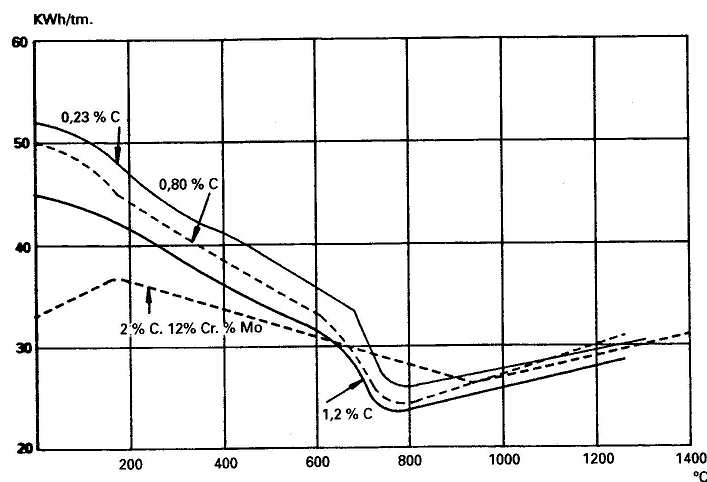


FIGURA 2.5: Conductividad térmica de aceros⁽¹⁹⁾.

2.1.4.5 Emisividad.

Interviene en el cálculo de pérdidas por radiación. Esta propiedad depende mucho del estado superficial, pudiendo variar, en el mismo metal, de 0.05 hasta 0.85. A continuación se dan valores típicos para varios metales:

TABLA 2.6: Emisividad de varios metales ⁽²⁰⁾.

Material	Emisividad
Cobre pulido a 20 °C	0.03
Cobre oxidado	0.73
Cobre negro oxidado	0.75
Aluminio brillante laminado	0.04
Acero brillante a 150 °C	0.13
Acero moldeado a 100 °C	0.80
Acero fuertemente oxidado	0.85
Acero refractario oxidado	0.64

2.1.5 HORNOS DE INDUCCIÓN DE CRISOL.

El horno consta de una bobina inductora de forma cilíndrica que se reviste interiormente de un material refractario, dejando espacio para el crisol donde se funde la carga. Este conjunto va dispuesto dentro de una estructura metálica de gran rigidez. En hornos de capacidad reducida, como el que está instalado en el laboratorio, la estructura metálica es amagnética (aluminio, latón). En hornos de gran capacidad, la estructura metálica es de acero, lo que implica la instalación de núcleos magnéticos que recojan el flujo magnético desde el exterior para evitar calentamientos en la estructura.

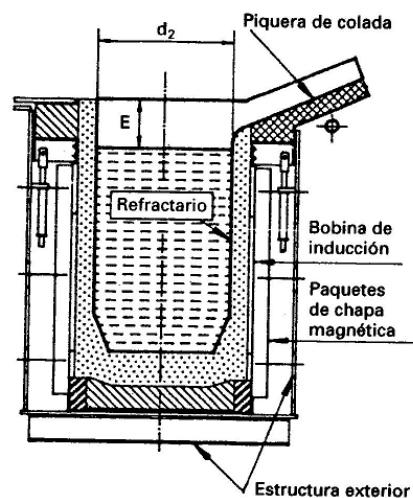


FIGURA 2.6: Esquema de horno de inducción.

La corriente eléctrica aplicada a la bobina puede ser de frecuencia de red (50 Hz) y de media frecuencia (150 a 3000 Hz). Frecuencias mayores son muy escasas a nivel industrial. La capacidad del horno varía desde 0.2 Kg de aluminio hasta 50-60 Ton de acero o bronce, pudiéndose llegar a las 100 Ton.

2.1.5.1 Capacidad y frecuencia.

Se aplica el concepto de profundidad de penetración, por lo que se supone que el diámetro de la carga fundida debe ser varias veces superior el valor de dicha profundidad. El factor de multiplicación está en relación directa con el rendimiento eléctrico que se quiera conseguir. En equipos de media frecuencia, el transformador principal se conecta a través de un convertidor cuyo rendimiento es de 94 a 97%, por lo que el factor de multiplicación es del orden de 5 a 10. El material de la carga también influye en este factor, debido a los valores de resistividad, y si ésta es baja (Cu o Al) el factor se eleva.

Para llegar a la fusión, es necesario que las piezas individuales de la carga tengan un tamaño suficiente, de acuerdo a las anteriores consideraciones, aunque el espesor puede bajar hasta 3 veces la profundidad de penetración. Basta con medidas en dos dimensiones. Para una frecuencia de 1000 Hz se recomienda 10 mm para aceros y fundiciones, 4 mm para Cu, 7 mm para latones y 5 mm para Al. Esto demuestra que se puede fundir virutas pero se recomienda (dada por el fabricante) que el pie de colada no debe ser inferior al 30% de la capacidad del crisol. Además queda definida que la relación altura/colada es de 1.5, se define la capacidad mínima del horno en función de la frecuencia, lo que implica también la potencia transmitida a la carga.

2.1.5.2 Agitación electromagnética.

La corriente eléctrica inducida en la carga es paralela y de sentido inverso a la corriente de la bobina inductora, por lo que se produce una fuerza de repulsión entre ambas. Esta fuerza se ejerce sobre el metal fundido dando lugar a la formación de un menisco y la aparición de una fuerza metalostática para compensar la fuerza electromagnética. Este menisco se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$h = 3.22 \cdot 10^{-5} \frac{P_s}{\delta} \sqrt{\frac{1}{\rho \cdot f}} \quad (\text{m})$$

Donde:

- P_s = potencia específica (W/m^2)
- δ = densidad (Kg/m^3)
- ρ = resistividad ($\Omega \cdot \text{m}$)
- f = frecuencia (Hz)

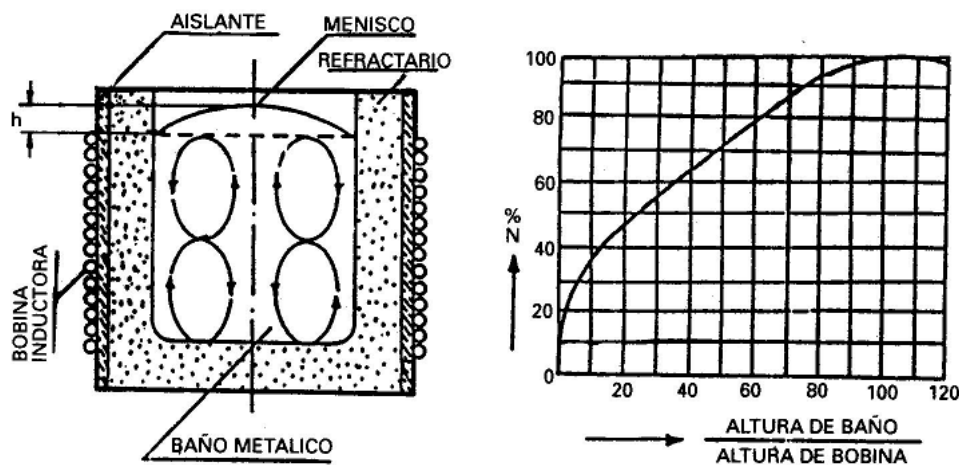


FIGURA 2.7: Esquema y utilización de la potencia del horno en función del nivel de llenado con hierro fundido ⁽²¹⁾.

La agitación puede interesar para introducir carga ligera o adiciones de baja densidad como grafito o carburo. Es necesaria poca agitación cuando hay oxidación de la colada como en los aceros inoxidable. En los hornos de media frecuencia el circuito resonante del horno se adapta a las condiciones variables de la carga, por lo que es posible aplicar potencia nominal durante todo el periodo de fusión.

2.1.5.3 Relación entre capacidad, potencia y frecuencia.

Capacidad y frecuencia relacionadas con profundidad de penetración y agitación electromagnética llevan a definir valores de potencia específica en función de la capacidad para diferentes frecuencias. Para aceros y fundiciones, para una frecuencia de 1000 Hz, una capacidad de 0.2 a 2 Ton se emplea 1300

KWh/Ton. La potencia del horno viene determinada por la producción requerida en Ton/h, el consumo específico medio en KWh/Ton, y el factor de utilización de la potencia que depende del tipo de chatarra, tiempos muertos de carga y descarga, adiciones, mediciones y análisis, colada, limpieza. Con la potencia requerida y la potencia específica máxima se determina para cada frecuencia la capacidad mínima del crisol. Se introduce el concepto de agitación de la colada para conseguir una uniformidad de temperatura y composición y facilitar la absorción de material menudo como virutas. El factor de agitación es función de la potencia, la capacidad mínima y máxima se determina a partir de los coeficientes de agitación correspondientes a cada metal y tipo de chatarra.

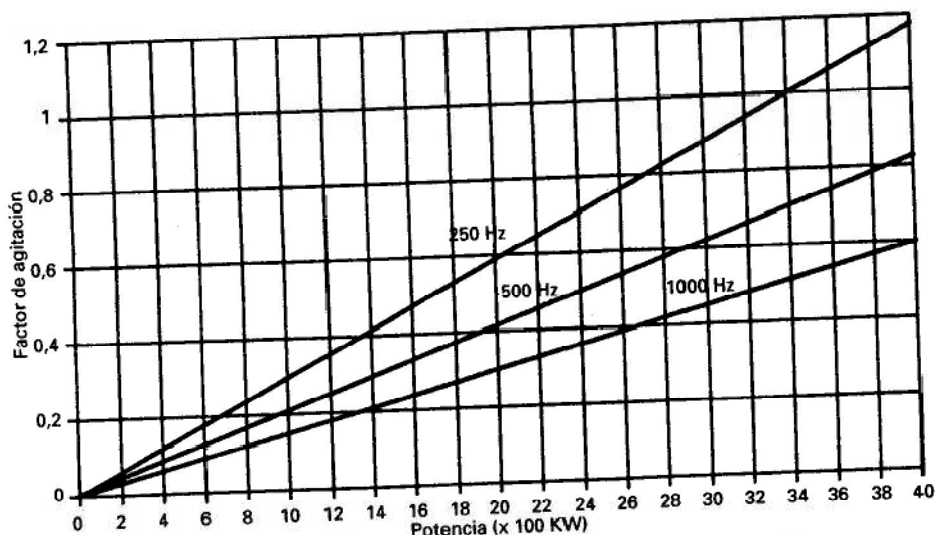


FIGURA 2.8: Potencia y factor de agitación en media frecuencia⁽²²⁾.

Para calcular las capacidades máxima y mínima se divide el factor de agitación correspondiente a la potencia en una frecuencia dada, para la gama recomendada por el fabricante. A continuación se muestra en una tabla los valores sugeridos por fabricantes:

TABLA 2.7: Coeficientes de agitación y tipo de chatarra⁽²³⁾.

Metal	Gama recomendada
Acero	0.06-0.125
Fundición gris	0.125-0.2
Fundiciones aleadas	0.1-0.15
Bronce	0.07-0.125
Aluminio y aleaciones	0.05-0.2

2.2 REVESTIMIENTOS Y REFRACTARIOS.

Un material refractario es aquel capaz de resistir las condiciones del medio en el que está inmerso sin alteraciones importantes en sus propiedades físico-químicas, durante un período económicamente rentable. Las condiciones del medio no incluyen únicamente el efecto de la temperatura, sino también la resistencia al ataque por material fundido, al choque térmico y, en general, todas aquellas sollicitaciones a la que vaya a estar sometido el material en servicio. Existen diversos criterios de clasificación de los materiales refractarios, atendiendo a su forma estos se clasifican en conformados y no conformados.

Los refractarios se dividen en cuatro grupos: ácidos, básicos, neutros y especiales con base a su comportamiento químico.

- Refractarios ácidos. Incluyen la arcilla de sílice, de alúmina y refractarios de arcilla. El sílice puro a veces se utiliza para contener metal derretido. Los refractarios de arcilla por lo general son relativamente débiles, pero poco costosos. Contenidos de alúmina por arriba del 50% constituyen los refractarios de alta alúmina.
- Refractarios básicos. Varios refractarios se basan en el MgO (magnesita o periclase). El MgO puro tiene un punto de fusión alto, buena refractariedad, buena resistencia al ataque por el entorno que a menudo se encuentra en los procesos de fabricación de acero. Típicamente, los refractarios básicos son más costosos que los refractarios ácidos.
- Refractarios neutros. Normalmente incluyen la cromita y la magnesita, pueden ser utilizados para separar refractarios ácidos de los básicos, impidiendo que uno ataque al otro.
- Refractarios especiales. El carbono, el grafito, es utilizado en muchas aplicaciones refractarias, particularmente cuando operan en atmósfera no oxidante. Estos materiales refractarios incluyen la circonita (ZrO_2), el circonita ($ZrO_2 \cdot SiO_2$) y una diversidad de nitruros, carburos y boruros.

Presentación del material refractario:

- Cemento refractario.
- Mortero refractario. Se utiliza como material de agarre, revestimiento de paredes, y para las juntas entre hiladas de ladrillo refractario.
- Ladrillo refractario: El ladrillo refractario tiene sus caras lisas, lo que disminuye la adherencia con el mortero, resiste bien las altas temperaturas y la abrasión, es buen aislante térmico y es relativamente caro.

2.2.1 ENSAYOS APLICABLES A MATERIAL REFRACTARIO.

Los ensayos que se aplican a materiales refractarios son los siguientes, y de acuerdo a normas establecidas por ASTM ⁽²⁴⁾.

TABLA 2.8: Tipos de ensayos ASTM.

TIPO DE ENSAYO	NORMA APLICADA
Clasificación	ASTM C-401
Cono pirométrico equivalente (PCE)	ASTM C-24
Agua de preparación	ASTM C-860
Densidad volumétrica	ASTM C-134
Módulo de ruptura en frío	ASTM C-133
Resistencia a la compresión en frío	ASTM C-133
Cambio lineal permanente	ASTM C-401 / C-865

2.3 MANTENIMIENTO PREVENTIVO DE CRISOLES Y MATERIAL REFRACTARIO.

El mantenimiento del horno presenta los siguientes condicionamientos:

- Una excesiva elevación de temperatura, debida a mal funcionamiento de la regulación, puede destruir el interior del horno con la carga correspondiente en muy poco tiempo.

- La falla de elementos mecánicos no es fácilmente previsible debido a varios factores como temperatura, corrosión interna, tensiones mecánicas cíclicas, etc.
- Una parada por falla en el funcionamiento que requiera reparación interior lleva un periodo de tiempo considerable.

Un plan de mantenimiento preventivo programado (MPP) debe tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- Verificación periódica de la estanqueidad de los componentes del sistema de enfriamiento, así como de sus órganos de potencia, almacenamiento y acometida.
- Deterioro del revestimiento interno debido a calentamientos y enfriamientos a alta velocidad que originan grietas y que suponen menor aislamiento efectivo, mayor temperatura del sistema de enfriamiento y mayores pérdidas de calor. Una medición periódica y programada de la temperatura del sistema de enfriamiento, en relación a la temperatura ambiente, da una indicación valiosa del estado del revestimiento.
- Revisión periódica y programada de los componentes del sistema eléctrico y electrónico del horno, apriete mecánico de los componentes y cables y control de temperatura del circuito.
- Revisión periódica de los intercambiadores de calor existentes, equipos de regulación y de medición.
- Finalmente, calibración periódica de accesorios tales como termocuplas de inmersión, manómetros, termómetros y electroválvulas, revisión y calibración de los circuitos de control.

2.3.1 INSPECCIÓN DEL MATERIAL REFRACTARIO DEL HORNO.

Para la inspección del crisol se ha elaborado una tabla de análisis modal de falla y efecto (AMFE), que se muestra a continuación.

TABLA 2.9: Análisis modal de falla y efecto para el crisol del horno de inducción.

TIPO DE FALLA	EFEECTO	MODO DE FALLA
Desgaste irregular	Producción de puntos calientes	Movimiento de sólidos en la colada.
	Erosión del crisol por tensiones termo mecánicas.	Enfriamiento repentino seguido de calentamiento rápido.
Descascarado	Depósito de metales.	Contenido de impurezas que reaccionan con el crisol.
	Hinchamiento.	Existencia de plomo en la chatarra y/o depósitos metálicos en el crisol.
Corrosión.	Baja resistencia a la corrosión.	Bajo o mal enfriamiento.
	Erosión.	Oxidación del refractario por alta temperatura.
Agrietamiento	Inclusión de metales en grietas.	Colada fría calentada rápidamente a alta temperatura.
		Golpes en el refractario caliente.

Con esta tabla se puede realizar el índice de prioridad de riesgo (IPR) que se detalla a continuación.

TABLA 2.10: Índice de prioridad de riesgo (IPR) para el crisol.

EFEECTO	FRECUENCIA	SEVERIDAD	DETECTABILIDAD	IPR	ACCION A TOMARSE
Puntos calientes	1	3	4	12	Extracción de sólidos de la colada
Erosión por tensión termo mecánica	1	5	5	25	Cambio de refractario.
Depósito de metal	2	3	2	12	Desoxidar la colada.
Hinchamiento	1	5	3	15	Cambio de refractario
Baja resistencia a corrosión	1	4	2	8	Mejorar el enfriamiento
Erosión	3	4	3	36	Cambio de refractario
Inclusión de metal	1	5	2	10	Reparación de grietas.
Grietas	2	5	4	40	Cambio de refractario.

Parámetros: 1. Bajo. 2. Medio bajo. 3. Medio. 4. Medio alto. 5. Alto.

Los IPR mayores a 15 entran en la planificación del MPP debido a que se consideran efectos de alto riesgo; efectos entre 8 y 15 son riesgos medianos y menores a 8 son riesgos pequeños, que son inexistentes.

Los riesgos altos son inevitables, el mantenimiento es importante y exige un paro. Los riesgos medianos son evitables, se puede realizar durante el proceso de fusión y no necesariamente producen un paro de larga duración.

2.3.2 COSTOS DE MANTENIMIENTO.

Entre los costos de mantenimiento constan los siguientes rubros:

1.- Inspección de rutina y mantenimiento previo:

- Retrolavado del filtro.
- Verificación del funcionamiento de la motobomba auxiliar.
- Verificación del estado del refractario del crisol.
- Verificación del circuito eléctrico de alimentación y sus protecciones.
- Verificación de los niveles de agua en el tanque y en el circuito interno.
- Verificación del funcionamiento de la bomba principal, torre de enfriamiento.
- Toma de lecturas de temperaturas de todo el circuito y contador de horas de uso del horno.
- Inspección de accesorios: teclé, termocuplas, recipientes y herramientas.

2.- Preparación del equipo en tiempos muertos:

- Vaciado y lavado del tanque de agua.
- Limpieza del crisol.
- Compra de insumos: agua destilada, refractario, repuestos eléctricos e hidráulicos.

3.- Reemplazos por desgaste:

- Protecciones eléctricas.
- Refractario del crisol.
- Tubería, válvulas y accesorios del sistema de enfriamiento.
- Bombas, filtros e intercambiadores de calor.
- Medidores de temperatura y presión.

- Herramientas y accesorios: para la fundición y para el moldeo.

4.- Gastos de conservación:

- Pintura.
- Arreglo de tanque y armario.
- Arreglo de pisos.
- Lubricantes para elementos mecánicos.
- Tratamiento de agua.

5.- Gastos varios:

- Limpieza de equipos.
- Recolección de basura.
- Ordenamiento de espacio.
- Trabajos experimentales.

2.4 SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO.

El equipo de fusión por inducción está enfriado por agua las bobinas o inductores, los cables de alimentación a la bobina, los componentes del generador de frecuencia (tiristores, reactancias de alisado y embarrado), condensadores y los transformadores de acople. Es un error grave bajar los costos del sistema de enfriamiento porque éste contiene los elementos de control y protección para asegurar el caudal y la temperatura adecuada de funcionamiento del horno. En un horno de crisol el equipo es más exigente.

En este sistema se considera un intercambiador de calor, de modo que el agua circula por todos los elementos en un circuito cerrado. Generalmente, la temperatura de trabajo de los tiristores es 40 °C, y un gradiente de 10 °C, por lo que la temperatura de trabajo es de 30 °C. Una distribución energética usual es 84% proviene del crisol, 4% de los conmutadores, 2% de los condensadores y 10% del convertidor de frecuencia. El horno del laboratorio tiene una torre de enfriamiento seca, es por lo tanto un circuito simple y económico. El intercambiador de calor forma parte de la torre y es independiente. El circuito

de agua de emergencia, usada en caso de falla eléctrica, consta de una motobomba, activada en forma manual y cuya capacidad es suficiente para una máxima interrupción.

2.5 PRUEBAS ELÉCTRICAS EN HORNOS DE INDUCCIÓN.

El procedimiento para efectuar pruebas eléctricas es el siguiente:

- Pruebas del circuito eléctrico de mando y señalización.
- Pruebas de accionamiento del interruptor principal.
- Verificación de fuentes de alimentación de las tarjetas electrónicas y sus niveles de tensión.
- Pruebas de funcionamiento de las protecciones de: 1) sobretensión de voltaje del inductor. 2) sobrecorriente del inductor. 3) sobrecorriente AC total. 4) sobrecorriente del inversor.
- Seguimiento y verificación de señales eléctricas con osciloscopio para las formas de onda, en todas las tarjetas electrónicas.
- Verificación del funcionamiento del rectificador AC/DC controlado por tiristores.
- Verificación del funcionamiento del circuito generador MF (inversor de media frecuencia), verificación de la frecuencia y presencia de pulsos de gate para los tiristores.
- Pruebas preliminares en vacío del horno, con potencia.

CAPÍTULO III

CLASIFICACIÓN DE CHATARRA.

3.1 CARACTERÍSTICAS DE LA CHATARRA DE ACERO.

Es una materia prima que ha aumentado su uso, especialmente en países que no poseen fuentes minerales o una industria siderúrgica plenamente establecida. Representa aproximadamente el 50% de la carga de los hornos Martin-Siemens, el 30% para convertidores y el 100% para hornos eléctricos. Se considera chatarra a piezas de acero que han dejado de cumplir la función para la que fueron creadas y que pueden ser re fundidas.

La chatarra lleva consigo otros materiales innecesarios e incluso nocivos para la calidad del acero, materiales por los que la acería paga a su proveedor como parte de la chatarra.

En efecto, en la chatarra se encuentran:

- a) Tierra, rocas, cemento, materiales que se incorporarán a la escoria. Además de pagar por ellos a precio de chatarra acarrear las siguientes consecuencias:
 - Hay un aumento en la cantidad de energía empleada (hasta de 800-900 Kwh/Ton) para fundirlos.
 - Igualmente se necesitan unos 500 Kg de cal/Ton de tierra para mantener el Ph básico de la escoria.
 - La aportación de esta energía supone alargar el proceso de fusión, con lo cual la operación aumenta no solamente los costos de energía y cal sino también todos los costos fijos (amortización, mano de obra, etc.).
- b) Metales como el Cu, Sn, Zn, Pb, que aparecen en el análisis del acero y que perjudicarán la calidad, precisan para su fusión una cantidad de energía diferente para cada metal, disminución de la productividad y sus costos fijos inherentes.
- c) Plásticos, trapos, maderas, gomas, materiales que generan humos, gases, olores, pero que aportan energía en su combustión.

Al contar con una instalación de limpieza de chatarra se ha llegado a cifras que, en promedio representa la cantidad que estos materiales contaminantes, influyen en el costo de fabricación.

Por cada 1% de mejora en el rendimiento de la chatarra se obtiene:

- Disminución de 2 Kg de cal/Tonelada de palanquilla.
- Disminución de 10 Kwh/Tonelada de palanquilla.
- Aumento de productividad que corresponde a esta energía disponible.
- Mejora en calidad del acero por descenso de residuales,
- Repercusión que en mayor o menor grado en el precio de compra de la chatarra.

Para ello, la chatarra es sometida a unos severos controles e inspecciones por parte del fabricante de acero, tanto en su lugar de origen como en el momento de la recepción del material en fábrica. La calidad de la chatarra depende de tres factores:

- Facilidad de ser cargada en el horno.
- Comportamiento de fusión (densidad, tamaño, espesor, forma, etc.).
- Composición, siendo fundamental la baja presencia de elementos residuales que sean difíciles de eliminar en la operación.

Atendiendo a su procedencia, la chatarra se puede clasificar en tres grandes grupos:

- a) Chatarra reciclada: formada por despuntes, rechazos, etc. originados en industrias relacionadas con la siderurgia. Se trata de una chatarra de excelente calidad.
- b) Chatarra de transformación: producida durante la fabricación de piezas y componentes de acero (virutas de máquinas herramientas, recortes de prensas y guillotinas, etc.).
- c) Chatarra de recuperación: suele ser la mayor parte de la chatarra que se emplea en la acería y procede del desguace de edificios con estructura de acero, plantas industriales, barcos, automóviles, electrodomésticos, etc.

3.2 PROCESAMIENTO DE LA CHATARRA DE ACERO.

Los controles a los que se somete la chatarra se producen en tres niveles:

- 1) Inspección en origen por parte de personal especializado.
- 2) Inspección visual en el momento de la descarga en puerto para material importado.
- 3) Control de recepción en fábrica de forma exhaustiva por unidad de transporte, con independencia de la procedencia del material (nacional o importado), con el fin de eliminar todo elemento nocivo, materias explosivas o inflamables, material radiactivo, así como de todos aquellos metales no férreos, tierras, cuerpos extraños, etc.

La limpieza del material incluye la ausencia de elementos indeseables como el azufre, el zinc que se volatiliza y se oxida con una condensación posterior y daña los materiales refractarios. También el plomo que se filtra a través del fondo de los hornos y los destruye; el estaño y cobre que afectan a la calidad del acero.

Existen varios criterios para clasificar la chatarra. Un criterio es clasificarla de acuerdo a su procedencia.

- La chatarra de recuperación es la que contiene más elementos residuales, debido a que contienen alambres de cobre, zinc en los protectores anticorrosivos, plomo y estaño como soldaduras, y el azufre de partes plásticas y cauchos adheridos. Para eliminar el plomo, zinc y estaño se calienta la chatarra hasta una temperatura de 500°C y se la recupera durante el escurrimiento de la misma. Plásticos y cauchos se eliminan durante el proceso de fusión, aunque emiten humos difíciles de captar y neutralizar, pero que ayudan en la fusión.
- La chatarra de transformación que sale de operaciones de maquinado, generalmente está contaminada con líquidos lubricantes para corte y que contienen azufre, pero se pierden fácilmente por oxidación en el proceso de fusión.

- La chatarra de reciclaje es de excelente calidad, porque se trata de material, tales como residuos de soldadura de estructuras metálicas, tanques, tuberías y carpintería metálica. No necesitan más que una limpieza de material adherido como tierra, cemento, plásticos y telas.

Para el procesamiento de la chatarra se la clasifica en grados de calidad. Por necesidades del laboratorio se presenta la siguiente clasificación de chatarra:

- Grado 1: chatarra de reciclaje, limpia y bien preparada. Incluye residuos de carpintería metálica y chatarra suelta de buena calidad como residuos de varillas, flejes, perfiles, planchas y alambres de acero. Elementos como clavos, tuercas y tornillería limpios.
- Grado 2: chatarra de recuperación de gran tamaño con re fusión para eliminar residuales, procedente de calderos, partes automotrices, recipientes a presión usados y acero esmaltado. Núcleos de maquinaria eléctrica y tubería de acero en general.
- Grado 3: fragmentos de las mismas fuentes con contaminantes adheridos.
- Grado 4: chatarra de transformación suelta, no prensada y con posibles contaminantes.
- Grado 5: chatarra de origen y material desconocido pero responde al magnetismo causado por un imán. Puede ser fundición gris.
- Grado 6: chatarra de material no ferroso como aluminio, cobre, bronce, plomo, latón y otras aleaciones.

En la clasificación de grado 1 se separa en aceros aleados y no aleados. Esto se produce para la utilización de elementos aleantes como cromo, níquel y molibdeno. Se recomienda una subclasificación para la chatarra de grado 6 en sus respectivas especies o tipos.

Se requiere un control constante de la calidad de la chatarra para evitar una fusión fuera de especificación. Además, es necesario una adecuada manipulación al cortarla y ordenarla en pacas, con la respectiva identificación

del grado de calidad y peso. Estas pacas deben ser del tamaño adecuado para que quepan en el horno, para lo cual se recomienda el uso de herramientas de corte o si el caso lo requiere el uso de oxicorte para piezas grandes. El operario debe conocer las medidas del horno y la tolerancia necesaria.

3.2.1 CLASIFICACIÓN DE CHATARRA SEGÚN LA NORMA INEN NTE 2505:10⁽²⁵⁾.

El objeto de esta norma son los requisitos para recolectar, almacenar, limpieza y clasificación de chatarra metálica ferrosa.

En el alcance se menciona que se aplica al proceso de fundición.

3.2.1.1 Clasificación.

Esta norma establece clasificaciones A, B y C; tipos de pacas; chatarra de hierro fundido.

Clase A: acero al bajo carbono o chatarra de acero (perfiles, planchas, tubería, naval, restos de maquinaria industrial agrícola o caminera, varillas de construcción) de espesor menor a 3 mm en piezas individuales, no mayores a 400 mm de lado, densidad máxima de 800 Kg/m³.

Clase B: chatarra preparada para oxicorte. Chatarra de las mismas características anteriores, con espesor mayor a 3 mm, dimensiones mayores a 400 mm, densidad máxima 500 Kg/m³.

Clase C: chatarra preparada para compactación. Acero de bajo carbono o chatarra de acero (hojalata, viruta, alambre, alambrón, chapa delgada) de espesor menor a 3 mm. No incluye material estañado, porcelanizado, esmaltado o emplomado.

Pacas tipo 1: paca prensada de desperdicio de chapa nueva de acero de bajo carbono, libre de aleaciones y exenta de pintura y otros recubrimientos. La paca debe medir 500 mm por lado, densidad media de 800 Kg/m³.

Pacas tipo 2: paca prensada de chapa vieja de acero proveniente de carrocerías automotrices, lata negra, lata pintada, hojalata desteñida, galvanizada, alambres y resortes. No incluye material estañado, porcelanizado,

esmaltado, emplomado; libre de revestimiento no metálico. Incluye material químicamente tratado. Tamaño máximo de 500 mm por lado. Densidad media de 800 Kg/m³.

Pacas tipo 3: material similar a las pacas tipo 2. Incluye material esmaltado, porcelanizado, estañado, emplomado. Tamaño máximo de 500 mm por lado y una densidad media de 800 Kg/m³.

Chatarra de hierro fundido tipo 1: hierro colado (bloques de cilindros, carcasas de motor, cajas de cigüeñal, bancadas de maquinaria) limpia, libre de grasa y materiales no ferrosos. Tamaño menor a 500 mm por lado.

Chatarra de hierro fundido tipo 2: las mismas características del tipo 1, pero con medidas mayores a 500 mm de lado.

3.3 DISCONFORMIDADES Y DUDAS.

Se entiende por disconformidad cuando un elemento no cumple con los requerimientos impuestos por una norma o política aplicada a un proceso. En el caso de la chatarra son disconformidades la presencia de óxidos, elementos no limpios de sustancias adheridas, presencia de contaminantes líquidos o sólidos, material de acero aleado, material no ferroso, presencia de elementos residuales como plomo, estaño y cinc.

Se entiende por duda cuando no se ha establecido el tipo de disconformidad. Para este caso las dudas más frecuentes serán el tipo de material (si es ferroso o no); el origen que es desconocido para clasificarla de acuerdo a su procedencia; y la confusión entre acero y fundición gris.

3.3.1 RESOLUCIÓN DE DISCONFORMIDADES.

Para resolver una disconformidad se aplican acciones para que el material sea semejante a la clasificación adecuada. Se aplicará el criterio adecuado para ubicar a la chatarra adquirida dentro de los parámetros de clasificación de la norma aceptada. A continuación se detalla una serie de disconformidades presentes en la chatarra y las acciones recomendadas para la limpieza y adecuada clasificación de la chatarra.

TABLA 3.1: Guía de disconformidades y acciones recomendadas.

DISCONFORMIDADES	ACCIONES RECOMENDADAS
Presencia de óxidos	<ul style="list-style-type: none"> • Observar el grado de corrosión
Sustancias adheridas:	
<ul style="list-style-type: none"> • Pinturas y anticorrosivos • Cemento y rocas • Plásticos, cauchos y telas • Alambres de cobre • Soldadura brazing (Pb, Sn, Zn) 	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicación de flama directa • Limpieza con cepillo metálico • Ninguna • Despegue y/o recorte • Precalentar a 500°C.
Presencia de contaminantes:	
<ul style="list-style-type: none"> • Líquidos lubricantes para corte • Grasas y aceites 	<ul style="list-style-type: none"> • Limpieza con detergente • Ninguna
Materiales:	
<ul style="list-style-type: none"> • Acero aleado • Fundición gris y similares • Material no ferroso 	<ul style="list-style-type: none"> • Clasificar aparte • Clasificar aparte • Clasificar aparte

3.3.2 RESOLUCIÓN DE DUDAS.

Para resolver una duda, se toma una acción y se observa el resultado. Este resultado da un criterio de clasificación. Si el material es no ferroso se clasifica como grado 6. Otro criterio de clasificación es medir la densidad, para lo cual se necesita un recipiente aforado para medir el volumen desplazado por una muestra sumergida en otro recipiente completamente lleno; la muestra debe ser previamente pesada. La densidad determina el tipo de material de la chatarra; si es acero corresponde al grado 2, si no lo es corresponde al grado 6. Y finalmente, para despejar la duda si es acero o fundición gris, se determina cualitativamente la resistencia al impacto, causado por un objeto pesado; si se dobla se clasifica como grado 2, si no es clasificada como grado 5.

3.3.3 MATERIALES CONTAMINANTES.

Se considera material contaminante en la chatarra de material ferroso a aleaciones residuales, cromo, caucho, cemento, madera, material refractario, óxido de hierro en cantidad excesiva, piedra, plásticos, tierra, vidrio, no ferrosos (cobre, cinc, estaño, aluminio, bronce, plomo, acero inoxidable austenítico).

3.3.4 ELEMENTOS INDESEABLES.

Son los siguientes: alambre con recubrimiento plástico, amortiguadores sellados, baterías o acumuladores, chatarra electrónica, chatarra en sacos, envases de plaguicidas, explosivos, faros halógenos, filtros de combustible y

aceite, lana de vidrio y aislantes térmicos, poliuretano, PVC, recipientes cerrados, silenciadores y catalizadores, tubos de escape, transformadores.

3.3.5 GUÍA DE DUDAS.

TABLA 3.2: Guía de dudas, acciones a tomarse y resultado observado.

DUDA	ACCION A TOMARSE	RESULTADO OBSERVADO
Tipo de material <ul style="list-style-type: none"> • Ferroso • No ferroso 	Aplicación de un imán	<ul style="list-style-type: none"> • Atracción magnética • Ninguna atracción.
Origen <ul style="list-style-type: none"> • Clasificación no determinada 	Determinación de la densidad del material.	Clasificar el material de acuerdo a la densidad calculada.
Acero o fundición gris: <ul style="list-style-type: none"> • Acero • Fundición gris 	Determinación cualitativa de la resistencia al choque.	<ul style="list-style-type: none"> • Se dobla • Se fractura

A continuación se muestran densidades de materiales metálicos empleados en el laboratorio:

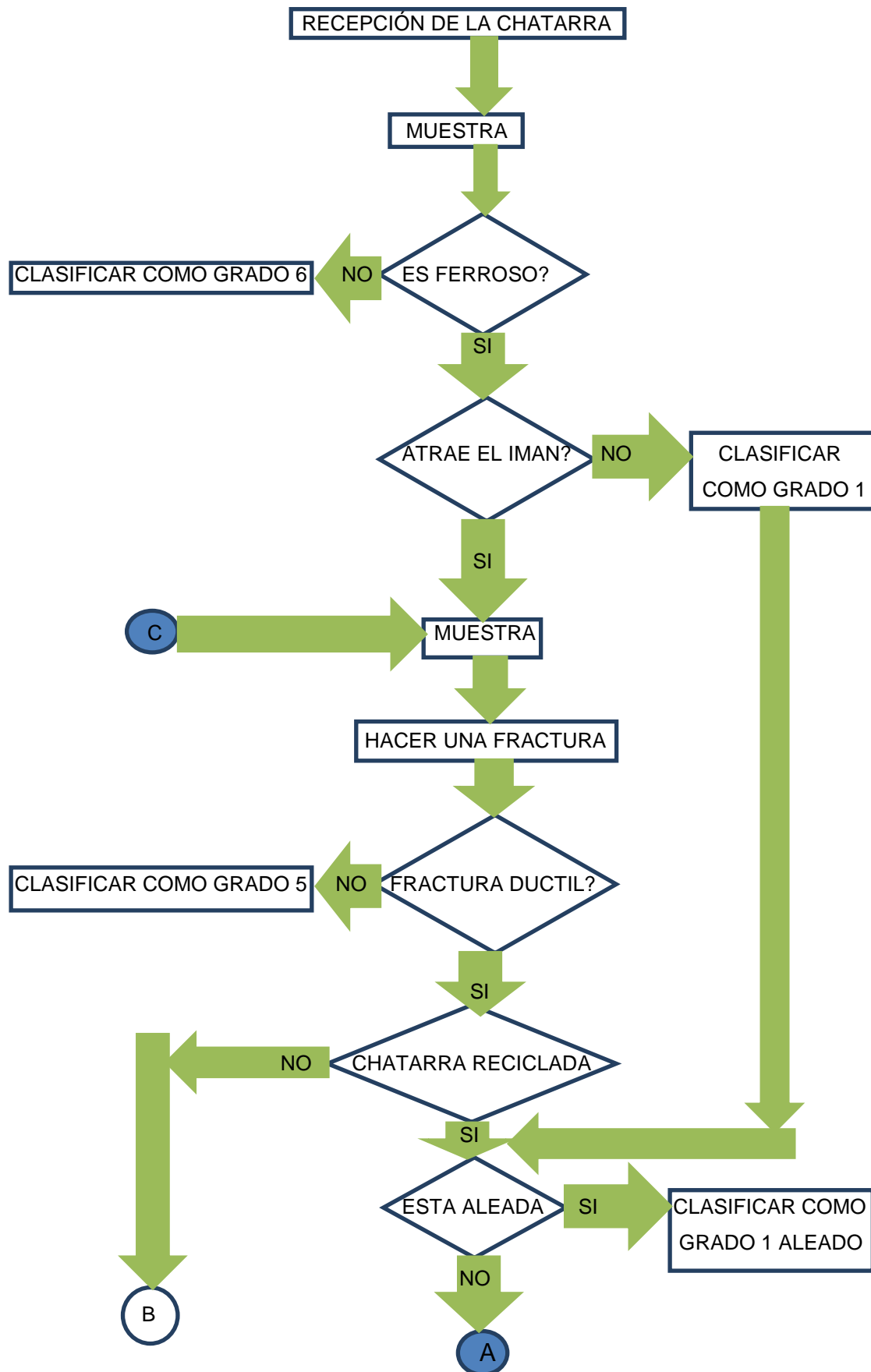
TABLA 3.3: Densidades de especies metálicas empleadas en el Laboratorio de Fundición ⁽²⁶⁾.

MATERIAL	DENSIDAD (Kg/m ³)	PUNTO DE FUSION (°C)	DUREZA BRINELL (HB)
Fundición gris	7604	1390 a 1420	140 a 250
Aceros	7850	1535	110 a 220
Latón (Cu-Zn)	8400 a 8700	800 a 1000	
Cobre	8960	1080	
Bronce	8900	830 a 1020	70 a 200
Aluminio	2700	660	
Zamak (Zn-Al-Mg-Cu)	6600	386	
Plomo	11400 a 16000	327	
Estaño	7310	233	
Zinc	7140	420	

3.4 DIAGRAMA DE FLUJO.

La norma INEN no especifica el origen y da prioridad al tamaño de la chatarra, mientras que la clasificación propuesta tiene como fundamento la composición química de la chatarra de acuerdo al origen de la misma. Es por eso que en el diagrama de flujo mostrado se clasifica la chatarra por su origen, porque en trabajos de laboratorio se necesita tener insumos plenamente identificados.

Se propone el siguiente diagrama de flujo:



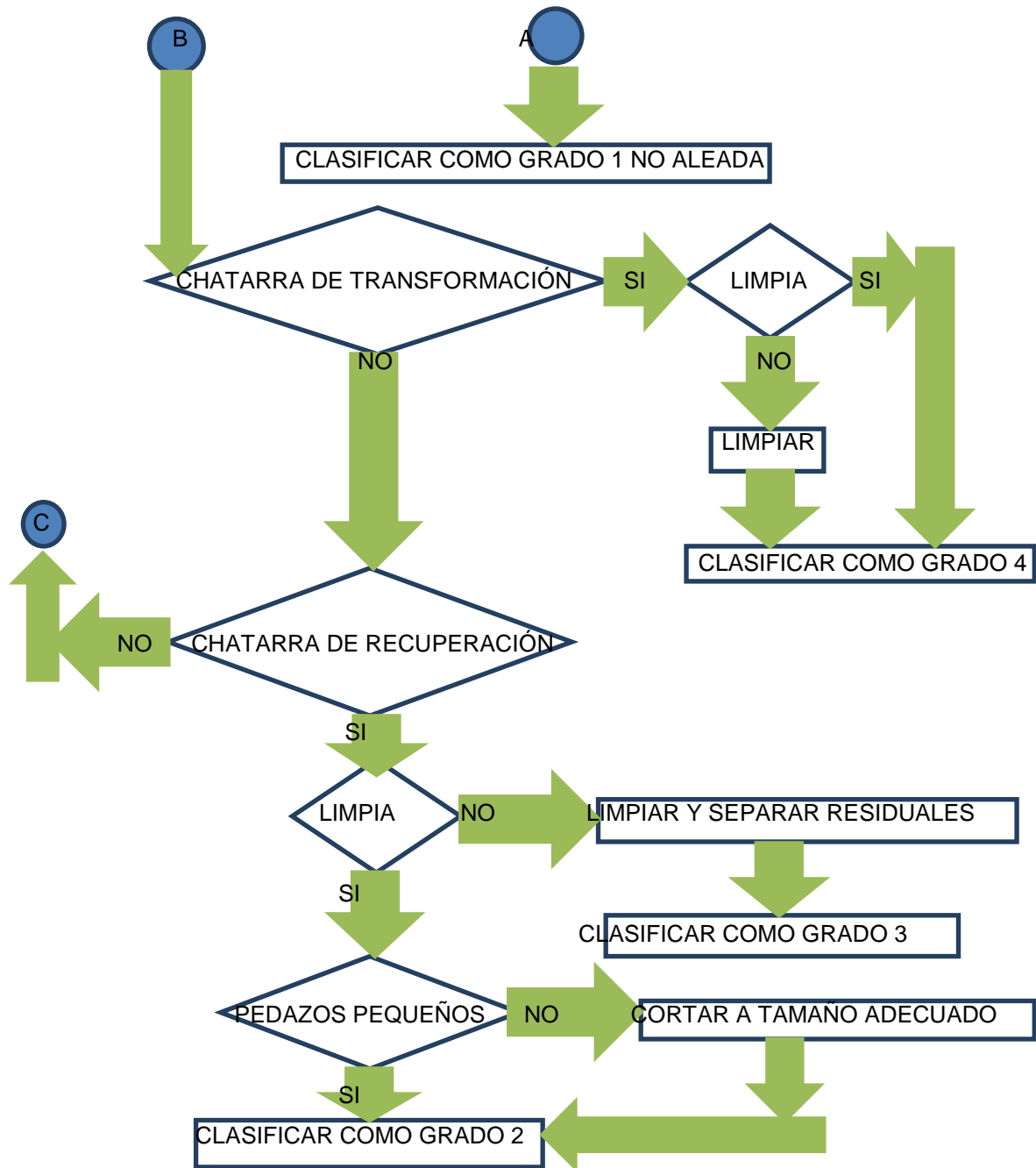


FIGURA 3.1: Diagrama de flujo para clasificar chatarra.

CAPÍTULO IV

INSUMOS Y EQUIPOS

4.1 REACTIVOS QUÍMICOS.

4.1.1 FUNDENTES.

Los fundentes tienen por misión hacer fusible la carga metálica y formar una escoria líquida, que flote por encima de la fundición y que sirva como depurador y protector. El fundente está compuesto, en general, por arcillas, algunas veces acompañadas de sílice y carbonatos. La selección de fundentes es un problema químico, debido a que la composición de la carga determina la del fundente que más conviene utilizar. Si la carga tiene exceso de silicio o elementos ácidos, entonces los fundentes deben ser básicos; y puede ocurrir que la carga contenga elementos básicos, se añada fundentes ácidos para la escorificación de la colada. La sílice es la única sustancia que puede calificarse como ácida, utilizándose como arena, grava o cuarzo. En los procesos siderúrgicos ácidos, rara vez se añade sílice, ya que la necesaria se toma del revestimiento de los hornos. Se usa sílice en el caso que haya exceso de cal. Los fundentes básicos principales son la caliza y la dolomita. Los fundentes neutros se añaden para hacer más fluidas las escorias y no tienen actividad química en los lechos de fusión. El más comúnmente usado es el espato flúor o fluorita. La cal puede emplearse en forma de carbonato (piedra caliza o mármol) o como cal viva, nunca como cal apagada porque se adiciona hidrógeno a la colada. Debe ser pura y si es posible libre de fósforo y azufre. Una cal para acería debe tener la siguiente composición:

TABLA 4.1: Composición de cal para acería.

CaO	90%	MgO	1%
CO ₂	3%	S	0.1%
SiO ₂	1.5%	P	trazas
Fe ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃	1%		

La razón de emplear cal viva en preferencia a la caliza es por la razón de que para transformar la caliza en cal viva en el horno, se consume un kilovatio-hora por cada kg de cal, y además porque el desprendimiento del CO₂ ocasiona la

formación de una atmósfera oxidante que si bien no tiene importancia en la fase oxidante sí la tiene en la reductora, porque alarga este periodo y consume más energía y exige más desoxidación.

4.1.2 FERROALEACIONES⁽²⁷⁾.

Estos aditivos sirven para mejorar la colada, sea más uniforme y de calidad superior. Pueden obtenerse mejores propiedades mecánicas y mejor resistencia a la corrosión de las piezas fundidas. Mediante las ferroaleaciones se consigue eliminar las impurezas en el momento de la colada, con una desgasificación y desoxidación. Se tienen los siguientes aditivos o ferroaleaciones:

- *Ferroaluminio*. Contiene aluminio de 45 a 50%. El aluminio metálico se usa en la fusión de aceros en dos clases. La clase 1 contiene 98 a 99%, y la clase 2 contiene de 94 a 98% de aluminio puro, exento de impurezas que perjudiquen la aleación con el hierro o acero.
- *Ferrocromo*. Contiene 66 a 72% de cromo. Se clasifica por unidades de carbono. Hay de carbono alto y bajo. Se dispone de ferrocromo alto en carbono y siete clases de ferrocromo bajo en carbono, aumentando el costo al disminuir el carbono. El ferrocromo de alto carbono se obtiene fundiendo eléctricamente cromita y agente reductor carbonoso. El ferrocromo de bajo carbono se funde cromita con un agente reductor metálico como aluminio o silicio.

TABLA 4.2: Composición química de ferrocromo.

Elemento	Carbono alto	Carbono bajo
Cromo	66 a 70%	66 a 72%
Carbono	4 a 6%	2, 1, 0.5, 0.2, 0.15, 0.1 y 0.06%
Silicio	1.7%	0.7%
Fósforo	0.01%	0.03%
Azufre	0.1%	0.01%
Manganeso	0.3%	0.3%
Cobre	0.01%	0.02%

- *Ferromanganeso*. Las unidades tipo contienen de 78 a 82% de manganeso con 6 a 7% de carbono. Si el carbono elevado presenta

dificultades se emplean ferroaleaciones con menor contenido de carbono. Las de clase medio contienen 1.5% de carbono máximo y 1.5 a 2.5% de silicio. Las unidades de carbono bajo contienen 0.1, 0.15, 0.3, 0.5 y 0.75% de carbono con 1% de silicio.

- *Fosfomanganeso*. Es un ferromanganeso que contiene un porcentaje alto de fósforo. El contenido es 72.2%Mn, 10.63%P, 14.64%Fe, 2.43%C y 0.1%Si.
- *Silicocalcio*. Es un producto de horno eléctrico y se utiliza como desoxidante del acero. Su composición es 66.98%Si, 0.056%P, 27.5%Ca, 2.31%Al, 0.41%Fe y una humedad que no debe superar el 0.13%. Además es agente desulfurante.
- *Silicomanganeso*. Es una aleación combinada de silicio, manganeso, hierro y carbono. Se fabrica en cuatro clases diferentes.

TABLA 4.3: Composición química de silicomanganeso.

Silicio	Carbono	Manganeso
12 a 14%	3% máximo	65 a 70%
14 a 18%	2.5% máximo	65 a 70%
16 a 20%	2% máximo	65 a 70%
20 a 25%	1% máximo	65 a 70%

- *Silicon Spiegel*. Es el nombre dado a unas aleaciones que contienen menos manganeso que el silicomanganeso. Contiene raramente más del 30% de manganeso. Una composición típica es 25 a 30%Mn, 6 a 8%Si, 4.25%C y la diferencia en hierro.
- *Ferromolibdeno y molibdato de calcio*. Se emplean para introducir el molibdeno en el acero. Para el ferromolibdeno se tiene una composición de 63.2%Mo, 0.026%P, 0.09%C, 0.1%S y 0.1%Si. Para el molibdato de calcio se tiene 43.2%Mo, 0.13%Si y el resto calcio.
- *Ferroníquel*. Se fabrica muy limitadamente. Una composición normal es 99.91%Ni, 0.4%Co, 0.01%Fe y 0.03%Cu.

- *Ferrofósforo*. Se emplea para aumentar el contenido de fósforo en la colada. Una composición típica es 21.4%P, 75.03%Fe, 0.07%Mn, 1.63%Si y 1.17%C.
- *Ferrosilicio*. Se emplea para introducir silicio en la colada. Una composición típica es 12.74%Si, 0.095%P, 0.087%Mn y 0.02%S y la diferencia es hierro.
- *Ferrotitanio*. Se utiliza para facilitar la soldabilidad de aceros inoxidables austeníticos, y se fabrica por aluminotermia. La composición es la siguiente: 26.97%Ti, 61.79%Fe, 6.45%Al, 0.92% alúmina, 2.43%Si, 1.61%Mn.
- *Ferrotungsteno o ferrowolframio*. Contiene 61.2%W, 33.02%Fe, 2.97%C, 0.47%Si, 1.88%Mn, 0.31%Al, 0.03%P y 0.03%S.
- *Ferrovandio*. Contiene 36%V, 0.6%Mn, 61.1%Fe, 0.2%C, 1.5%Si y 0.6%Al. Se obtiene por reducción del vanadato de hierro por el carbono en un crisol.
- *Ferrosiliciocirconio y circoniosilicio*. El ferrosiliciocirconio contiene 39 a 43%Si y 12 a 15%Zr. El circoniosilicio tiene de 47 a 52%Si y 35 a 40%Zr.
- *Ferrocobalto*. Contiene de 2 a 25%Co. Se emplea en aleaciones para imanes permanentes.

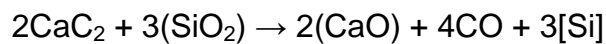
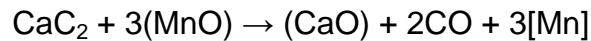
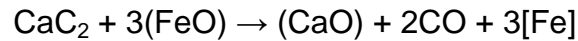
4.1.3 RECARBURANTES Y DESULFURANTES.

4.1.3.1 Desulfurantes.

El azufre se encuentra en el acero formando piritas, y su eliminación se realiza haciendo reaccionar metales o compuestos alcalinos. Se realiza en un ambiente reductor por lo que se utilizan compuestos con la parte básica reductora. Antes se utilizaba el carbonato de sodio, pero se eliminó porque se formaban gases peligrosos para la salud. Actualmente se utilizan la caliza o cal, el carburo de calcio y el siliciuro de calcio.

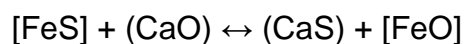
La cal es un agente fundente y desoxidante a la vez y se puede emplear en combinación con el carburo de calcio, que actúa como desulfurante.

En la fase reductora de acería el carburo de calcio reacciona con los óxidos según las siguientes ecuaciones:

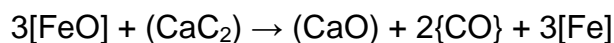


El CaO (cal) formado en esta reacción aumenta la basicidad del conjunto, viéndose reforzado este efecto por la eliminación de la sílice de la escoria. Adicionalmente, el CO formado en estas reacciones provoca el espumado de la escoria, aumentando el rendimiento energético.

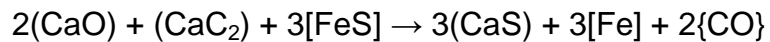
Gracias a la reducción a niveles bajos del FeO y MnO, el carburo elimina la principal fuente de oxígeno disperso en la colada, convirtiendo una escoria oxidante en reductora. Esta misma capacidad reductora del carburo confiere a la escoria la capacidad de disminuir el contenido de azufre en el acero. La desulfuración efectiva tiene lugar cuando el contenido de FeO en la escoria es menor que el 1 % y el oxígeno disuelto en el acero es menor que 15 ppm. Desde el momento en que el carburo de calcio aporta una escoria reductora necesaria para una buena desulfuración, se debe asegurar de que se tiene una escoria rica en cal con elevada capacidad desulfuradora junto con una buena agitación. Para alcanzar una desoxidación y desulfuración efectivas la escoria de carburo ayuda a obtener aceros más limpios y de mejor calidad. Al disminuir el contenido total de oxígeno del acero se reducen las inclusiones y poros, mejorando las características mecánicas. La reacción fundamental de la desulfuración es:



Es una reacción reversible que se desplaza hacia la derecha si se elimina alguno de los miembros de ese término, que serían el CaS (difícil de eliminar) o el FeO. Esto último supone que hay que implantar condiciones reductoras de trabajo, lo que se consigue con el carburo:



Es decir, la acción del carburo elimina el FeO, lo que provoca que al cesar las condiciones oxidantes la reacción de desulfuración se desplace totalmente hacia la derecha. Estas dos reacciones se pueden resumir:



El siliciuro de calcio se conoce también con los nombres de ferrosilicio-calcio, silicio-calcio o simplemente sica. Esta ferroaleación se emplea como desoxidante en la fabricación de aceros inoxidable, así como desulfurante. Además tiene la propiedad de fijar el nitrógeno disuelto en el acero y también eliminar el hidrógeno. Tiene otra ventaja, cual es la de producir una escoria muy fluida de silicato de calcio, en contraposición al ferrosilicio y aluminio que producen residuos sólidos.

4.1.3.2 Recarburantes.

El carbono se emplea en la segunda fase de la fabricación del acero como desoxidante o recarburante. En general es indiferente la clase de carbón, si bien hay que exceptuar la hulla, el lignito y la turba, pues los hidrocarburos que se desprenden por destilación pueden ceder hidrógeno al acero. Como la adición de carbón se hace siempre cuando ha terminado el período oxidante y por lo tanto no hay hervido de la colada, este hidrogeno no se puede eliminar ocasionando perjuicios al acero obtenido.

Para la desoxidación son buenos el coque y la antracita, pero para la recarburación es mejor el empleo de grafito. Teniendo en cuenta el contenido residual de silicio y aluminio, y estas impurezas pueden dar lugar a disminuir la basicidad de la escoria en hornos básicos. En los hornos ácidos tiene baja importancia, aunque un exceso de alúmina es perjudicial.

4.1.4 CÁLCULOS METALÚRGICOS⁽²⁸⁾.

Algunas adiciones deben hacerse en la cuchara de aceración, aunque el horno de inducción permite hacerlo, pero con riesgo de desgaste del material refractario. Estas adiciones permiten obtener la composición química pedida del acero. A todos los aceros se añade ferromanganeso excepto al llamado hierro dulce.

Los aleantes con energías libres de formación inferiores a las del hierro, cobre, níquel y molibdeno, normalmente se añaden al horno con la carga original o al

principio de la etapa de la refinación, en forma de óxidos o con chatarra que los contenga. Estos óxidos se reducen con el carbono y el hierro que se encuentra en el acero y la recuperación de estas adiciones es de 100% de la cantidad adicionada. Los demás elementos están sujetos a pérdidas por oxidación, entre más alto sea el contenido de oxígeno en el acero mayores serán las pérdidas. Por ejemplo, la recuperación del Mn metálico del ferromanganeso (78%Mn) puede ser del 85% cuando se añade a un acero de 0.45%C, pero solo del 70% cuando se añade a uno de 0.1%C. Como la aleación no es pura, la recuperación aparentemente calculada sobre la base del peso bruto, es la recuperación metálica multiplicada por el contenido del elemento en la aleación.

El peso del acero líquido al vaciar es el producto de la carga de chatarra por el rendimiento del horno, cifra obtenida por mediciones estadísticas. Los aceros de alto carbono tienen, en general, menores rendimientos que los de bajo carbono, debido a pérdidas por oxidación del hierro. Los elementos que se oxidan fácilmente y salen de la colada, o sea con alta energía de formación de sus óxidos libres (Si, Al, Ti, Zr) al vaciar tienen un contenido residual de cero. Unos cuantos (Nb, V) se oxidan fácilmente y se puede suponer que el análisis residual también sea cero, a menos que se los cargue en grandes cantidades. Otros se reparten entre la colada y la escoria como el manganeso y el cromo.

Las bases de los cálculos de adición son los siguientes:

- Carga metálica total x rendimiento del horno = peso de acero líquido.
 $CMT \times RH = PAL$.
- Peso de acero líquido x incremento requerido = peso bruto del aleante x contenido del elemento x recuperación del elemento. $PAL \times IR = PBA \times CE \times RE$. Sustituyendo PAL se tiene $CMT \times RH \times IR = PBA \times CE \times RE$.
- Cantidad de aleación requerida $GWA = PBA = \frac{CMT \times RH \times IR}{CE \times RE}$.
- Se define factor de fundición a $FF = \frac{RH}{CE \times RE}$ entonces la cantidad de aleante a adicionar será $PBA = \frac{CMT \times IR}{FF}$.

- La CMT es conocida, el IR se conoce con el análisis de la colada o de precolada. El FF se obtiene con la tabulación del rendimiento real, pero algunas veces se calcula.
- El metal recuperado = incremento realizado x peso real de colada. $MR = IR \times PRC$.
- Metal adicionado = peso bruto de aleación x contenido metálico de X. $MA = PBA \times CMX$.
- Recuperación metálica (%) = metal recuperado / metal adicionado. $RM (\%) = MR / MA$.

4.1.4.1 Comportamientos erráticos de ferroaleaciones.

- *Flotación.* Una porción de la adición que se fundió se junta y flota en la superficie del metal, no se distribuye uniformemente dentro del acero, lo que implica que el inicio de la vaciada es más bajo en contenido que el final de la misma cuando se absorbe el resto. Un análisis de la porción flotante puede indicar Mn, Si, P, Al y otros elementos. Un indicador típico es 0.87/ 0.95/1.02 Mn o 0.038/0.057/0.07 Al. La mayoría de la masa flotante se puede observar durante el vaciado, antes de añadir cal. Las vaciadas rápidas o extremadamente lentas provocan flotaciones.
- *Atenuación.* Causada por un volumen o una actividad muy alta de la escoria, que consume algunos elementos oxidables del acero. Un indicador es 0.37/0.26/0.13 Mn o 0.052/0.031/0.024 Al.

4.1.4.2 Carbono equivalente.

Un parámetro útil para evaluar la soldabilidad de los aceros es el concepto de carbono equivalente (CEQ). La soldabilidad de aceros es inversamente proporcional a una propiedad conocida como la templabilidad del acero, que mide la probabilidad de formar la martensita durante el tratamiento de soldadura o calor. La templabilidad del acero depende de su composición química, con mayores cantidades de carbono y de otros elementos de aleación resultando en mayor templabilidad y por lo tanto una soldabilidad menor. Este concepto permite comparar las soldabilidades relativas de diferentes

aleaciones al comparar sus propiedades con un acero al carbono simple. El efecto sobre la soldabilidad de elementos como el cromo y el vanadio, mientras que no es tan grande como la del carbono, es por ejemplo más significativa que la del cobre y el níquel. A medida que se eleva el contenido equivalente de carbono, la soldabilidad de la aleación decrece. La desventaja de usar simple carbono y los aceros de baja aleación es su menor resistencia debido a que hay una compensación entre la resistencia del material y la soldabilidad. Los aceros de alta resistencia y baja aleación fueron desarrollados especialmente para los usos en la soldadura durante los años 1970, y estos materiales, generalmente fáciles de soldar tienen buena resistencia, haciéndolos ideales para muchas aplicaciones de soldadura.

Una ecuación del carbono equivalente es $CEQ = \%C + 0.25 \%Mn + 0.25 \%Si$. Esta ecuación indica que, desde el punto de vista de la soldabilidad metalúrgica, el manganeso posee un poder templante cuatro veces menor que el carbono. En general, es necesario precalentar los aceros que contienen bastante manganeso y carbono, cuando el equivalente indica que desde el punto de vista de la soldabilidad metalúrgica, el manganeso respecto al carbono excede del 0,45%. La relación Mn/C puede constituir así mismo, un criterio de calidad de acero y de su comportamiento en lo que respecta a la soldadura, si bien hasta ahora no se ha determinado cual ha de ser el valor de esta relación, podemos pensar que debe ser por lo menos igual a 4 para que el manganeso desempeñe plenamente su papel.

Como regla general, un acero se considera soldable si el carbono equivalente, según la AWS, es menor a 0,4%. Este valor estaría indicando cómo los elementos de aleación presentes en el acero afectan las transformaciones características favoreciendo la formación de microestructuras susceptibles a fisuración por hidrogeno en la ZAC (Zona Afectada por Calor). El carbono equivalente provee una indicación del tipo de microestructura esperada en la ZAC en función de la velocidad de enfriamiento desde una temperatura máxima. Si bien resulta un parámetro atractivo para evaluar la soldabilidad de distintos aceros, por sí sólo no es suficiente. Primero debido a que la soldabilidad no es gobernada exclusivamente por la composición química del

acero siendo el espesor de la junta un factor a considerar en el momento de seleccionar temperaturas de precalentamiento y/o tratamientos térmicos post soldadura. La soldabilidad también se ve afectada por la historia térmica del material y tensiones mecánicas desarrolladas antes, durante y después de realizada la unión. También, posee un rol importante la adecuada elección del electrodo.

4.2 EQUIPOS Y ACCESORIOS.

Entre los principales equipos para monitorear la colada de acero, se tiene:

- Equipos de medición de temperatura.
- Equipos de medición de oxígeno disuelto.
- Equipos para trazadores radiactivos.
- Equipo para impulsar gas en la colada.
- Espectrómetros.

4.2.1 MEDICION DE TEMPERATURA DE LA COLADA.

La temperatura de la colada se puede medir con bastante exactitud, utilizando un termopar manual de inmersión, de alrededor de ± 6 °C (± 10 °F) de error. En el caso del acero, se debe usar un sistema de muy alto punto de fusión como los alambres del termopar de aleaciones de platino-rodio o uno de platino puro. Otro aparato que puede usarse es el termómetro infrarrojo, pero se leerá la temperatura de la superficie de la colada, pero no del interior. Más bien sirve para medir la chatarra precalentada que ha sido sometida para separar elementos residuales. Antes se usaba el pirómetro, que daba la temperatura de la superficie, por calibración de luz.

4.2.2 MEDICIÓN DEL OXÍGENO EN LA COLADA.

Los instrumentos que miden la concentración del oxígeno se empezaron a usar hace poco. Son sondas manuales parecidas a termopares de inmersión. Se basa en la generación de iones de oxígeno cuando están en contacto con un electrolito sólido (óxido de zirconio), midiendo la fuerza electromotriz

proporcional a la relación de los logaritmos de las concentraciones de los dos óxidos (se conoce la concentración de oxígeno en el electrolito). Este aparato incorpora un convertidor electrónico para obtener una lectura digital de la concentración en ppm. Este instrumento tiene valor para determinar los desoxidantes a usarse, o para hacer adiciones de Al, ferro silicio, etc.

4.2.3 USO DE ISÓTOPOS RADIATIVOS.

Los trazadores radiactivos se usan como herramientas de investigación y desarrollo. El desgaste del refractario, la manera como ocurre la refinación, la migración de inclusiones, los grados de mezclado del metal y la escoria se pueden determinar usando trazadores radiactivos. El cobalto-60, que emite mucha radiación gamma, es un buen trazador porque tiene una vida media prolongada. El más barato, el bario-140, actúa bien como trazador de escoria y refractarios, siendo similar en ambos sistemas. El fósforo-32, el azufre-35 y el lantano-140, se usan en estudios de inclusiones y el cromo-51 es un indicador de grados de mezcla metálica y escoria. Conviene elegir un isótopo similar al del sistema que se va a investigar, con una vida media lo suficientemente larga para permitir para investigar, y bastante corta para no dejar rastro. Esta vida media puede ser de pocos días a unas cuantas semanas, y se debe contar con la ayuda de especialistas.

4.2.4 IMPULSIÓN DE GASES EN LA COLADA⁽²⁹⁾.

La impulsión de gases en el interior de la colada facilita la homogenización de la mezcla, se lo realiza en la cuchara de aceración. Se necesita de lanzas consumibles por el cual se insufla gas, generalmente argón u oxígeno. La homogenización de la composición y temperatura del baño mediante la inyección de argón está causada, principalmente, por la disipación de la energía ascensional del gas inyectado. La siguiente ecuación es utilizada para calcular la potencia de agitación.

$$\varepsilon = 14.23 \left(\frac{VT}{M} \right) \log \left(\frac{1+H}{1.48P_0} \right)$$

Donde:

ε = potencia de agitación, W/ton

V = velocidad de flujo de gas, N m³/ min

T = temperatura del baño, K

M = peso del baño, ton

H = profundidad de inyección del gas, m

P_0 = presión de gas en la superficie del baño, atm

El tiempo de mezcla, T (ej. el tiempo de agitación para alcanzar una homogeneización del 95%) está dado por:

$$T \text{ (s)} = 116 \varepsilon^{-1/3} D^{5/3} H^{-1}$$

Donde D es el diámetro de la cuchara, en m.

4.2.4.1 CAS-OB. (Ajuste de la composición por burbujeo sellado de argón - Soplado de oxígeno)

Este proceso permite la adición de aleaciones dentro de un ambiente inerte de argón. Esta unidad se introduce en el acero líquido a través de un "ojo" formado en la escoria por el burbujeo del argón. En particular, permite la adición simultánea de Al y de O₂ gaseoso soplado a través de una lanza situada en la parte superior. Estos gases reaccionan para formar Al₂O₃ más una considerable cantidad de energía calórica exotérmica donde la temperatura del acero puede elevarse hasta 10 °C por minuto. Por lo tanto, el horno CAS-OB se utiliza para el recalentamiento químico. Sin embargo, el Al₂O₃ deberá eliminarse subsecuentemente.

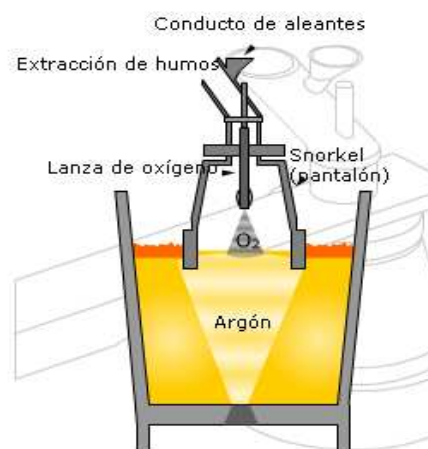


FIGURA 4.1: Sistema CAS-OB.

4.2.5 ACCESORIOS.

Los accesorios que serán utilizados en el laboratorio son:

- Escoriadores de pala ancha y de pala delgada. Los de pala ancha sirve para recoger la escoria desde la colada. Los de pala delgada sirven para mezclado manual de adiciones a la colada, aunque el horno da una agitación electromagnética a la misma.
- Pinzas y tenazas, para manipular elementos calientes y sólidos, sea para cargar el horno como para descargar.
- Depósitos de sacrificio, que son vasos de acero que contienen calcio o ferroaleaciones que se consumen al ser introducidos en la colada.
- Cuchara de descarga, que sirve para llevar el metal líquido afinado hasta los equipos de solidificación, como moldes o colada continua.
- Recolectores de muestra, donde se separa una mínima cantidad de metal fundido, que será solidificado y enfriado, y que sirve para análisis químico de muestras.

4.3 MANTENIMIENTO PREVENTIVO DE EQUIPOS Y ACCESORIOS.

El mantenimiento preventivo de los equipos usados en la fundición se los debe realizar finalizada la operación. Esto se debe a que estos equipos deben tener una confiabilidad para su uso en la operación de fundición.

Para elaborar las tablas AMFE de cada equipo, es necesario leer las instrucciones del fabricante, tomar en cuenta los rangos de medición y las calibraciones respectivas.

Los equipos deben chequearse de acuerdo al tiempo de utilización. Se recomienda elaborar una base de datos de mantenimiento, por piezas. Esta base tiene un carácter predictivo de acuerdo al tiempo de duración de las piezas. Si el mantenimiento se realiza de acuerdo a estándares de calidad,

estos equipos podrán mantenerse en un programa de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM), al igual que el horno de inducción.

Los accesorios sufren un desgaste progresivo, especialmente los que tienen contacto con la colada, pues la pérdida de material va a parar a la colada. Estos accesorios deben ser reemplazados cuando ya representan un riesgo para quien los manipula. Su mantenimiento representa una disponibilidad, es decir un tiempo de vida útil de la herramienta.

4.5 COSTOS DE PRODUCCIÓN.

Para establecer los costos de producción se debe realizar un balance energético y un balance de explotación posterior.

Para el balance energético se considera al horno de inducción instalado en el laboratorio, de carácter intermitente, por lo que la producción se mide en Kg. La temperatura varía a lo largo del tiempo pero se mantiene constante en todo el horno en un instante determinado, a lo que se conoce como temperatura de regulación del horno.

Evidentemente, la carga enfría el revestimiento, pero la energía dada por los elementos de calentamiento se utiliza en calentar el revestimiento nuevamente y también la carga hasta la temperatura de fusión, que será la temperatura de regulación del horno, cuyo valor permanece constante y servirá de consigna. Esta medición se la realiza con la termocupla de inmersión y señala la temperatura promedio entre la carga, el revestimiento y los elementos de calentamiento. Esta temperatura se llama temperatura del horno.

4.5.1 BALANCE ENERGÉTICO.

El consumo de energía de un proceso es la característica principal. Las componentes del balance energético se determina realizando mediciones durante su funcionamiento real en el ciclo completo de una carga. En todo balance energético es necesario que las condiciones inicial y final sean similares.

La ecuación de balance energético para un volumen de control es:

$$Q_{\text{entrada}} + Q_{\text{generado}} = Q_{\text{salida}} + Q_{\text{almacenado}}$$

La potencia de entrada (Q_{entrada}) se refiere a la potencia eléctrica al momento de la fusión. El calor generado por efecto Hall en la carga se considera potencia generada (Q_{generado}), a pesar que es una consecuencia de la potencia de entrada, y es el modo como la carga se calienta. La potencia de salida (Q_{salida}) tiene varios componentes: por convección (Q_c), por radiación (Q_r), por conducción (Q_k), por el agua de enfriamiento (Q_a), por lo que la potencia de salida (Q_s) es $Q_s = Q_c + Q_r + Q_k + Q_a$.

La potencia almacenada ($Q_{\text{almacenada}}$) se considera cero porque se supone que el horno estuvo frío al momento de la operación de fusión. Se debe tomar en cuenta este valor si se procede a una nueva operación iniciando con el horno caliente.

Se tomaron datos durante una fundición realizada en el laboratorio, las mismas que se encuentran en la bitácora respectiva.

TABLA 4.4: Datos tomados del horno en una operación de fundición ⁽³⁰⁾.

Ts	Temperatura superficial de la carga fundida	1540 °C	H	Altura de la bobina	35.56 cm
Ta	Temperatura ambiental	18 °C	D1	Diámetro de la bobina	34.29 cm
Tbob	Temperatura superficial de la bobina	38 °C	L1	Espesor del cemento refractario	1.5 cm
Tb	Temperatura máxima del agua	36 °C	L2	Espesor de la capa refractaria de cromita	5.145 cm
Tm	Temperatura mínima del agua	30 °C	n	Número de vueltas de la bobina inductora	16
f	Frecuencia de fundición	2400 Hz	H2	Altura de la carga fundida	40 cm
I	Intensidad de corriente de entrada	480 A	D2	Diámetro de la carga fundida	21 cm
V	Voltaje de entrada	500 V	P	Presión del agua del sistema de enfriamiento	60 psi

4.5.1.1 Potencia de entrada.

La potencia de entrada es eléctrica, se calcula mediante $Q_e = I \times V \times \cos\phi$ donde I es la intensidad de corriente, V es el voltaje al momento de la fusión y $\cos\phi$ es el factor de potencia, tomado de la Figura 2.1.

$$Q_e = I \times V \times \cos\phi = 480 \times 500 \times 0.29 = 69600 \text{ w} = 69.6 \text{ Kw}$$

4.5.1.2 Potencia generada.

La potencia generada es el calor que se desarrolla en la carga debido al efecto Hall de las corrientes parásitas ocasionadas por el inductor en la carga.

TABLA 4.5: Datos de resistencia eléctrica para el acero ⁽³¹⁾.

Resistividad del acero a 20 °C	$\rho_0 = 107 \times 10^{-9} \Omega\text{m}$
Coefficiente de resistividad a 20 °C	$\alpha = 0.006 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

Resistividad del acero a 1540 °C: $\rho = \rho_0 [1 + \alpha (T_s - 20)]$

$$\rho = 107 \cdot 10^{-9} \Omega\text{m} [1 + 0.006 \text{ }^\circ\text{C}^{-1} (1540 - 20) \text{ }^\circ\text{C}] = 1.082 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$$

$$\text{Profundidad de penetración: } p = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f \cdot \mu_r}} = 503 \sqrt{\frac{1.082 \cdot 10^{-6}}{2400 \times 1}} = 0.011 \text{ m.}$$

$$\text{Resistencia eléctrica del acero líquido: } R_2 = \frac{6.24 \cdot 10^{-3} D_2 \sqrt{\rho \cdot f \cdot \mu_r}}{H}$$

$$R_2 = \frac{6.24 \cdot 10^{-3} \times 0.21 \times \sqrt{1.082 \cdot 10^{-6} \times 2400 \times 1}}{0.3656} = 1.826 \cdot 10^{-4} \Omega$$

Por la ley de transformadores la intensidad de corriente en la carga es: $I_2 = I \cdot n$.

$I_2 = 480 \times 16 = 7680 \text{ A}$. Entonces la potencia eléctrica generada es:

$$Q_g = I_2^2 \times R_2 = 7680^2 \times 1.826 \cdot 10^{-4} = 10770.18 \text{ w} = 10.77 \text{ Kw.}$$

4.5.1.3 Total de energía entregada.

$$Q_{\text{entregado}} = Q_e + Q_g = 69.6 + 10.77 = 80.37 \text{ Kw.}$$

4.5.1.4 Pérdida por convección:

$$Q_c = 2.49 (T_s - T_a)^{1.25}$$

$$Q_c = 2.49 (1540 - 18)^{1.25} = 23671.06 \text{ w} = 23.67 \text{ Kw.}$$

4.5.1.5 Pérdida por radiación:

$$Q_r = 5.67 \cdot 10^{-8} e A (T_s^4 - T_a^4)$$

$$A = \frac{\pi \cdot D_2^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0.21^2}{4} = 0.0346 m^2$$

Emisividad para el acero: $e = 0.8$

$$Q_r = 5.67 \cdot 10^{-8} \times 0.8 \times 0.0346 (1540^4 - 18^4) = 8827.38 \text{ w} = 8.83 \text{ Kw.}$$

4.5.1.6 Pérdida por conducción:

$$Q_k = K A (T_s - T_{bob})$$

Datos para el revestimiento de cromita ⁽³²⁾: $K_1 = 6 \text{ w/m}\cdot\text{K}$. Cemento refractario: $K_2 = 2 \text{ w/m}\cdot\text{K}$.

$$\frac{1}{K} = \frac{L_1}{K_1} + \frac{L_2}{K_2}$$

$$\frac{1}{K} = \frac{0.05145}{6} + \frac{0.015}{2}$$

$$K = 62.208 \text{ w/m}^2\cdot\text{K}$$

$$A = \pi \cdot D_1 \cdot H = \pi \times 0.21 \times 0.4 = 0.264 \text{ m}^2$$

$$Q_k = 62.208 \times 0.264 \times (1540 - 38) = 24667.21 \text{ w} = 24.67 \text{ Kw.}$$

4.5.1.7 Pérdida por el agua de enfriamiento.

El horno instalado en el laboratorio tiene una bomba de agua Goulds Modelo 3656 con una velocidad nominal de 3500 rpm (datos de placa), que proporciona una presión al agua de enfriamiento de 60 psi, durante todo el ciclo de fundición.

Velocidad del agua de enfriamiento ⁽³³⁾: $v = \sqrt{\frac{2(P-P_0)}{\rho_{agua}}}$

$$P = 60 \text{ psi}, P_0 = 10.5 \text{ psi}, P - P_0 = 60 - 10.5 = 49.5 \text{ psi} = 341196.42 \text{ Pa.}$$

Densidad del agua a una temperatura promedio de 36 °C es 997 Kg/m³, pero el agua posee impurezas y sales disueltas se considera $\delta = 1000 \text{ Kg/m}^3$ y $\mu = 855 \times 10^{-6} \text{ N}\cdot\text{s/m}^2$, $k = 613 \times 10^{-3} \text{ w/m}\cdot\text{K}$, Número de Prandtl = 5.83

$$v = \sqrt{\frac{2 \times 341196.42}{1000}} = 26.12 \frac{m}{s}$$

Diámetro interno de la tubería de cobre: 20 mm = 0.02 m

Numero de Reynolds: $Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} = \frac{1000 \times 26.12 \times 0.02}{855 \times 10^{-6}} = 610994.15$ (régimen turbulento), por lo que el Numero de Nusseld corresponde a la correlación:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4}$$

$$Nu = 0.023 (610994.15)^{0.8} \cdot (5.83)^{0.4} = 1980.73$$

$$Nu = \frac{h \cdot d}{k} \text{ por lo que } h = \frac{Nu \cdot k}{d} = \frac{1980.73 \times 613 \times 10^{-3}}{0.02} = 60709.37 \frac{w}{m^2 K}$$

Área transversal de la tubería de cobre del inductor: $A_t = \pi d^2/4$

$$Q_a = h \cdot A_t \cdot (T_b - T_m)$$

$$Q_a = 60709.37 \frac{w}{m^2 K} \times \frac{\pi (0.02)^2 m^2}{4} \times 6K = 114.43 w = 0.114 Kw$$

$$Q_a = 0.114 Kw.$$

4.5.1.8 Total de pérdidas.

$$Q_{p\acute{e}rdidas} = Q_c + Q_r + Q_k + Q_a = 23.97 + 8.83 + 24.67 + 0.114 = 57.284 Kw$$

4.5.1.9 Energía dada a la carga.

$$Q_{util} = Q_{entregado} - Q_{p\acute{e}rdidas} = 80.37 - 57.284 = 23.086 Kw.$$

4.5.1.10 Rendimiento térmico del horno.

$$n = \frac{Q_{util}}{Q_{entregado}} \times 100 = \frac{23.086}{80.37} \times 100 = 28.72\%$$

$$\eta_t = 28.72\%$$

4.5.1.11 Diagrama Sankey

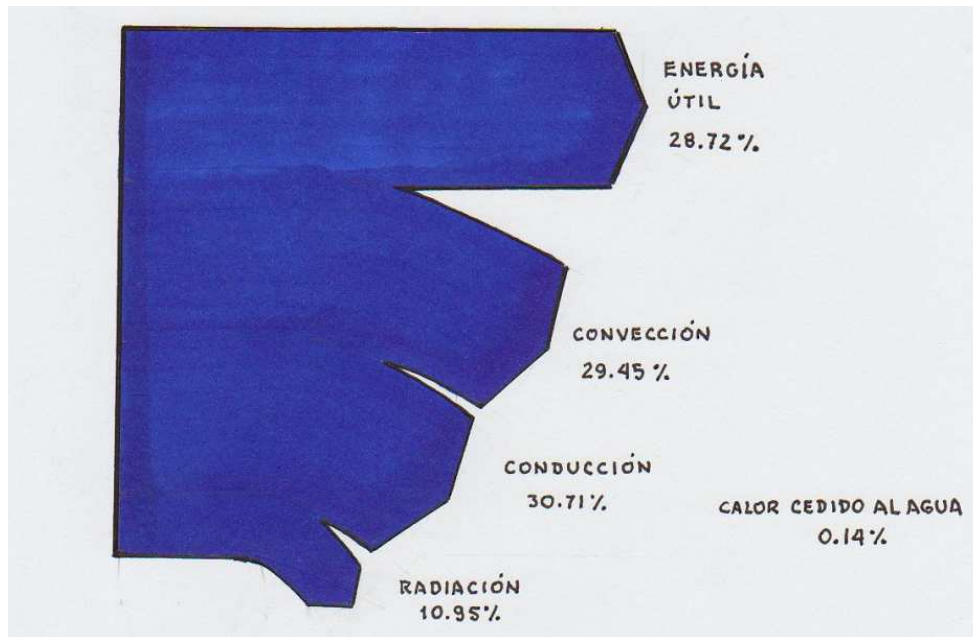


FIGURA 4.2: Diagrama Sankey.

4.5.2 BALANCE DE EXPLOTACIÓN.

El consumo energético de un horno en funcionamiento real es uno de los componentes del balance de explotación. Este balance debe traducirse a unidades monetarias, unidades monetarias por unidad de masa, tomando en cuenta el costo de la energía en USD/Kwh. Además, a este balance debe añadirse otros componentes que son los siguientes:

- Costo de mano de obra.
- Costo de materiales e insumos requeridos para la operación.
- Costo del mantenimiento de los equipos.
- Costos de amortización de equipos y elementos auxiliares.

En lo referente al costo energético y a la mano de obra, se estudia un ciclo completo debido a que se trata de un horno intermitente. Después se considera para una semana de trabajo, mes y un periodo anual. En los hornos eléctricos se debe tomar en cuenta las tarifas aplicables. En cuanto al costo de materiales e insumos, es preferible considerar una semana o un mes de trabajo, adicionar el costo de mantenimiento y las amortizaciones mensuales, si es que hubo adquisiciones de equipos.

Se debe señalar la importancia de un mantenimiento preventivo de los equipos, tomando en cuenta sus características propias. La importancia del mantenimiento y del control de calidad de los repuestos e insumos es evidente, por lo que una falla acarrea una elevación del costo de la energía y de insumos, y puede dar lugar a:

- Pérdida probable de toda la carga útil que está en el interior del horno.
- Pérdida de la producción durante el tiempo que dure la reparación de los equipos, hasta que llegue al régimen anterior.

4.5.3 FUNCIONAMIENTO REAL DE UNA INSTALACIÓN DE FUNDICIÓN.

4.5.3.1 Características principales.

Se refiere a las características eléctricas de la instalación tales como:

- Capacidad medida en Kg o Ton.
- Potencia: demandada de red y nominal medidas en KVA.
- Tensión de alimentación: voltaje (voltios), número de fases, frecuencia (generalmente 50 Hz).
- Transformador de regulación: potencia nominal (KVA) y tensiones de regulación nominales (V).
- Equilibrado de fases: reactancia inductiva a determinado voltaje (KVA_r – V); reactancia capacitiva variable (indicando las cantidades) (KVA_r); reactancia capacitiva fija (KVA_r).
- Compensación del factor de potencia: condensadores fijos (KVA_r); condensadores variables especificando su valor (KVA_r) y el total (KVA_r).
- Horno: capacidad nominal (Ton o Kg), dimensiones del crisol indicando el diámetro superior, diámetro inferior, altura (mm).
- Bobina activa: diámetro interior (mm), altura (mm), número de espiras y espesor del revestimiento medio (mm).

4.5.3.2 Datos de funcionamiento.

Se obtienen durante la operación de fusión indicando la aplicación (tipo de fundición), el tipo de carga (chatarra o mineral), consumo energético que son datos proporcionados por el fabricante. Calcular la producción teórica y práctica (Ton/hora). Se debe tomar nota de las bitácoras para elaborar la marcha operativa actual indicando las actividades de fin de semana, la marcha diaria, la reposición de revestimientos y el consumo real.

4.5.3.3 Mediciones realizadas.

Comprenden dos tipos de anotaciones:

- Datos del cuadro de control del horno: tensión, intensidad y potencia; energía consumida en Kwh; factor de potencia e intensidades en las 3 fases; temperatura final de la colada.
- Datos correspondientes a cargas y descargas realizadas.

4.5.3.4 Consumo de energía eléctrica.

- Realizar un análisis del consumo de energía eléctrica, indicando el consumo específico (Kwh/Kg), la producción media (Kg/h).
- Consumo semanal en funcionamiento normal diario graficado en un diagrama de barras.

CAPÍTULO V

OPERACIÓN DE LA FUNDICIÓN DE ACERO EN HORNO DE INDUCCIÓN.

5.1 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA FUNDICIÓN DE ACERO.

Para establecer una secuencia de operaciones de fundición se debe tomar en cuenta los siguientes aspectos que influyen en la fundición.

5.1.1 DENSIDAD DEL ACERO.

Los valores que se daban para el acero líquido tenían una incertidumbre que se obtenía usando un valor estimado para la contracción por solidificación y para los cambios volumétricos al aproximarse al liquidus en la transformación de la ferrita delta en austenita. Este valor es importante para la calibración de los moldes. La exactitud del peso de la pieza o lingote da origen a problemas entre productor y cliente. La Inland Steel Company determinó la densidad del acero líquido con pequeños errores experimentales de menor importancia. Los siguientes datos incluyen valores conocidos para el acero sólido.

TABLA 5.1: Densidades de aceros ⁽³⁴⁾.

DENSIDAD		
TIPO DE ACERO	lbm/in ³	g/cm ³
Líquido:		
• Calmado	0,254	7,03
• Semicalmado	0,252	6,98
• Efervescente	0,246	6,8
Sólido		
• Al rojo	0,275	7,61
• Laminado frío	0,283	7,83
• Colada continua	0,281	7,78

5.1.2 MODELACIÓN DEL ACERO LÍQUIDO.

Una propiedad física del acero líquido es que la viscosidad cinemática es similar a la del agua, por lo que se puede simular un modelo y observar el flujo de agua durante el llenado. De esta forma se investiga la conducta del acero

como información útil para el diseño de fundiciones de piezas o lingotes, así como moldes de colada continua.

Estas observaciones, al principio pueden ser cualitativas, debido a incertidumbres sobre el modelo, aun a escala unitaria. Las condiciones del flujo de líquido se gobiernan mediante parámetros hidrodinámicos, que presentan dificultades en escalas reducidas. Estos se dan en la representación del tipo de flujo, laminar o turbulento, para lo que se debe reproducir los números de Reynolds del sistema y no la geometría misma. Puede resultar contraproducente si una función no lineal gobierna el sistema.

La modelación todavía no se investigado a profundidad, pero existen software suficientes para la modelación matemática del llenado de moldes, solidificación del material y el enfriamiento.

5.2 SEGURIDAD INDUSTRIAL ⁽³⁵⁾.

Durante la presidencia del Ing. León Febres Cordero Rivadeneira, se expidió un Decreto Ejecutivo que reglamenta la seguridad industrial en el Ecuador. A continuación se detalla los aspectos que se aplicarían durante el proceso de fundición en el laboratorio de la facultad. Estos son:

Artículo 13: Obligaciones de los trabajadores. Artículo 34: Limpieza de locales. Artículo 53: Condiciones generales ambientales de ventilación, temperatura y humedad. Artículo 54: Calor. Artículo 60: Radiaciones infrarrojas. Artículo 63: Sustancias corrosivas, irritantes y tóxicas. Precauciones generales. Artículo 65: Sustancias corrosivas, irritantes y tóxicas. Normas de control. Artículo 95: Herramientas manuales. Normas generales de uso. Artículo 99 y 100: Aparatos de izar. Artículo 101: Manipulación de cargas. Artículo 102: Aparatos de izar. Revisión y mantenimiento. Artículo 128: Manipulación de materiales. Artículo 129: Almacenamiento de materiales. Artículo 131: Carretillas o carros manuales. Artículo 143: Prevención de incendios. Normas generales. Emplazamiento de locales. Artículo 154: Instalación de detección de incendios. Artículo 155: Instalación de extinción de incendios. Artículo 164: Señalización de seguridad. Normas generales. Artículo 167: Colores de seguridad. Artículo 169: Señales de seguridad. Artículo 172: Rótulos y etiquetas de seguridad.

Artículo 175: Protección personal. Normas generales. Artículo 188: Prohibiciones de los trabajadores.

5.3 PROCESOS PARA LA PRODUCCIÓN DE ACERO.

Existe una gran variedad de prácticas empleadas, existiendo las modalidades siguientes:

5.3.1 PROCESO CON UNA SOLA ESCORIA.

Esta escoria puede ser oxidante, reductora u oxidante-reductora.

El proceso con escoria oxidante es similar a la practicada en hornos Siemens-Martin para los mismos tipos de acero. La escoria se elimina en parte después de fundida la mayor parte de la carga. Este escoriado parcial implica disminución de la carga metalúrgica y temprana formación de la escoria básica.

El proceso con escoria reductora es un método de refusión y no de refinación, porque la carga se ajusta para obtener un contenido de carbono requerido y no se emplean oxidantes. La ventaja radica en el bajo consumo de energía y la retención de elementos oxidantes como el manganeso. No se efectúa remoción de escoria durante la hornada. Todo el fósforo que contenga la carga se queda en el acero producido.

El proceso con escoria oxidante-reductora hace que el carbono y parte de los gases se remueven con una escoria oxidante que después se reduce para recuperar casi todos los elementos que se pierden durante la oxidación. A pesar que la desulfuración es buena, el fósforo de la carga queda en el acero porque es reducida posteriormente.

5.3.2 PROCESO CON DOBLE ESCORIA.

Este es el proceso más atractivo para la producción de aceros de alta aleación y alta calidad. Después de que el periodo oxidante se completa, con todo el fósforo oxidado en la escoria y el nivel de carbono por debajo del nivel de vaciado, se remueve toda la escoria oxidante basculando el horno y los restos flotantes se extraen del horno. Se agrega una mezcla de cal y fundentes necesarios y finalmente se añade coque, para producir carburo de calcio y

propiciar condiciones reductoras. El contenido de FeO no excede el 1% y no hay reversión de fósforo. Si se quiere una formación rápida de escoria se añade carburo de calcio o el de silicio. Si se desea acero de bajo carbono, las adiciones de coque se sustituyen por ferrosilicio o aluminio con resultados similares. La escoria reductora con carburo es de color gris oscuro a negro y cuando se humedece produce acetileno. La escoria reductora sin carburo es blanca debido al alto contenido de CaO y bajo FeO y MnO.

5.4 SECUENCIA DE OPERACIONES.

El proceso de fabricación se divide básicamente en dos fases: la fase de fusión y la fase de afino.

5.4.1 FASE DE FUSIÓN.

Una vez introducida la chatarra en el horno y los agentes reactivos y escorificantes (principalmente cal) se desplaza la bóveda hasta cerrar el horno y se bajan los electrodos hasta la distancia apropiada, haciéndose saltar el arco hasta fundir completamente los materiales cargados. El proceso se repite hasta completar la capacidad del horno, constituyendo este acero una colada.

5.4.2 FASE DE AFINO.

El afino se lleva a cabo en dos etapas. La primera en el propio horno y la segunda en un horno cuchara. En el primer afino se analiza la composición del baño fundido y se procede a la eliminación de impurezas y elementos indeseables (silicio, manganeso, fósforo, etc.) y realizar un primer ajuste de la composición química por medio de la adición de ferroaleaciones que contienen los elementos necesarios (cromo, níquel, molibdeno, vanadio, titanio, etc.). El acero obtenido se vacía en una cuchara de colada, revestida de material refractario, que hace la función de crisol de un segundo horno de afino en el que termina de ajustarse la composición del acero y de dársele la temperatura adecuada para la siguiente fase en el proceso de fabricación.

TABLA 5.2: Principales reacciones químicas en el afino

Elemento	Forma de eliminación	Reacción química
Carbono	Al combinarse con el oxígeno se quema dando lugar a CO y CO ₂ gaseoso que se elimina a través de los humos.	$2 C + O_2 \rightarrow 2 CO$ $2 CO + O_2 \rightarrow 2 CO_2$
Manganeso	Se oxida y pasa a la escoria. Combinado con sílice da lugar a silicatos.	$2 Mn + O_2 \rightarrow 2 MnO$ $MnO + SiO_2 \rightarrow \text{silicatos}$
Silicio	Se oxida y pasa a la escoria. Forma silicatos	$Si + O_2 \rightarrow SiO_2$ $SiO_2 + \text{óxidos} \rightarrow \text{silicatos}$
Fósforo	En una primera fase se oxida y pasa a la escoria. En presencia de carbono y altas temperaturas puede revertir al baño. Para fijarlo a la escoria se añade cal formándose fosfato de calcio.	$4 P + 5 O_2 \rightarrow 2 P_2O_5$ $P_2O_5 + 5 C \rightarrow 2 P + 5 CO$ $2 P + 5 FeO + 3 CaO \rightarrow P_2O_5 \cdot 3 CaO + 5 Fe$
Azufre	Su eliminación debe realizarse mediante el aporte de cal, pasando a la escoria en forma de sulfuro de calcio. La presencia de manganeso favorece la desulfuración.	$S + Fe + CaO \rightarrow FeO + S_{Ca}$ $S + Fe + MnO \rightarrow SMn + FeO$ $S + Fe + Mn \rightarrow SMn + Fe$

5.4.3 EL CONTROL DEL PROCESO.

Para obtener un acero de calidad el proceso debe controlarse en todas sus fases empezando, como ya se ha comentado, por un estricto control de las materias primas cargadas en el horno.

Durante el proceso se toman varias muestras del baño y de las escorias para comprobar la marcha del afino y poder ir ajustando la composición del acero. Para ello se utilizan técnicas instrumentales de análisis (espectrómetros) que permiten obtener resultados en un corto espacio de tiempo, haciendo posible un control a tiempo real y la adopción de las correcciones precisas de forma casi instantánea, lográndose así la composición química deseada.

Los dos elementos que más pueden influir en las características y propiedades del acero obtenido, el carbono y el azufre, se controlan de forma adicional mediante un aparato de combustión LECO. Pero además de la composición del baño y de la escoria, se controla de forma rigurosa la temperatura del baño, pues es la que determina las condiciones y la velocidad a la que se producen las distintas reacciones químicas durante el afino.

5.4.4 HORNADAS TÍPICAS.

La secuencia de una hornada es la siguiente:

Preparación del horno (parchado y reparación) en la fase de fusión:

- Carga
- Fusión
- Recarga
- Fusión

Proceso a una sola escoria (fase de afino):

- Refinación oxidante.
- Finalización
- Bloqueo (opcional)
- Vaciado

Proceso a doble escoria (fase de afino):

- Refinación oxidante
- Remoción de la escoria.
- Adición de aleantes
- Formación de escoria reductora
- Refinación reductora
- Finalización
- Vaciado.

En el proceso a una escoria, al cargar el horno primero se efectúa con chatarra ligera al fondo para que sirva de colchón, luego se acomoda chatarra pesada en el centro y chatarra ligera y mediana alrededor de la pesada. Junto con la

segunda carga se puede poner coque, antracita, trozos de lingotes que servirá como adiciones de carbono necesario para la fusión. Se hace un ajuste de mediana potencia y cuando comience la fusión se eleva al máximo. La recarga se realiza cuando la carga anterior se funde. Las composiciones de las cargas deben ser similares pero no se emplea chatarra pesada y se puede adicionar cal y mineral. La afinación oxidante requiere de oxígeno para lo cual se debe suministrar a través de una línea de oxígeno en forma continua. Se lo puede realizar con adiciones de minerales. La potencia durante este paso debe ser moderada a baja, debido a que la reacción es exotérmica. En el proceso modificado de una escoria oxidante la remoción parcial puede realizarse rápidamente después de iniciada la oxidación. Silicio, fósforo, y desafortunadamente manganeso se eliminan, por lo que se toma una muestra de la colada. Se produce la usual ebullición con carbono. El control se produce monitoreando la temperatura y análisis químicos. La colada se puede vaciar o bloquear. Se alcanza la temperatura deseada y se vacía, sin antes monitorear el contenido de oxígeno con una sonda o haciendo cálculos metalúrgicos. Las adiciones se realizan en la olla de aceración.

En el proceso a doble escoria, siempre reductora al final, la escoria oxidante que contiene todo el silicio y el fósforo cargados, se extrae después de alcanzar un nivel de carbono un poco inferior al requerido. Toda la escoria remanente se saca cuidadosamente para evitar la reversión del fósforo en la siguiente etapa. Las adiciones de aleantes pesados se pueden hacer en la colada descubierta. Se forma otra escoria con mezcla de cal, arena sílice y coque, agregados sobre el acero y se eleva la potencia. Una vez formada la escoria se esparce carbono o grafito para iniciar la formación de carburo reductor, a menos que se haya agregado carburo de calcio en vez de cal. La escoria blanca que es rica en cal se vuelve café, y una vez que los óxidos reductores se reducen y hay carburos libres en la escoria se vuelve negra finalmente. Se emplean frecuentemente pequeñas adiciones de coque, cal y agentes fluidizantes como espato flúor o arena. Se hacen comprobaciones frecuentes del carbono, azufre y fósforo en el laboratorio. La potencia durante la etapa reductora debe mantenerse alta porque la reacción que produce carburos es endotérmica. Debe controlarse frecuentemente la temperatura

cada vez que se hace una adición y se extrae una muestra. Una colada está reducida cuando una muestra se solidifica completamente calmada sin usar aluminio y cuando se desprende acetileno al humedecer las probetas de escoria.

Las proporciones más comunes de materias para formar escoria reductora son:

TABLA 5.3: Proporciones para formar escoria reductora. Tienen relación con la carga total del metal.

Cal	5-9 partes
Espato	1-2 partes
Arena	1 parte
Coque	1 parte

Los carburos de calcio o de silicio se utilizan más a menudo pero eleva el costo. Si hay dudas sobre la captación de carbono se pone una mezcla de cal, espato, arena, alúmina y arcilla refractaria y hacer adiciones reductoras de ferrosilicio o silicomanganeso. Esta escoria no desprende acetileno, normalmente es blanca, pero un exceso de óxido crómico la hace verdosa. Se puede agregar aluminio en granalla o en chatarra. Finalmente se introduce aluminio en forma de discos gruesos y sumergiéndolos manualmente para producir una colada bien desoxidada de acero de grano fino, pero con un contenido alto de nitrógeno. El vaciado es similar al de una escoria oxidante. La escoria remanente se fluidifica para extraerla del horno después de vaciar el acero.

En coladas con alto carbono se bloquea en el horno, a un nivel de silicio de 0.1%. Debe mencionarse que el contenido de carbono no decrece si la escoria no está oxidada debido a que está rica en FeO, y que se vacía parcialmente después de terminada la fusión. El bloqueo no es necesario y se puede esperar un acero con 0.45% de carbono. Los aceros con mayor contenido de carbono se bloquean, para evitar problemas de aceptación, además que en el tiempo de refinación se puede dejar inclusiones indeseables en la colada que pueden flotar o reducirse con el silicio de bloqueo y la sílice resultante puede flotar nuevamente.

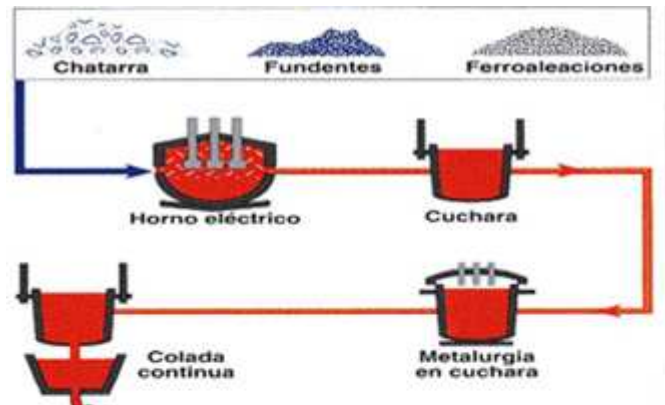


FIGURA 5.1: Grafico esquemático de operaciones para fundir acero.

5.5 METALURGIA SECUNDARIA. DESGASIFICADO ⁽³⁶⁾.

La metalurgia secundaria comprende procesos de desgasificado, en vacío o a presión atmosférica. Los procesos al vacío consiguen resultados notables, incluso espectaculares, en la consecución de los objetivos a obtenerse. Los procedimientos realizados a presión atmosférica no consiguen resultados tan brillantes. Sin embargo, la relación resultados/inversión obtenida a presión atmosférica es compensatoria en una acería que fabrica aceros muy especiales sólo en ocasiones contadas que no compensan una fuerte inversión en equipos y operaciones. Tanto unos como otros pueden realizarse sin aportación térmica adicional o con caldeo posterior. Los procesos más importantes son:

1. Procesos vacío sin aportación térmica.
 - Desgasificación en vacío (Vacum Desgasing) VD. Estos pueden ser estáticos en cámara desgasificadora, con o sin agitación, la cual es mediante inyección de gas o por inducción eléctrica. La desgasificación también puede ser hecha en el chorro de metal cuando es vertida del horno a la cuchara y después a la lingotera. Fue desarrollado por la fábrica Krupp.
 - Por circulación del acero. Esta circulación puede ser discontinua (proceso DH) o por recirculación (proceso RH) con insuflación de gas inerte (Gas Lift) o inductivamente (Induction Lift o proceso Stokes o Thermoflow).
2. Procesos vacío con aportación térmica.

La agitación del acero por lo general provoca un enfriamiento de la colada, por lo que se han desarrollado procesos con aportación térmica adicional. Estos pueden ser por calentamiento eléctrico o por aportación de oxígeno.

- Por calentamiento eléctrico hay varios procesos, siendo el básico el desarrollado por ASEA-SKF. Otros son desgasificación por arco (VAD), proceso Finkl-Mohr que es una variante del VAD, proceso Stein-Heurtey o llamado SAFE, fusión en vacío (VM), proceso Ladle Furnace u horno-cuchara (LF).
 - Los procesos con aportación de oxígeno aprovechan el carácter exotérmico de la reacción del oxígeno con el carbono. Hay el clásico proceso de descarburación en vacío (VOD), convertidor de descarburación en vacío (VODC), proceso combinado VOD/LD, proceso ASV, proceso V-R, proceso AVR (Allegheny Vacuum Refining), proceso RH-OB desarrollado por Nippon Steel.
3. Procesos atmosféricos sin aportación térmica. Estos se realizan para crear efectos de creación de interfaces, aceleración de reacciones, desgasificación, desoxidación, eliminación de inclusiones mediante inyección de gases inertes como el argón y con la adición forzosa de escorificantes y ferroaleaciones. Estos procesos son metalurgia secundaria con argón (ASM), purga con argón (AP), inyección desulfurante con lanza o procesos IP y TN, inyección entubada o encapsulada, inyección de hilo de aluminio o calcio, lanzamiento de proyectiles, ajuste de composición por barboteo de argón (CAS), proceso Sealed Argon Bubbling (SAB), Capped Argon Bubbling (CAB).
4. Procesos atmosféricos con aportación térmica. Así mismo existe por calentamiento eléctrico o por oxígeno introducido.
- Los procesos por calentamiento eléctrico son el horno-cuchara (LF), Gas Refining Arc Furnace (GRAF), proceso BBC-CEM-IRSID.
 - Los procesos con aporte de oxígeno son Argon Oxygen Decarburation (AOD), proceso Creusot Loire Uddeholm (CLU), CAS con inyección de oxígeno (CAS-OB).

5.6 TRATAMIENTOS DE ESCORIA A LA CUCHARA Y TRASVASE. POST FUNDICIÓN.

- Añadir cal viva a la escoria para aumentar la basicidad de la misma; disminuye la temperatura y el potencial de oxidación. Esta adición al acero se realiza al final del vaciado.
- Si se añade coque, la escoria será espumosa y el excedente se deposita en el envase de escorias.

Cuando las adiciones son grandes y voluminosas es conveniente trasvasar para efectuar una mezcla completa con el acero.

El trasvase se efectúa vaciando primero la colada en una cuchara con una boquilla de gran tamaño (102 mm de diámetro) y después a otra con boquilla apropiada para colar. Las aleaciones se agregan en esta última y se dispersan moviendo la olla primaria sobre la olla de colado. Se adiciona cal para formar una cubierta. Este procedimiento también separa la escoria rica en fósforo, eliminando la reversión del fósforo.

5.7 EXIGENCIAS PARA FUNDIR ACERO AL CARBONO.

Las exigencias sirven para plantear los propósitos de las mismas, las operaciones que se van a realizar con los procesos y equipos que se necesitan y, finalmente, qué productos o equipos se benefician de ellas.

Estas exigencias son las siguientes ⁽³⁷⁾:

5.7.1 PRIMERA EXIGENCIA: AJUSTE DE COMPOSICIÓN.

- Propósito:

Obtención segura de un análisis concreto.

Garantizar intervalos más estrechos de composición.

Mejorar rendimiento de adición de ferroaleaciones.

- Operación:

Adición exacta de ferroaleaciones.

Mezclado y homogeneización correcta de la colada.

- Proceso:

DH, RH, VAD, CAS, CAB, LF.

- Aplicación:

Cualquier tipo de acero.

5.7.2 SEGUNDA EXIGENCIA: AJUSTE DE TEMPERATURA.

- Propósito:

Garantizar obtención de la temperatura exigida.

- Operación:

Enfriamiento mediante chatarra o barboteo de gas.

Caldeo eléctrico o por oxígeno.

- Proceso:

VAD, RH-OB, LF.

- Aplicación:

Facilitar trabajo de las máquinas de colada continua.

5.7.3 TERCERA EXIGENCIA: DESOXIDACIÓN.

- Propósito:

Eliminar exceso de oxígeno disuelto en el baño.

Obtener acero limpio de inclusiones de óxidos.

- Operación:

Generación de CO acelerada por vacío.

Formación turbulenta y barrido de Al_2O_3 .

- Proceso:

Empleo de escorias desoxidantes bajas en oxígeno.

Procesos al vacío eliminadores de oxígeno.

Barboteo de gases inertes purgadores de inclusiones.

Reducción con calcio y modificación de inclusiones.

- Aplicación:

Aceros calmados.

5.7.4 CUARTA EXIGENCIA: DESULFURACIÓN.

- Propósito:

Cumplir especificación de azufre.

Obtener acero limpio de sulfuros.

- Operación:

Estimular las reacciones metal-escoria.

Adición forzada de CaSi, Ca₂C, Mg.

- Proceso:

Trabajo con escorias sintéticas desulfuradoras.

VAD, inyección de polvo (IP o TN), LF.

- Aplicación:

Aceros con 0,005 - 0.010% de azufre.

5.7.5 QUINTA EXIGENCIA: ELIMINACIÓN O MODIFICACIÓN DE INCLUSIONES.

- Propósito:

Alcanzar características estructurales y mecánicas.

- Operación:

Tratamiento eliminador al vacío.

Adición modificadora de Ca, Zr, Ti, tierras raras...

- Proceso:

VAD, inyección (IP o TN), encapsulado (CaSi).

- Aplicación:

Aceros estructurales.

5.7.6 SEXTA EXIGENCIA: DESCARBURACIÓN.

- Propósito:

Bajar todo lo posible el contenido final de carbono.

- Operación:

Reacción carbono-oxígeno forzada por vacío o gases.

- Proceso:

Procesos vacío (ASEA-SKF, VOD, RH-OB).

Arrastre por gases diluyentes (AOD, CLU, CAS-OB).

- Aplicación:

Inoxidables o para fleje eléctrico (histéresis estrecha)

Sustitución de efervescentes maleables y dúctiles.

5.7.7 SÉPTIMA EXIGENCIA: ELIMINACIÓN DE HIDRÓGENO DISUELTO EN EL ACERO.

- Propósito:

Evitar formación de grietas en frío.

- Operación:

Tratamiento en vacío.

- Proceso:

Procesos vacío (DH, RH, VAD, RH-OB).

- Aplicación:

Aceros de alta fiabilidad.

Se puede notar que se incluyen procesos de desgasificación en vacío, por lo que al no contar con este equipamiento en el laboratorio se los descarta.

La finalidad de estas exigencias es establecer las directrices para el proceso de fundición de acero planteado.

5.7.8 REVISIÓN INICIAL ANTES DEL PROCESO DE FUNDICIÓN.

Antes de proceder a fundir se debe reunir todo el personal involucrado en una revisión inicial. Esta revisión inicial permite identificar:

- Aspectos metalúrgicos.
- Requisitos legales y de norma.
- Requisitos de materiales, equipos, insumos y equipo humano.
- Prácticas de gestión.
- Control del proceso.

5.8 DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL PROCESO DE FUNDICIÓN.

Este diagrama se lo realizó de acuerdo a los requerimientos fundamentales del producto que se desea obtener. El diagrama es el siguiente:

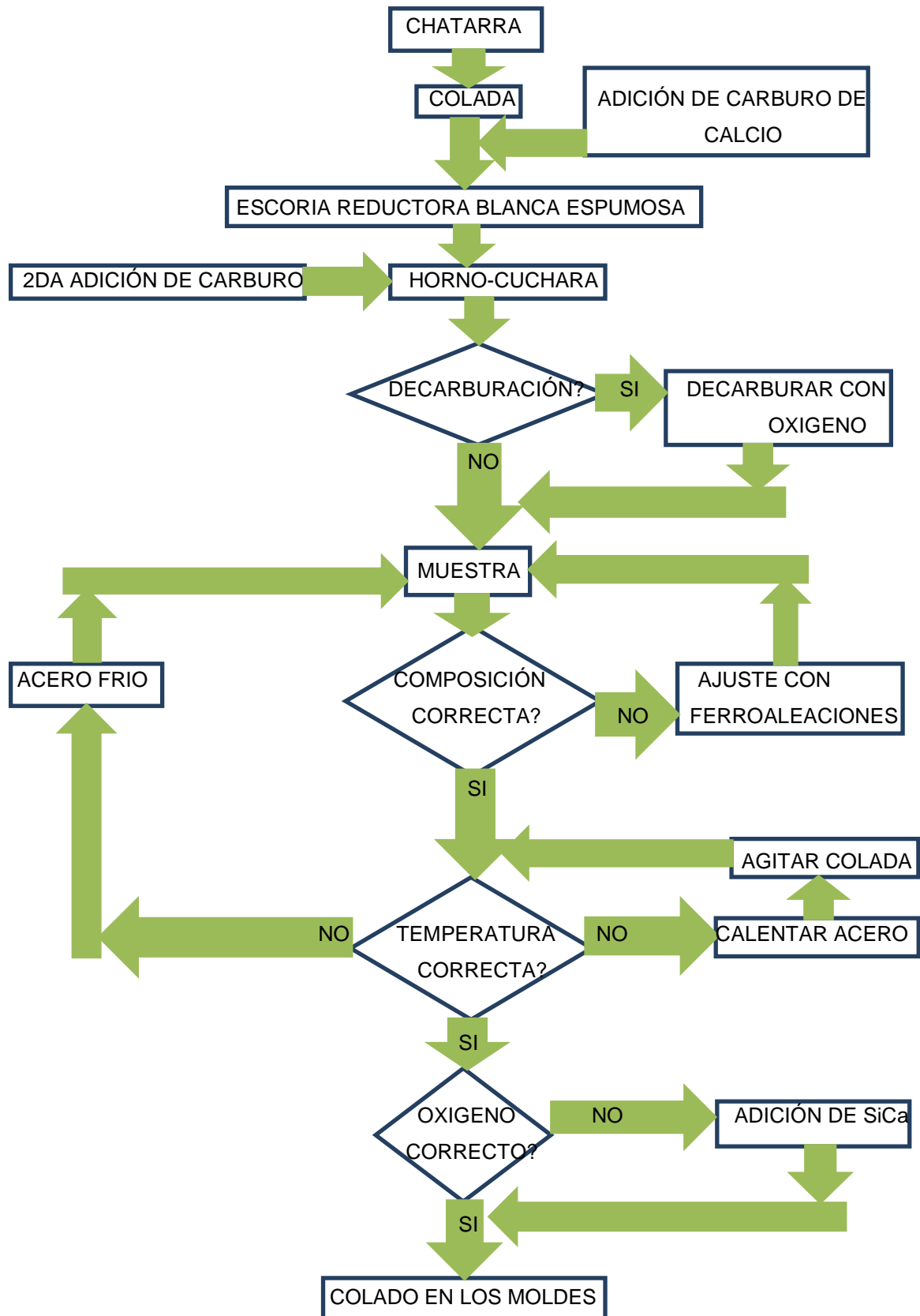


FIGURA 5.2: Diagrama de flujo para fundir acero en el horno de inducción.

CAPÍTULO VI

NORMATIVA VIGENTE.

6.1 NORMAS TÉCNICAS.

6.1.1 NORMALIZACIÓN.

La normalización o estandarización es la redacción y aprobación de normas que se establecen para garantizar la calidad de los elementos fabricados independientemente, la seguridad de funcionamiento y para trabajar con responsabilidad social.

La normalización es el proceso de elaboración, aplicación y mejora de las normas que se aplican a distintas actividades científicas, industriales o económicas con el fin de ordenarlas y mejorarlas. La American Society for Testing Materials (ASTM), define la normalización como el proceso de formular y aplicar reglas para una aproximación ordenada a una actividad específica para el beneficio y con la cooperación de todos los involucrados.

Según la ISO (International Standardization Organization) la normalización es la actividad que tiene por objeto establecer, ante problemas reales o potenciales, disposiciones destinadas a usos comunes y repetidos, con el fin de obtener un nivel de ordenamiento óptimo en un contexto dado, que puede ser tecnológico, político o económico.

La normalización persigue fundamentalmente tres objetivos:

- **Simplificación:** Se trata de reducir los modelos quedándose únicamente con los más necesarios.
- **Unificación:** Para permitir la intercambiabilidad a nivel internacional.
- **Especificación:** Se persigue evitar errores de identificación creando un lenguaje claro y preciso

Las elevadas sumas de dinero que los países desarrollados invierten en los organismos normalizadores, tanto nacionales como internacionales, es una prueba de la importancia que se da a la normalización.

6.1.1.1 Normalización y certificación.

Hay que tener en cuenta que normalización y certificación no son lo mismo: normalización consiste en la elaboración, difusión y aplicación de normas, mientras que la certificación es la acción llevada a cabo por una entidad reconocida como independiente de las partes interesadas mediante la que se manifiesta la conformidad, solicitada con carácter voluntario, de una determinada empresa, producto, servicio, proceso o persona, con los requisitos mínimos definidos en las normas o especificaciones técnicas.

6.1.1.2 Organismos Internacionales de Normalización.

- ISO - Organización Internacional para la Estandarización.
- IEC - International Electrotechnical Commission.
- IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- ITU - Unión Internacional de Telecomunicaciones (incluye CCITT y CCIR).
- IATA - International Air Transport Association

6.1.1.3 Organismos Regionales de Normalización.

- AMN - Asociación Mercosur de Normalización.
- APEC - Asia-Pacific Economic Cooperation.
- CAN - Red de Normalización Andina.
- CARICOM - Caribbean Community Standardization.
- CENELEC - Comité Européen de Normalisation Electrotechnique - Comité Europeo de Normalización Electrotécnica.
- CEN - Organismo de estandarización de la Comunidad Europea para normas EN.
- COPANT - Comisión Panamericana de Normas Técnicas.

6.1.1.4 Organizaciones Privadas de Normalización.

- ACI - American Concrete Institute.
- API - American Petroleum Institute.
- ASCE - American Society of Civil Engineering.
- ASME - American Society of Mechanical Engineers.

- ASTM – American Society for Testing Materials.
- HL7 - Health Level Seven Inc.
- IAPMO - International Association of Plumbing and Mechanical Officials.
- NEMA - National Electrical Manufacturers Association.
- NFPA - National Fire Protection Association.
- NSF – National Scientific Foundation.
- UL - Underwriters Laboratories Inc.

TABLA 6.1: Algunos Organismos Nacionales de Normalización que conforman la ISO ⁽¹⁾

País	Organismo	Web
Alemania	Deutsches Institut für Normung	DIN
Ecuador	Instituto Ecuatoriano de Normalización	INEN
España	Asociación Española de Normalización y Certificación	AENOR
Estados Unidos de América	American National Standards Institute	ANSI
Francia	Association Française de Normalisation	AFNOR
Japón	Japanese Industrial Standards Committee	JISC
México	Dirección General de Normas	DGN
Reino Unido	British Standards Institution	BS
Rusia	Agencia Federal para la Regulación Técnica y la Metrología	GOST

6.1.2 NORMA TECNOLÓGICA

Las normas son documentos técnico-legales con las siguientes características:

- Contienen especificaciones técnicas de aplicación voluntaria.

- Son elaborados por consenso de las partes interesadas:
 - Fabricantes.
 - Administraciones.
 - Usuarios y consumidores.
 - Centros de investigación y laboratorios.
 - Asociaciones y colegios profesionales.
 - Agentes sociales, etc.
- Están basados en los resultados de la experiencia y el desarrollo tecnológico.
- Son aprobados por un organismo nacional, regional o internacional de normalización reconocido.
- Están disponibles al público.

Las normas ofrecen un lenguaje de punto común de comunicación entre las empresas, la administración pública, los usuarios y consumidores. Las normas establecen un equilibrio socioeconómico entre los distintos agentes que participan en las transacciones comerciales, base de cualquier economía de mercado, y son un patrón necesario de confianza entre cliente y proveedor.

6.1.2.1 Tipos de normas.

Una norma de facto puede definirse como una especificación técnica que ha sido desarrollada por una o varias compañías y que ha adquirido importancia debido a las condiciones del mercado. Suele utilizarse para referirse a normas consuetudinarias.

Una norma de jure puede definirse, en general, como una especificación técnica aprobada por un órgano de normalización reconocido para la aplicación de la misma de forma repetida o continuada, sin que dicha norma sea de obligado cumplimiento, según el GATT en sus definiciones de directivas CEE 83/189.

6.1.2.2. Normativa aplicada a productos de acero.

Se han encontrado normativa aplicada a productos de acero, dependiendo de la aplicación del material sea como barras, planchas laminadas o forjadas,

acero al carbono o aleado, y también se ha fijado normas de acuerdo al uso de estos productos: para ferrocarriles, industria petrolera, depósitos a presión, depósitos que soportan calor, materiales para centrales nucleares, transporte, etc.

6.1.3 ASTM (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS).

ASTM o ASTM International es un organismo de normalización de los Estados Unidos de América. Fue fundado el 16 de mayo de 1898, como American Section of the International Association for Testing Materials por iniciativa de Charles Dudley, entonces responsable del Control de Calidad de Pennsylvania Railroad, quien tuvo la iniciativa de hacer que los ferrocarriles y las fundiciones de acero coordinaran sus controles de calidad.

En el 2001 la ASTM asume su nombre actual: ASTM International como testimonio del interés supranacional que actualmente han alcanzado las técnicas de normalización.

La ASTM está entre los mayores contribuyentes técnicos del ISO, y mantiene un sólido liderazgo en la definición de los materiales y métodos de prueba en casi todas las industrias, con un casi monopolio en las industrias petrolera, petroquímica y siderúrgica.

Por ejemplo, algunos elementos de uso común, tales como los que conectan el contador de agua potable a la tubería, probablemente están elaborados con un procedimiento de forjado conforme a ASTM A 105, en la práctica, un acero de buena calidad, mientras que los tubos quizás respondan a la norma ASTM A 589. Las láminas de plástico que se usan para envolver los alimentos, si no se rompen, probablemente han sido fabricadas y comprobadas con la norma ASTM D 682. Las ollas de acero inoxidable, posiblemente respondan a la ASTM A 240 Tp 304 o 321; y si son de calidad superior, cumplirán la norma 316.

6.1.3.1 Algunas normas ASTM y su aplicación⁽³⁹⁾.

A 1-64 Especificaciones de acero al carbono al horno abierto, para carriles o rieles.

A 6-64 Requerimientos generales para el suministro de aceros laminados para usos estructurales. Esta norma incluye:

- A 7-61 Acero para edificios y construcciones.
- A 36-63 Acero para estructuras.
- A 283-68 Chapas, calidad de estructuras, de acero al carbono.
- A 284-64 Chapas de acero al carbono-silicio para maquinaria y su construcción.
- A 373-58 Acero soldable para estructuras.
- A 406-59 Acero de baja aleación y alta resistencia para estructuras y remaches.
- A 94-62 Acero de alta resistencia para estructuras.
- A 242-64 Acero de baja aleación y alta resistencia para estructuras.
- A 440-63 Acero para estructuras, de alta resistencia.
- A 441-64 Acero al manganeso-vanadio de baja aleación y alta resistencia, para estructuras.
- A 514-64 Acero aleado de alta resistencia, termo tratado, en chapas aptas para soldadura.

A 20-64 Requerimientos generales para suministro de chapas para rebordear y para hogares.

6.1.4 AISI (AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE)-SAE (SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS).

La norma AISI/SAE (también conocida por SAE-AISI) es una clasificación de aceros y aleaciones de materiales no ferrosos. Es la más común en los Estados Unidos. AISI es el acrónimo en inglés de American Iron and Steel Institute (Instituto americano del hierro y el acero), mientras que SAE es el

acrónimo en inglés de Society of Automotive Engineers (Sociedad de Ingenieros Automotrices).

En 1912, la SAE promovió una reunión de productores y consumidores de aceros donde se estableció una nomenclatura y composición de los aceros que posteriormente AISI expandió.

6.1.5 ASME (AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS).

ASME es el acrónimo de American Society of Mechanical Engineers (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos). Es una asociación profesional, que ha generado un código de diseño, construcción, inspección y pruebas para equipos. Este código tiene aceptación mundial y es usado en todo el mundo.

Cabe indicar que este código tiene varias divisiones relacionadas con otra normativa aceptada, tal como AISI, ASTM, AASHTO, etc.

6.1.6 INEN (INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN)⁽⁴⁰⁾.

Es el organismo oficial de la República del Ecuador para la normalización, la certificación y la metrología.

Es una entidad adscrita al Ministerio de Comercio Exterior, Industrialización, Pesca y Competitividad, MICIP, y fue creada en 1970-08-28 mediante Decreto Supremo No.357 publicado en el Registro Oficial No.54 de 1970-09-07.

Este decreto fue reformado, según el artículo 30 de la ley No.12 de Comercio Exterior e Inversiones, LEXI, de 1997-05-26 y publicada en el Registro Oficial No.82 de 1997-06-09 y según el cual, este organismo se constituye en una entidad con personería jurídica de derecho privado con finalidad social y pública.

A continuación se menciona algunas normas vigentes que son aplicadas a acero y sus productos:

- 0106:75 Preparación de muestras de acero al carbono.

- 0119:75 Acero y hierro fundido. Determinación del contenido total de silicio. Método gravimétrico.
- ISO 377:09 Acero y productos de acero. Localización y preparación de muestras y probetas para ensayos mecánicos.
- 0107:75 Acero al carbono. Determinación del contenido de fósforo. Método alcalimétrico.
- 0108:75 Aceros y hierro fundido. Determinación de azufre.
- 0120:75 Aceros. Determinación del contenido total de carbono. Método gravimétrico.
- 0118:75 Aceros. Determinación de la cantidad de manganeso. Método espectrofotométrico.
- 1481:87 Aceros. Determinación del tamaño de grano, por separación de imagen.
- 1482:87 Aceros. Determinación microscópica de inclusiones.
- 0661:83 Chatarra de acero al carbono. Terminología.
- 050:2010 Chatarra metálica ferrosa.
- 2505:10 Chatarra metálica ferrosa. Acopio. Requisitos.
- 2513:10 Chatarra metálica ferrosa. Desguace de vehículos.
- 2510:10 Chatarra metálica ferrosa. Transporte. Requisitos.
- 0662:83 Definición y designación de productos siderúrgicos. Clasificación.

6.2 NORMAS AMBIENTALES.

Hasta el momento, solo el Municipio de Quito ha emitido una ordenanza de Gestión Ambiental, válida para el Distrito Metropolitano. Esta ordenanza es la

213 llamada Ordenanza Sustitutiva del Título V, “del medio ambiente”, Libro Segundo, del Código Municipal para el Distrito Metropolitano de Quito ⁽⁴¹⁾.

A continuación se describe un extracto con los aspectos relacionados a las operaciones de fundición que se efectúan en el Laboratorio de Fundición de la Facultad de Ingeniería Mecánica:

Art. II.380.- ÁMBITO DE APLICACIÓN.- Lo dispuesto en este capítulo es aplicable dentro del Distrito Metropolitano de Quito a todas las obras, infraestructuras, proyectos o actividades de cualquier naturaleza, y en general a todas las acciones que vayan a ejecutarse o adoptarse por cualquier proponente y que puedan causar impactos ambientales o representen algún tipo de riesgo para el ambiente. Las ampliaciones y los cambios que alteren de manera substancial el proyecto original que se realicen, también se sujetarán al proceso de evaluación que corresponda.

Art. II.380.19.- EXIGENCIA.- Se precisará de una Declaración Ambiental (DAM) previo a la realización de cualquier obra, actividad o proyecto, que a pesar de generar impactos ambientales no sea uno de los casos previstos en el Art. II. 380. 5, ni produzca los efectos previstos en el Art. II.380.6 de este capítulo.

Art. II.380.20.- CONTENIDO.- La DAM tendrá el siguiente contenido:

a.- Introducción y objetivos.

b.- Descripción detallada del tipo de obra, actividad o proyecto a realizar, en la que se identifiquen y describan los potenciales impactos ambientales que tendría.

c.- Explicación y justificación técnica de que la obra no producirá los efectos que, según este capítulo, ameritan la realización de un Estudio de Impacto Ambiental (EslA).

d.- Descripción detallada de las medidas a tomar, a fin de mitigar los impactos identificados.

e.- Declaración juramentada del proponente del cumplimiento de las medidas propuestas en la DAM.

Art. II.380.24.- CERTIFICADO AMBIENTAL.- Una vez verificado lo prescrito en el artículo anterior, la Dirección Municipal del Medio Ambiente (DMMA) emitirá el Certificado Ambiental correspondiente, en un plazo igual al del artículo anterior, destacando que la misma ha sido concedida con mérito en una DAM, el pago del certificado ambiental y el registro de la acción propuesta.

Si la actividad, obra o proyecto fuere de aquellos que requieren un EsIA en vez de una DAM, la DMMA lo declarará y mandará hacerlo.

Art. II.381.13.- SUJETOS DE CUMPLIMIENTO.- Sin perjuicio de la existencia de otras actividades, obras o proyectos que ocasionen un impacto ambiental significativo y entrañen un riesgo ambiental, son sujetos de cumplimiento y presentación de Auditorías Ambientales, de manera específica e ineludible, los siguientes casos:

- e) El funcionamiento y operación de plantas siderúrgicas que:
- Realicen procesos de galvanoplastia (galvanizado de piezas metálicas, niquelado, cromado, decapado, etc.).
 - Realicen procesos en seco (fundición, elaboración de productos metálicos), excepto los talleres artesanales que cuenten exclusivamente con hornos o equipos eléctricos o que funcionen con GLP para el desarrollo de su proceso productivo.

Art. II.381.15- PLAN DE MANEJO AMBIENTAL (PMA).- El PMA deberá estructurarse sobre la base de las acciones que el regulado determine para mantenerse en cumplimiento de la normatividad ambiental vigente, contendrá entre otros un programa de monitoreo y seguimiento que ejecutará el regulado, que establezca los aspectos ambientales, impactos y parámetros ambientales a ser monitoreados, la periodicidad de estos monitoreos, la frecuencia con que deben reportarse los resultados a la ES y deberá sujetarse a los lineamientos establecidos por DMMA.

El PMA deberá estar sustentado en un cronograma para su implementación y sobre la base del principio de gradualidad consignado en este capítulo. El PMA

y sus actualizaciones aprobadas, tendrán el mismo efecto legal para la actividad que las normas técnicas ambientales.

El PMA a ser presentado por el regulado, contendrá al menos los siguientes componentes:

- Programa de Prevención y Reducción de la Contaminación.
- Programa de Manejo de Desechos Sólidos no domésticos.
- Plan de Contingencias.
- Programa de Monitoreo Ambiental, con énfasis en los ámbitos de afectación directa del proyecto.
- Plan de Seguimiento.
- Programa de Comunicación, Capacitación y Educación.
- Programa de Relaciones Comunitarias, en caso de denuncias o uso de suelo prohibido.

Las guías para la presentación del PMA y sus componentes, formarán parte del instructivo de aplicación del presente capítulo que dictará la DMMA.

Con lo anteriormente descrito, el Laboratorio debe efectuar una Revisión Ambiental Inicial (RAI), para proceder a elaborar un Sistema de Gestión Ambiental (SGA) y presentar un Plan de Manejo Ambiental (PMA), con conocimiento de las autoridades de la Escuela, para obtener una Licencia otorgada por el Municipio; y, posteriormente aprender a manejar Indicadores de Desempeño Ambiental (IDA).

6.3 NORMAS DE SEGURIDAD INDUSTRIAL.

Se encuentran en vigencia las siguientes normativas para seguridad industrial, que se encuentran homologadas por el INEN. Son las siguientes ⁽⁴²⁾:

- 0092:75 Clasificación de los fuegos.
- 0440:84 Colores de identificación de tubería.

- 0439:84 Colores, señales y símbolos de seguridad.
- 0744:87 Equipo contra incendios. Vestimenta resistente al calor.
- 006:09 Extintores portátiles para protección contra incendios,
- 0739:87 Extintores portátiles. Inspección, mantenimiento y recarga.
- 2068:03 Equipos de protección respiratoria. Requisitos y definiciones.
- 0441:84 Identificación de cilindros que contienen gases industriales.
- 1154:84 Iluminación natural para talleres. Requisitos.
- 13460:2010 Mantenimiento. Documentación.
- 15341:2010 Mantenimiento. Indicadores clave de rendimiento.
- OHSAS 18001:2010 Sistemas de gestión de seguridad y salud en el trabajo. Requisitos.

6.4 ENSAYOS DE LOS ACEROS.

Cuando un técnico proyecta una estructura metálica, diseña una herramienta o una máquina, define las calidades y prestaciones que tienen que tener los materiales constituyentes. Como hay muchos tipos de aceros diferentes y, además, se pueden variar sus prestaciones con tratamientos térmicos, se establecen una serie de ensayos mecánicos para verificar principalmente la dureza superficial, la resistencia a los diferentes esfuerzos que pueda estar sometido, el grado de acabado del mecanizado o la presencia de grietas internas en el material, lo cual afecta directamente al material pues se pueden producir fracturas o hasta roturas...

Hay dos tipos de ensayos, unos que pueden ser destructivos y otros no destructivos ⁽⁴³⁾.

6.4.1 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.

Los ensayos no destructivos son los siguientes:

- Ensayo microscópico y rugosidad superficial, mediante microscopios y rugosímetros.
- Ensayos por ultrasonidos.
- Ensayos por líquidos penetrantes.
- Ensayos por partículas magnéticas.
- Ensayo de dureza (Brinell, Rockwell, Vickers). Mediante durómetros.

6.4.2 ENSAYOS DESTRUCTIVOS.

Los ensayos destructivos son los siguientes:

- Ensayo de tracción con probeta normalizada.
- Ensayo de resiliencia.
- Ensayo de compresión con probeta normalizada.
- Ensayo de cizallamiento.
- Ensayo de flexión.
- Ensayo de torsión.
- Ensayo de plegado.
- Ensayo de fatiga.

Todos los aceros tienen estandarizados los valores de referencia de cada tipo de ensayo al que se le somete.

6.4.3 OTROS ENSAYOS.

Se puede clasificar en cuatro grupos:

- Ensayos físicos. Además de los ensayos ya descritos anteriormente, se hacen necesarios en muchas ocasiones los ensayos de deformación por tratamiento térmico, resistencia al desgaste, maquinabilidad, colabilidad.
- Ensayos químicos. Son destinados a determinar la composición cualitativa y cuantitativa de los aceros, estos incluyen resistencia a la oxidación y a la corrosión, resistencia a álcalis.
- Ensayos físico-químicos. Sirven para determinar el tamaño del grano, para determinar segregaciones, ensayos de composición determinantes para elementos de aleación.

- Ensayos eléctricos. Permiten determinar la permeabilidad, inducción, magnetismo remanente, pérdidas por histéresis, fuerza coercitiva.

6.4.4 PROPÓSITO DE LOS ENSAYOS ⁽⁴⁴⁾.

Estos experimentos consumen tiempo y dinero, pero es necesario invertir para que la incertidumbre disminuya a través de un análisis estadístico, por lo que se debe tener nociones de valor mínimo, valor mínimo garantizado y valor seguro en ausencia de falla. Estos conceptos no son exactos, pero representan un trabajo de ingeniería confiable, porque cualquier discrepancia entre el valor experimental y de desempeño se resolvieron recurriendo a la naturaleza como juez final. En la actualidad la consistencia natural es estable en cuanto a la varianza pero no respecto a la magnitud. La evidencia reunida en mediciones es una mezcla de efectos sistemáticos y aleatorios, que pueden resolverse en forma estadística, por lo que para resolver incertidumbres se requieren muchos ensayos de diverso tipo, solo con el fin de recaudar información.

Esta información ayuda al ingeniero metalúrgico a hallar soluciones y llegar al objetivo de encontrar el proceso adecuado para fundir determinada especie química de acero, y al mismo tiempo anima a investigar otras posibles maneras de hacerlo, creando nuevos procesos y desarrollando nueva tecnología y nuevos equipos de fundición. Este conocimiento, al final se traduce en mayores ingresos económicos y sociales.

En resumen, los ensayos se realizan para:

- Determinar las sustituciones de unos materiales por otros de mayor rendimiento.
- Determinar el proceso de fabricación más apropiado para emplearse.
- Determinar el empleo de nuevos tipos de acero, previo estudio de su conveniencia.
- Determinar la calidad del producto durante todo el proceso de fundición y del producto ya terminado.

6.4.5 POLÍTICA ESTADÍSTICA DE UN LABORATORIO ⁽⁴⁵⁾.

Una verdad que se afronta es que una ecuación no implica un conocimiento cabal de la naturaleza o de sus consecuencias. La precisión aritmética no equivale a la precisión del conocimiento. El interés estadístico es mejorar la confiabilidad de los datos recolectados en forma objetiva y enunciarlos como probabilidad.

La teoría de la decisión estadística, es un medio para direccionar decisiones ante incertidumbres planteadas, y discernir la conveniencia de una alternativa planteada, de acuerdo a la confiabilidad de los datos recolectados en ensayos practicados.

Un laboratorio requiere de métodos estadísticos con el fin de resolver necesidades de ingeniería, manufactura y economía. Esto se traduce como costo y calidad. Un laboratorio debe desarrollar un diseño estadístico de experimentos para lograr una ventaja en la cantidad y calidad de la información obtenida del trabajo experimental y de la precisión manejada.

Se debe manejar conceptos metrológicos como arreglo de lotes y de equipos, ajuste de curvas y regresión lineal, aplicación de números aleatorios y simulación de procesos. Estos conceptos deben manejarse porque cada especificación de un producto implica un procedimiento de prueba para detectar si se cumple la especificación requerida. El muestro es un tema habitual para todos los que trabajan con materiales, agregando temas como control de calidad y aseguramiento de la calidad que son esenciales en la etapa de producción.

Finalmente, se debe desarrollar la investigación de operaciones, que ve a los sistemas como un todo, en forma no cuantitativa, y que sirve para desarrollar varios puntos de vista.

En conclusión, hay consistencias naturales que al ser atendidas minuciosamente revelan la variabilidad individual y la regularidad a largo plazo. La variación es omnipresente. La estabilidad no es propia de una sola magnitud, es una mezcla de efectos sistémicos y aleatorios. La estadística permite separar y mediante el empleo adecuado de la información, se descubre

la posibilidad de algo que sea cierto. Esto permite construir conocimiento científico y tecnológico.

6.4.6 TÉCNICAS DE MUESTREO ⁽⁴⁶⁾.

Generalmente se utiliza el muestreo cuando no es posible medir todos los elementos de la población. Se establece un diseño muestral debido al objetivo de la investigación, distribución de los elementos de la población, confiabilidad esperada de los resultados, disponibilidad de la información, costo de recolección de datos, análisis de la información.

El método aplicado en laboratorios, es por excelencia, el muestreo aleatorio o de probabilidad.

Este muestreo puede ser:

- Muestreo simple, es decir utilizando números aleatorios establecidos en tablas.
- También se puede aplicar un muestreo sistemático, estableciendo un intervalo uniforme en el tiempo.
- Muestreo estratificado, dividiendo al lote en grupos y extrayendo un número de elementos iguales para obtener información.
- Muestreo en racimos, dividiendo en grupos y extrayendo aleatoriamente elementos de estos grupos.

El tamaño de muestra depende de la confiabilidad requerida y del error prefijado o estimado. Estos datos ayudan a que el estudio tenga una probabilidad de suceder, si se emplea la misma técnica en la fabricación de un producto.

CAPÍTULO VII

ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD EN LA FUNDICIÓN DE ACERO.

7.1 RESPONSABILIDAD.

Una organización consta fundamentalmente de una infraestructura y una estructura. La infraestructura es lo físico y la estructura es el equipo humano debidamente organizado.

En una estructura debe haber:

- Sistema de gestión, que es empleada para desarrollar e implementar políticas y gestionar sus aspectos. Toda actividad humana genera impactos, que se evalúan como significativos, medios o insignificantes.
- Objetivo organizacional, que es el propósito o fin que se establece y sea coherente con las políticas implementadas. Toda organización debe tener un objetivo, los cuales establecen niveles de desempeño.
- Indicadores de desempeño, que son las expresiones específicas que proporcionan información sobre el desempeño organizacional e individual. Estos indicadores tienen varios componentes: fórmula de cálculo, nombre, frecuencia, fuente de información, meta, norma aplicada y un responsable.

Debido a que se manejan indicadores de desempeño bajo un responsable, se establece un enfoque de calidad total, que es un sinónimo de aprendizaje, administración y retroalimentación. No confundir con inspección y verificación, estos son aspectos estadísticos. El concepto de control significa mantenimiento y mejoramiento de los procesos, expresados en el círculo de calidad (planificar, hacer, verificar, actuar) de Deming.

Para implementar un control de calidad se debe:

- Elegir que se va a controlar.
- Elegir la unidad de medida.
- Establecer las mediciones.
- Establecer estándares de rendimiento.
- Establecer un análisis de diferencias entre lo real y el estándar.

- Actuar sobre la diferencia.

El sistema de control de calidad establece ⁽⁴⁷⁾:

- Todos los integrantes comparten la responsabilidad de la garantía de la calidad en sus niveles y funciones.
- La alta dirección (presidencia, gerencia, jefatura, dirección) participa en las decisiones de nivel de calidad y en las auditorías de calidad.
- Todo el personal participa en las actividades de aseguramiento de la calidad.
- Se organiza programas de entrenamiento para proveedores y realizar compras de calidad.
- Se identifica y obtiene materiales que se requiere para obtener un nivel de calidad establecido, que no es un nivel óptimo ni mínimo.
- Se diseña y fija los niveles de calidad y las facilidades de producción.
- En la producción, todos son los encargados de construir la calidad deseada.
- Se identifica la demanda de calidad y se transmite esa información a toda la estructura.

7.1.1 PRINCIPIOS GENERALES DEL CONTROL DE CALIDAD ⁽⁴⁸⁾.

- Priorización.
- Estratificación.
- Relación causa-efecto
- Estandarización.
- Decisiones fundamentadas en hechos y datos.
- Actividades organizadas.

Una estructura necesita generar nuevos conocimientos desarrollando el potencial creativo de todos sus integrantes, lo que genera un mayor valor agregado por el conocimiento, nuevas técnicas y nuevas prácticas de mejoramiento de la calidad. Hay varias herramientas: seis sigma, manufactura esbelta, despliegue de funciones de calidad, teoría de restricciones, modelos de premios, diseño robusto, diseño inteligente y diseño concurrente.

7.1.2 IMPORTANCIA DEL CONTROL Y ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD ⁽⁴⁹⁾.

- La esencia está en la innovación y el mejoramiento continuo.

- El diseño y práctica de estrategias que mejoren la posibilidad de mercado de una organización frente a sus competidores.
- La rentabilidad y confianza de una organización está relacionada con las utilidades generadas, es decir con el nivel de riqueza generado.
- Todas las etapas anteriores conducen a que una organización crezca y no sobreviva. Es decir, permanece y supera. La calidad no es asunto de dinero, es una forma de vida.

En una organización, las personas ejercen diariamente funciones operativas o gerenciales dentro de una estructura. Las funciones operativas son las que más consumen tiempo y están orientadas para cumplir estándares. En el mejoramiento continuo, se establecen nuevos estándares o mejorar los existentes. Las funciones gerenciales tienen esa finalidad y la capacidad de mover a las personas a alcanzar metas, utilizando el MASP (Métodos de Análisis y Solución de Problemas).

7.2 ACTIVIDADES.

Antes de proceder a fundir el acero en el horno de inducción, se recomienda reunir al personal involucrado a una reunión técnica previa o briefing.

El briefing es un anglicismo empleado en diversos sectores, sobre todo el militar. Se puede traducir briefing por informe o instructivo que se realiza antes del comienzo de una misión militar; es la sesión informativa que proporciona información al personal involucrado.

El briefing es la parte estratégica de la preparación de una acción. Es la elección ordenada, estratégica y creativa de los datos que permitirán definir los objetivos de forma correcta y medible. Es un documento escrito donde se debe poner toda la información necesaria para dejar claras las diferencias y definir lo que se quiere conseguir. Lo crea el cliente con su información del producto. Es un documento resumen, muy sintético, que facilita la labor del personal.

Este documento consta de las siguientes partes:

- **Apreciación de la misión.** Estos son los datos iniciales dados por el cliente a la alta dirección. Figura su especificación, número de unidades, composición requerida, geometría. Esta acompañado de planos o bosquejos. Es el objetivo al cual se quiere llegar y donde está sugerida la estrategia para llegar a la meta. Constan delegaciones, adiciones de

personal y sus funciones bien detalladas. Se explica las normas que van a aplicarse, el tipo y el número de probetas para los ensayos respectivos. También se adiciona un cronograma de tiempos y un presupuesto.

- Reconocimiento preliminar. Aquí se elabora una lista de chequeo que indica la situación preliminar de los equipos, insumos y materiales que se utilizarán en el proceso. Se efectúan las acciones necesarias para que los distintos equipos y materiales estén disponibles y confiables.
- Completación del plan. Con la información proporcionada en el reconocimiento se completa el procedimiento. Se establece un diagrama de flujo con las actividades y los responsables. Se hacen las primeras acciones para que el proceso de fundición esté puesto a punto. Se realiza una última inspección de equipo, insumos, materiales y personal.
- Ejecución. Se expide la orden de trabajo, se llena la bitácora respectiva.
- Control. Al final de la operación, se realiza una reunión final para evaluar el procedimiento y los resultados obtenidos. Estas observaciones se las transcribe y se obtiene un documento de respaldo para el archivo técnico. Sirve para evaluar al personal, a los insumos y a los equipos.

El documento técnico final se cierra al finalizar el procedimiento y se adiciona los informes de control de calidad, de análisis químico y de los ensayos realizados a las probetas.

7.2.1 CHECK LIST.

El check list es una revisión inicial que permite identificar:

- Los aspectos de la operación.
- Los requisitos descritos en normas y buenas prácticas de manufactura.
- El compromiso del personal.
- Las prácticas de gestión existentes.

Esta información es la base para elaborar el sistema de gestión del laboratorio. Esta lista de chequeo, publicada como informe, es un documento que debe incorporarse al documento técnico final. Esta lista informa las condiciones en las cuales se realizó la operación de fundición.

En los anexos se encuentra detallado el check list para iniciar una operación de fundición en el laboratorio.

7.2.2 MATRIZ DE ASPECTOS E IMPACTOS.

El propósito de esta matriz es la categorización de los aspectos involucrados durante el proceso de fundición y el impacto que causa en la ejecución del mismo, la cual debe ir actualizándose en cada operación.

Se establece la condición de cada actividad realizada durante el procedimiento como normal (N), anormal (A), de parada (S), de arranque (R) y de emergencia (E). Cada actividad se evalúa su probabilidad y la severidad sobre una escala de 10.

Dentro de la probabilidad se busca un valor para la frecuencia, competencia, documentación del procedimiento, formación del personal, aseguramiento de la responsabilidad, estado de los equipos y desempeño del proceso.

Dentro de la severidad se da valores al tiempo de duración, facilidades de control, facilidades de mitigación, recursos económicos involucrados.

Al final se combinan ambos índices y se emite un significado del índice, comúnmente en 4 categorías en forma descendente (AA, A, B, BB). Este índice permite tener un panorama respecto a normativa vigente. Es la base para un análisis de diferencias, además de programar la mitigación de los impactos producidos durante el proceso de fundición.

7.2.3 POLÍTICAS DE FUNDICIÓN.

Una política es la declaración de intenciones y principios de una organización en relación con su comportamiento general, y que proporciona un marco para su actuación y establecer sus objetivos y metas operacionales.

Debe tener las siguientes características:

- Sea apropiada para la naturaleza, escala e impactos de sus actividades, productos o servicios.
- Incluya un compromiso de mejoramiento continuo y prevención de contaminación y riesgos.
- Incluya un compromiso de cumplimiento con la legislación y regulación de índole ocupacional, medioambiental, operativa y seguridad industrial.

Los requisitos que constan en la Matriz de Políticas se los obtiene de las revisiones iniciales, tomando en cuenta los siguientes aspectos:

- Aspectos relacionados a la parte operativa.
- Aspectos relacionados a requisitos de las partes interesadas.

- Aspectos legales y normativos de salud ocupacional, medioambiente, prácticas de manufactura y seguridad industrial.

Estas políticas se redactan a cada valor máximo que se presentan en la matriz, y corresponderán a los requisitos y directrices planteadas por la alta dirección.

Esta matriz de políticas consta de:

- Directrices. Son realizadas en base a la misión de la organización, y se toman de los análisis de diferencias.
- Objetivos. Son las metas hacia dónde va la organización.
- Sistemas indicadores. Es la cuantificación de los objetivos.
- Fórmula. Es la manera como se calculan los diferentes parámetros.
- Frecuencia. Determina el intervalo de tiempo en que se realizan los cálculos necesarios.
- Fuente de información. Es aquella que proporciona los datos requeridos.
- Estándar. Es una ponderación de los indicadores.
- Meta. Son situaciones de control para llegar al objetivo planteado.
- Tendencia. Se constituye como una ruta que está siguiendo determinado sistema de gestión.
- Responsable. La persona encargada de cumplir una tarea asignada.
- Programas. Son eventos que permiten llegar a un objetivo, o permiten corregir tendencias.
- Procesos. Son conjuntos de actividades que se realizan para cumplir los objetivos.

7.2.4 INFORME DE LA REVISIÓN INICIAL.

Es un documento que permite identificar las condiciones en las que se desenvuelve el procedimiento de fundición. La base de este informe es la check list establecido anteriormente.

Para la elaboración de este informe se sigue el siguiente diagrama de flujo:

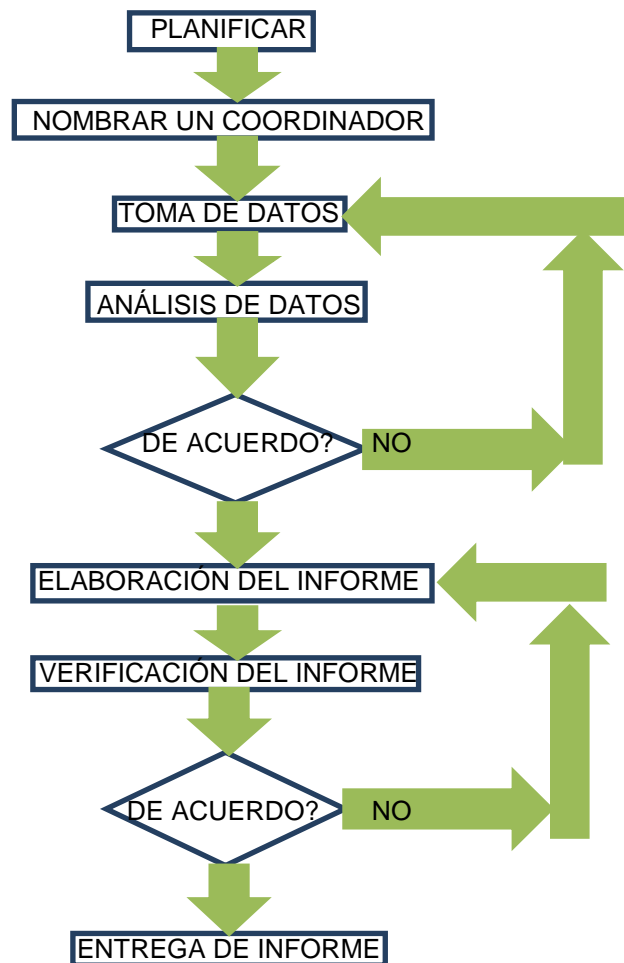


FIGURA 7.1: Diagrama de flujo para elaborar el informe de la revisión inicial.

7.3 ANÁLISIS DE DIFERENCIAS.

Es un proceso para determinar diferencias entre lo existente y lo que es necesario cumplir. Las razones para este análisis son:

- Mejorar el desempeño ocupacional, ambiental, socio-económico, operativo y de seguridad industrial.
- Establecer las inversiones necesarias para asegurar la calidad del producto o servicio.
- Demostrar a las partes interesadas (las que sufren los impactos) su compromiso ambiental, operativo, ocupacional, gerencial, financiero y de seguridad industrial.
- Contribuye a mejorar la imagen.
- Posibilita el acceso a capitales de inversión.
- Estimula la participación del personal en entes proactivos.
- Acceso a mercados cada vez más competitivos.
- Facilita el control de los mercados y ponderar sus tendencias.

- Reduce el riesgo de diversa naturaleza. Se tiene un sistema de gestión preventivo y posteriormente predictivo.
- Se optimizan los procesos.
- Racionalización del uso de los recursos.
- Cumplir de manera persistente los aspectos legales.
- Brinda nuevas posibilidades frente a competidores.

Un análisis de diferencias del laboratorio se encuentra en los anexos adjuntos.

7.4 PLAN DE IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE GESTIÓN.

Lo eficaz de un sistema de gestión permite conseguir unos clientes fidelizados, el cumplimiento de la legislación laboral y de prevención de riesgos laborales, así como una gestión justa y ética de los recursos humanos que propicie trabajadores calificados y motivados; mientras que la gestión medioambiental permitirá que la sociedad se vea favorecida por un trato de las personas y estructuras, en forma responsable con el medio ambiente.

Todo ello, conjuntamente, permite una innovación, mejora y aprendizaje continuos, de modo que se produce un desarrollo sostenible.

Este sistema de gestión comprende los siguientes aspectos⁽⁵⁰⁾:

-Sistema de gestión de calidad:

- Calidad en el producto. Aspectos como control de calidad, aseguramiento de la calidad, calidad total.
- Calidad en el servicio. Servicio de atención al cliente, servicio de post venta, disponibilidad y facilidades.
- Seguridad de autoría intelectual y calidad en las patentes. Es un carácter legislativo sobre propiedad intelectual.
- Calidad por procesos. Identificación de actividades clave de funciones, matriz de prioridad de actuación, parametrización de recursos, análisis de riesgo.

-Sistema de gestión de prevención de riesgos laborales:

- Legislación sobre prevención de riesgos laborales.

- Seguridad y salud ocupacional. Actividades preventivas para evitar riesgos.
- Ergonomía. Comodidad en el trabajo.
- Psicología aplicada. Análisis de condiciones de trabajo.
- Planes de prevención.
- Evaluación de riesgos.
- Planificación de actividades preventivas.
- Información y consulta a trabajadores.
- Plan de emergencia y manual de autoprotección.
- Vigilancia de la salud ocupacional.

-Sistema de gestión ambiental:

- Producción integrada.
- Gestión ecológica de recursos.

El desarrollo de la implementación del plan de gestión debe ser en forma íntegra. Los tres aspectos deben integrar una matriz estructurada de trabajo lógico.

La matriz es la siguiente:

TABLA 7.1: Matriz del plan de implementación de un sistema de gestión integral.

OBJETIVOS	INDICADORES	MEDIOS DE VERIFICACIÓN	SUPUESTOS
FIN. Misión.	Efectos e impactos	Archivos de matrices de políticas.	Dificultad sistemática.
PROPÓSITO: Objetivo general.	Resultados.	Archivos de indicadores de gestión.	Dificultad político social.
COMPONENTES: Objetivos específicos.	Productos o servicios.	Archivos de desarrollo de productos.	Dificultad material, ambiental, tecnológico.
ACTIVIDADES: Tareas	Costo y conocimiento.	Registro contable y científico.	Dificultad económica y científica.

7.5 FORMATOS.

Los formatos establecidos se encuentran en los anexos correspondientes. Se establece la siguiente documentación para establecer un procedimiento de fundición:

- Documento del informe final de la revisión inicial.
- Orden de trabajo con el procedimiento detallado.
- Plano de taller y descripción del modelo. Tipo de molde.
- Hoja de bitácora.
- Hoja de procesos.
- Informe de ensayos realizados a probetas testigo.

7.6 FUNDICIONES REALIZADAS EN EL LABORATORIO.

Para la secuencia de operaciones de fundición, se aplicó la siguiente metodología en el horno de inducción del laboratorio:

- Estado inicial del horno, se cambió el refractario del crisol de acuerdo al plano dado por el fabricante Inductotherm. Se aplicó cemento refractario Concrax 1700 y se lo sinterizó. La sinterización final se realizó una fundición de aluminio. La bitácora correspondiente se encuentra en el Anexo C.4. Bitácora LF001. Las fotografías del horno están en el Anexo B. También se elaboró un formato de bitácora, que consta en el Anexo C.2.
- Balance energético del horno. Aprovechando la fundición de latón, se estableció un procedimiento para obtener el balance energético. La bitácora correspondiente es LF002 del Anexo C.4. Con los datos obtenidos se estableció el balance energético del horno, el cual está representado en el diagrama Sankey del capítulo 4.
- Matriz de Aspectos e Impactos inicial del laboratorio. La tercera fundición se realizó con chatarra clasificada de acero, de acuerdo al criterio establecido en el capítulo 3. Se entregó al Jefe de Laboratorio un Informe Preparatorio que consta en el Anexo C.5. La matriz consta en el Anexo C.3. Para establecerla, no se notificó a ninguna persona sobre la intención de medir su gestión en un proceso previamente establecido. Esta fundición se encuentra documentada con fotos y video; las fotos

están en el Anexo A. La fundición está documentada en la bitácora LF003 del Anexo C.4.

- Diagrama de Proceso. La misma fundición permitió establecer posteriormente el diagrama que está en el Anexo C.7. En esta fundición se logra establecer la frecuencia límite de operación, en 2700 Hz para el acero, a un 80% de su capacidad. Se fundieron lingotes de acero para la siguiente fundición. Uno de estos lingotes sirvió para establecer la composición química, que resultó muy similar a la del acero ASTM A36 para placas menores de $\frac{3}{4}$ de espesor. Este detalle está en el Anexo D.5.
- Simulación de Proceso completo. Para la cuarta fundición, que sería la segunda de acero, se elaboró con anterioridad un Check List. Este documento consta como Anexo C.1. También se elaboró en Inventor una pieza para ser fundida, cuyo plano está en el Anexo C.6 como Plano de Taller, la pieza se fabricó en espuma de polietileno y se simuló con aluminio el colado de la misma. Así mismo, se elaboró un Informe Preparatorio, que consta en el Anexo C.5. La operación se encuentra documentada con 2 videos y la bitácora LF004 del Anexo C.4.

7.7 ENSAYOS REALIZADOS A PROBETAS.

En la tercera y cuarta fundición se prepararon probetas. En la tercera fundición, la probeta se realizó solo para comprobar la composición química.

- Además de la pieza, se preparó una probeta testigo de acuerdo a la norma INEN NTE ISO 377. Esta probeta sirvió para el ensayo de tracción, observar la metalografía obtenida y establecer la composición química. Para este efecto se adicionó ferroaleaciones para que la colada resultante se pareciera a la composición del Acero ASTM A588 Grado B, el cual mantenía el contenido de carbono. Solo se logró adicionar cromo y cobre, en los porcentajes establecidos en la norma, porque los demás aleantes no existen en el laboratorio. La chatarra en su mayoría procedía de la fundición anterior, cuya composición se sabía de antemano. La probeta luego de solidificada, se la limpió y se la dejó enfriar en el interior del horno, con el crisol tapado, simulando un normalizado.

- La composición química se estableció mediante espectrometría, en el Laboratorio de Espectrometría de la Facultad de Ciencias, utilizando un espectrógrafo LIPS, comparando los espectros del acero A36 con el espectro de la colada obtenida. Los resultados se encuentran en el Anexo D.1.
- Para el ensayo de tracción se estableció el parámetro de comparación la norma ASTM A588. El informe del ensayo realizado se encuentra en el Anexo D.3.
- También se efectuaron metalografías para comparar las fundiciones de acero realizadas. Estas fotografías se encuentran en el Anexo D.2.
- Finalmente, con las experiencias realizadas, se realizó la Hoja de Procesos con método propuesto, para realizar una operación de fundición de acero de medio carbono en el horno de inducción del laboratorio. Esta hoja está en el Anexo C.8.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

1.- ANÁLISIS DE RESULTADOS.

- Se recicla chatarra de acero en los países que no disponen de reservas de mineral de hierro, con procesos que se llevan a cabo en hornos eléctricos. El horno más usado es el de arco eléctrico.
- El acero es una solución de hierro y carbono, en la que intervienen otros elementos como Mn, P, N, Nb, V, Ni, Cr, Mo, B, U, Si, Al, S, Te, Bi, Se, W, Th, Pd, Pt, Co, Ti, Zr, Ce, Cu, H y elementos residuales que deben ser eliminados como Sn, As, Sb, Pb. Una aleación representa un estudio minucioso, de carácter científico, aspecto que sale del alcance de este trabajo.
- La aceración es un proceso de refinación que emplea la oxidación, eliminando impurezas de un líquido, jugando con la afinidad química de un óxido y la del hierro. Los elementos con más afinidad por el oxígeno se oxidarán, y los que tengan menor afinidad que la del hierro quedarán atrapados. Estos datos están graficados en el diagrama de Ellingham.
- El óxido más efectivo para realizar la desoxidación es el óxido de aluminio, el cual atrapa inclusiones, las cuales pueden flotar hacia la escoria a bajas temperaturas. El proceso de desoxidación se realiza para reducir carbono, azufre, fósforo, hidrógeno, nitrógeno y silicio especialmente.
- En un horno de inducción, para aumentar la potencia transmitida a la carga se debe jugar con la frecuencia, sin sobrecargar los tiristores, y con la altura de bobina adecuada. Estos parámetros inciden en la penetración de las corrientes parásitas que sirven para el calentamiento de la carga. Además aumenta el tamaño del campo magnético.
- La resistividad de la carga juega un papel importante en la transmisión de potencia a la carga. Una resistividad baja conlleva una baja potencia de arranque. La resistividad aumenta con la temperatura y este mecanismo favorece la fusión.
- En materiales magnéticos se puede jugar con la frecuencia y la permeabilidad magnética, operando a baja frecuencia hasta el llamado

punto de Curie (para el acero es 730 °C) y por encima de éste se opera a mayor frecuencia. El punto de Curie es la temperatura a la cual un material se transforma de magnético en amagnético.

- Todo horno de inducción tiene una frecuencia mínima de operación, debido a un factor de tamaño del crisol que incide en la penetración del campo en la carga. Además el horno dispone de una altura de carga mínima de operación.
- Para mejorar el rendimiento del horno se toma en cuenta el factor de llenado, esto quiere decir que la carga debe ser lo más compacta posible y evitar una permeabilidad magnética elevada, lo que obliga a elevar la frecuencia y mayor consumo de energía.
- Antes de proceder a fundir la chatarra de acero, someter previamente, a un proceso de clasificación y limpieza. En algunos países se ha emitido una normativa técnica respecto a transporte, embalaje, clasificación, definición de material ferroso y no ferroso. Se ha normado para racionalizar el uso de materia prima, palanquilla, energía, productividad, manejo de residuales y precio.
- La chatarra de acero proviene de 3 grupos: de reciclaje, de transformación y de recuperación. En otras palabras, proviene de rechazos, de residuos y de despieces. Los residuos deben clasificarse de acuerdo a su composición y por tamaño. En la norma INEN la clasificación se hace por tamaño y espesor, sin especificar su composición.
- Generalmente usar fundente básico como la cal en forma de carbonato o cal viva. La sílice proviene del recubrimiento del horno. Se añade sílice si existe un exceso de cal. Las ferroaleaciones se añaden para dar o mejorar propiedades físico químicas a la colada, y así mejorar propiedades mecánicas a la pieza solidificada. Se añade, en algunos casos, carburo de calcio para controlar el contenido de azufre en la colada. Para recarburar se utiliza grafito.
- Impulsar gases en la colada facilita la homogenización de la mezcla. Se realiza mediante lanzas consumibles. Los gases utilizados son Ar, N y/o

- O. En el horno de inducción no se impulsan gases, debido a que el efecto de remover la colada se efectúa por inducción magnética.
- En el horno de inducción existen pérdidas de calor por conducción, convección y por radiación. Estos datos sirven para realizar el balance térmico correspondiente y hallar el rendimiento térmico del horno.
 - El proceso de fusión consta de dos fases claramente diferenciadas: la de fusión propiamente dicha, y la de afino. La fase de afino se realiza en dos etapas: en el propio horno y en la cuchara. Se utilizan en la industria siderúrgica instrumentación de análisis en un corto tiempo. Para la fase de afino se emplean métodos de desgasificado a presión atmosférica o al vacío. La fase de afino se denomina metalurgia secundaria.
 - El acero debido a su amplio campo de aplicación, tiene normativa técnica que incluye desde el punto de vista metalúrgico y de composición química, hasta técnicas de conformado por virutaje o soldadura. Además, existe normativa sobre productos, desechos y reciclaje. Esta normativa tiene carácter obligatorio, a nivel mundial, regional y nacional. Existe normativa de carácter ambiental para acererías e instalaciones relacionadas.
 - Los ensayos a los que se somete probetas de productos representan un trabajo de ingeniería confiable, y sirven para resolver diferencias entre valores experimentales y los valores de desempeño, resuelto en términos estadísticos.
 - El objeto de que se realicen pruebas de ensayo a productos de fundición se debe a las exigencias del producto planteadas por el cliente. Estas exigencias determinan las operaciones que se deben realizar, los equipos e insumos que se necesitan y el personal involucrado en el proceso.
 - Para garantizar una operación se debe detallar el procedimiento en documentos plenamente identificados y conocidos por el personal involucrado. Cada miembro tiene asignado una responsabilidad en la gestión de calidad del proceso. Esta responsabilidad se expresa en indicadores de desempeño. El fin de estos indicadores es mejorar la matriz de aspectos e impactos, que es el documento calificador de una

gestión de calidad. Esta matriz induce a la alta dirección, la aplicación de políticas de gestión para fundición. Además, la alta dirección debe manejar un análisis de diferencias entre lo existente y que es necesario cumplir.

- No existe un mejor proceso de afinamiento, depende del tipo de acero que quiera obtener. Aunque mejores resultados se obtienen con el desgasificado al vacío, sin impulsión de gases en la colada.
- Para la descarburación, el proceso que mejor se adapta al laboratorio es la que se realiza con impulsión de oxígeno y argón, llamado proceso CAS-OB, que puede realizarse en vacío o al ambiente, dependiendo de las exigencias que tenga el tipo de acero que se quiera obtener.
- Para el análisis químico requerido para ajustar la composición química del acero, el más rápido es utilizando LIPS (Espectrómetro de Plasma Inducido por Laser), debido a bajo costo y menor tiempo de operación, aunque se necesita tener un base de datos proveniente de muestras normalizadas (bajo normas ASTM), para que por comparación se obtenga la composición de la colada.

2.- CONCLUSIONES.

- En la práctica, se debe utilizar el Diagrama de Ellingham para el proceso de refinación (afino) del acero. Entonces, se toman medidas de la temperatura de la colada para tomar en cuenta la reactividad de las oxidaciones que puedan darse durante el proceso de fundición, en especial la del aluminio y la de los aleantes.
- Siempre controlar la cantidad de oxígeno disuelto en la colada. A simple vista, la colada está efervescente cuando hay oxígeno demás. Para este efecto introducir ferrosilicio y ferromanganeso, además aluminio para la desoxidación; ya para cambiar la acidez el carbonato de calcio. Este proceso permite atrapar inclusiones que flotan hacia la escoria, que luego será retirada.
- Durante el proceso de fundición, el personal encargado de la operación debe saber perfectamente el funcionamiento del horno de inducción, a fin que esté preparado ante cualquier eventualidad extraña al procedimiento a seguir. Este procedimiento debe ser explicado en una reunión técnica antes de la operación (briefing), como también debe explicarse las exigencias del producto y revisar la documentación respectiva.
- Así mismo, la persona que lidere la operación debe actualizar la Matriz de Aspectos e Impactos para calificar la gestión de la operación. Además, se debe tener actualizado el inventario de equipos e insumos para la operación de fundición de acero.
- El operador del horno de inducción debe saber manejar los parámetros físicos de la carga, los cuales sirven para regular el consumo de energía, la potencia transmitida y el tiempo de operación. Debe conocer los datos de operación del horno y llevar la bitácora de la operación. Con estos datos se puede realizar el balance energético del horno y planificar el mantenimiento del mismo.
- En el Ecuador existe una normativa para clasificar chatarra ferrosa, la cual no puede ser aplicada al laboratorio porque no considera la composición química de la misma. Debido a que este parámetro si

interesa al laboratorio, es necesario aplicar la metodología descrita en este trabajo para la clasificación de la chatarra.

- No impulsar gases en la colada, excepto si se requiere que el producto tenga un contenido menor de carbono que el de la chatarra. Para lo cual se debe hacerlo en un horno cuchara o en el crisol del horno operando a baja frecuencia (alrededor de 2000 Hz).
- Siempre se debe garantizar la calidad del proceso y del producto. Esta garantía va detallada en los ensayos de probetas extraídas de la colada preparada. Estos ensayos vienen detallados en normas ASTM o INEN. Estos resultados deben acompañar al informe final.

3.- RECOMENDACIONES.

- Equipar al laboratorio con instrumentos que permitan un estudio termodinámico para comprender los fenómenos que se producen con una probabilidad de tendencia en estado estable, debido a la imposibilidad de conservar una muestra líquida durante el ensayo de laboratorio y poder cuantificar los datos arrojados por esa muestra.
- Usar hornos de inducción con componentes electrónicos, conformados por tiristores (diodos SCR) y transistores de potencia tipo IGBT, debido a que el rendimiento y eficiencia de estos equipos han aumentado considerablemente.
- Usar hornos de inducción preferentemente a los de arco porque tienen rebatibilidad permanente, economía en gastos de funcionamiento por el bajo consumo de energía relativa, por ser menos riesgosos para la planta, no hacen ruido ni contaminación ambiental. Además, el líquido siempre está en agitación, lo que elimina el uso de gases inertes para remover la colada.
- Usar bancos de capacitores para elevar el factor de potencia por lo menos a 0.8. También obtener guías técnicas completas y un buen número de repuestos, especialmente tarjetas electrónicas, fusibles y sensores.
- Para cargar el horno, debe hacerse de tal modo que la carga sea lo más compacta posible. Procurar que el peso mínimo para operar el horno sea de 45 Kg de acero o su equivalente hasta llenar un tercio del volumen del crisol.
- Usar refractario ácido. Este refractario debe presentarse como cemento refractario que soporte 1700 °C de temperatura como mínimo. En el caso que el refractario sea neutro o con alto contenido de alúmina, se recomienda incorporar a la mezcla sílice para darle un carácter ácido.
- Antes de cada operación debe realizarse un mantenimiento preventivo del crisol y del sistema de enfriamiento, para evitar paradas por falla. Se recomienda establecer un programa de mantenimiento preventivo total del horno.

- Cortar la chatarra en dimensiones menores al diámetro del crisol del horno, para favorecer la compacidad de la carga, colocando primero elementos grandes y rellenando con elementos pequeños. La chatarra se clasifica en grados de composición. Se debe rechazar contaminantes y elementos indeseables expresados en la norma INEN NTE 2505.
- Al cargar el horno introducir un contenedor con carbonato. Este actúa como fundente y escoriante del acero.
- Después de la introducción de ferroaleaciones, se recomienda elevar la frecuencia del horno para homogenizar la colada y elevar la temperatura del horno. Así se evita la flotación de estos aditivos. Se recomienda la extracción rápida de la escoria para evitar la atenuación de los aditivos. Tener cuidado con la alarma de sobrecarga del tiristor. No barbotear gases en el interior de la colada.
- No sobrepasar el límite de potencia establecido. Este límite depende de la masa fundida. Para 80 Kg de acero, el límite es 1700 Hz de frecuencia.
- Si durante el proceso de afino se va realizar descarburación, se recomienda que la colada se trasvase a un equipo, en donde se realice la mencionada operación. Debido a que se produce una reacción exotérmica, en la que el horno tendría una energía adicional que deberá ser evacuada por el sistema de enfriamiento, en forma no uniforme sino de imprevisto, lo que acarrea problemas en el refractario. Además significa costo por evacuar esa energía adicional. Se recomienda la construcción de este equipo que tenga la misma capacidad del crisol del horno. Un diseño recomendado es el correspondiente a un proceso CAS-OB que se menciona en este proyecto.
- Someter las piezas fundidas a un proceso de normalización (annealing) para que no tengan una microestructura dendrítica. Este proceso es obligatorio después de cada fundición.
- Antes de cada proceso de fundición, se debe revisar los cálculos metalúrgicos correspondientes, y ajustarlos a los cambios que se puedan dar durante el proceso.

- En el caso que se requiera recarburar o elevar el contenido de carbono, utilizar fundición gris en la proporción y peso adecuados. No se recomienda grafito porque el proceso para hacerlo molecular es un poco largo y no se obtiene, a menudo, la solubilidad requerida.

BIBLIOGRAFÍA.

- (1) Peters A.; Producción siderúrgica; Editorial Limusa; México; 1987.
- (2) www.steeluniversity.org/steel.
- (3) www.steeluniversity.org/steel
- (4) www.steeluniversity.org/steel
- (5) www.steeluniversity.org/steel
- (6) www.steeluniversity.org/steel
- (7) www.steeluniversity.org/steel
- (8) www.steeluniversity.org/steel
- (9) www.steeluniversity.org/steel
- (10) Astigarraga J.; Hornos eléctricos de inducción; McGraw Hill; Bogotá; 1998.
- (11) Astigarraga J.; Hornos eléctricos de inducción; McGraw Hill; Bogotá; 1998.
- (12) Astigarraga J.; Hornos eléctricos de inducción; McGraw Hill; Bogotá; 1998.
- (13) Shakelford J.; Introducción a la Ciencia de Materiales, 4ta edición; Pearson; Madrid; 1998.
- (14) Astigarraga J.; Hornos eléctricos de inducción; McGraw Hill; Bogotá; 1998.
- (15) Astigarraga J.; Hornos eléctricos de inducción; McGraw Hill; Bogotá; 1998.
- (16) Astigarraga J.; Hornos eléctricos de inducción; McGraw Hill; Bogotá; 1998.
- (17) Astigarraga J.; Hornos eléctricos de inducción; McGraw Hill; Bogotá; 1998.
- (18) Astigarraga J.; Hornos eléctricos de inducción; McGraw Hill; Bogotá; 1998.
- (19) Astigarraga J.; Hornos eléctricos de inducción; McGraw Hill; Bogotá; 1998.
- (20) Incropera F.; Fundamentos de Transferencia de Calor; 4ta edición; Pearson; México; 1999.

- (21) Astigarraga J.; Hornos eléctricos de inducción; McGraw Hill; Bogotá; 1998.
- (22) Astigarraga J.; Hornos eléctricos de inducción; McGraw Hill; Bogotá; 1998.
- (23) Astigarraga J.; Hornos eléctricos de inducción; McGraw Hill; Bogotá; 1998.
- (24) www.ansi.org/standards
- (25) www.inen.gob.ec/pdfnorma2505
- (26) www.wikipedia.com
- (27) Tecnipres Ingenieros; Aceros, productos y derivados; Volumen 1; Bilbao; 2001.
- (28) Peters A.; Producción siderúrgica; Editorial Limusa; México; 1987.
- (29) www.steeluniversity.org/steel
- (30) Laboratorio de Fundición; Bitácora N02.7ene2011; 2011.
- (31) Shakelford J.; Introducción a la Ciencia de Materiales, 4ta edición; Pearson; Madrid; 1998.
- (32) Incropera F.; Fundamentos de Transferencia de Calor; 4ta edición; Pearson; México; 1999.
- (33) Fox R.; Introducción a la Mecánica de Fluidos; 4ta edición; McGraw Hill; México; 1995.
- (34) Peters A.; Producción siderúrgica; Editorial Limusa; México; 1987.
- (35) Decreto Ejecutivo 2393; Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional de los trabajadores; 1986.
- (36) Berciano JL.; Metalurgia Secundaria, Tomo 2; Universidad Politécnica de Madrid; Madrid; 2007.
- (37) Berciano JL.; Metalurgia Secundaria, Tomo 2; Universidad Politécnica de Madrid; Madrid; 2007.
- (38) www.wikipedia.com
- (39) www.asm-intl.org
- (40) www.inen.gob.ec
- (41) Ordenanza Municipal 213 del Distrito Metropolitano de Quito; 2007.
- (42) www.inen.gob.ec
- (43) www.wikipedia.com

- (44) Shigley J.; Diseño en Ingeniería Mecánica; 6ta edición; McGraw Hill; México; 2007.
- (45) Shigley J.; Diseño en Ingeniería Mecánica; 6ta edición; McGraw Hill; México; 2007.
- (46) Flor P.; Apuntes de Estadística; Escuela Politécnica Nacional; Quito; 2007
- (47) Kennedy M.; El desarrollo de productos en Toyota; Deusto; Madrid; 2007.
- (48) Flor P.; Apuntes de Gestión de Calidad; Escuela Politécnica Nacional; Quito; 2009.
- (49) Kennedy M.; El desarrollo de productos en Toyota; Deusto; Madrid; 2007.
- (50) www.wikipedia.com