



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN



**“ PROCESO GENERAL DE FABRICACION DE ACEROS
INOXIDABLES MEDIANTE CONVERTIDOR A.O.D.”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A

ROGELIO RUBEN SANTIAGO ALAMILLA

DIRECTOR DE TESIS

ING. FELIPE DIAZ DEL CASTILLO RODRIGUEZ

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEXICO

1995

FALLA DE ORIGEN



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLÁN

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JAIME KELLER TORRES
DIRECTOR DE LA FEB-CUAUTITLÁN
P R E S E N T E .



DEPARTAMENTO DE
EXÁMENES PROFESIONALES

AT'N: Ing. Rafael Rodríguez Ceballos
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la F.E.S. - C.

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS TITULADA:

" Proceso general de fabricación de acero inoxidable
caliente convertidor A.O.C "

que presenta el pasante: Santiago Alamillo Rogelio Rubén.
con número de cuenta: 2457040-6 para obtener el TÍTULO de:
Inventero Mecánico Electricista ; en colaboración con :

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E .

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuatitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 13 de Febrero de 1995

PRESIDENTE Ing. Soledad Alvarado Martínez

VOCAL Ing. Samuel Pérez Díaz

SECRETARIO Ing. Felice Díaz del Castillo Rodríguez

PRIMER SUPLENTE Ing. Gerardo Bora

SEGUNDO SUPLENTE Ing. Enrique Cortés González

DEDICATORIA

ESTA OBRA ESTA DEDICADA A TODOS AQUELLOS QUE HICIERON POSIBLE LA REALIZACION DE LA MISMA Y QUE INFLUYERON EN MI DECISION DE CONTINUAR ESTE TRABAJO, BRINDANDOME SU APOYO. EL CUAL SIGNIFICA UN GRAN PASO EN MI DESARROLLO PERSONAL Y PROFESIONAL.

DEDICO EN FORMA PARTICULAR ESTE TRABAJO A :

MIS PADRES :

ROGELIO RUBEN SANTIAGO CASTAÑON

ROSA MARIA ALAMILLA ZAPATA

MIS HERMANOS :

FRANCISCO JAVIER, FLOR DE MARIA, Y FERNANDO SANTIAGO ALAMILLA

MI FAMILIA :

A MI ABUELITA FLOR DE MARIA CASTAÑON, A MIS TIOS, A MIS PRIMOS

GRACIAS POR SU APOYO INCONDICIONAL

AGRADECIMIENTOS

DESEO AGRADECER EN FORMA MUY ESPECIAL A MI ASESOR EN ESTE TRABAJO, ING. FELIPE DIAZ DEL CASTILLO RODRIGUEZ, POR SU GRAN APOYO , ACERTADA DIRECCION, PACIENCIA Y EMPEÑO PARA LLEVAR A CABO LA REALIZACION Y FINALIZACION DE ESTA TESIS, LA CUAL SIGNIFICA UN GRAN PASO EN MI VIDA PROFESIONAL.

DESEO AGRADECER A MI FAMILIA, ESPECIALMENTE A MI ABUELITA SRA. FLOR DE MARIA CASTAÑÓN L , A MI TIO SERGIO ARMANDO SANTIAGO CASTAÑÓN, Y A MIS PRIMOS SERGIO ARMANDO Y JOSE LUIS SANTIAGO RODRIGUEZ, POR SU GRAN APOYO INCONDICIONAL, EL CUAL FUE MUY IMPORTANTE PARA LA REALIZACION DE ESTE TRABAJO.

ADEMAS ES IMPORTANTE AGRADECER A MI MADRE SRA. ROSA MARIA ALAMILLA , Y A MIS HERMANOS FRANCISCO JAVIER, FLOR DE MARIA Y FERNANDO , POR EL GRAN APOYO MORAL QUE SIEMPRE HE TENIDO POR PARTE DE ELLOS.

Y ESPERO QUE ESTA TESIS SIRVA DE EJEMPLO PARA ELLOS, Y LOS LLEVE A CONCLUIR TAMBIEN EN FORMA SATISFACTORIA SUS ESTUDIOS PROFESIONALES.

I N D I C E

Capítulo 1 INTRODUCCION	1
Objetivo general	3
Objetivos particulares	
Capítulo 2 ACEROS INOXIDABLES	4
Introducción	
2.1. Aleación Hierro - Cromo	
2.2. Formación del rizo (γ) gamma	
2.3. Formación de la fase (σ) sigma	5
2.4. Aleaciones Hierro - Cromo - Carbono	
2.5. Aleaciones Hierro - Cromo - Níquel - Carbono	6
2.6. Clasificación de los aceros inoxidables	7
2.7. <i>Aceros Inoxidables Ferríticos</i>	11
2.7.1. Composición química y aplicaciones típicas	
2.7.2. Propiedades mecánicas de los aceros inoxidables ferríticos	14
2.8. <i>Aceros Inoxidables Martensíticos.</i>	16
2.8.1. Composición química y aplicaciones típicas	
2.8.2. Tratamientos térmicos	20
2.8.3. Austenitización	
2.8.4. Velocidad de enfriamiento	
2.8.5. Revenido	21
2.8.6. Propiedades mecánicas	
2.9. <i>Aceros Inoxidables Austeníticos.</i>	25
2.9.1. Composición química y aplicaciones típicas	
2.9.2. Microestructura de los aceros inoxidables austeníticos.	29
2.9.3. Propiedades mecánicas	32

2.10. Aceros Inoxidables Endurecibles por Precipitación.	35
2.10.a Tipo Semiaustenítico	
2.10.b Tipo Martensítico	
Capítulo 3 INFLUENCIA DE LOS ELEMENTOS DE ALEACION EN LA FABRICACION DE ACEROS INOXIDABLES	38
3.1. Introducción	39
3.2. Cromo	
3.3. Níquel	
3.4. Carbono	
3.5. Silicio	40
3.6. Manganeso	41
3.7. Molibdeno	42
3.8. Tungsteno	
3.9. Aluminio	43
3.10. Azufre y Selenio	
3.11. Niobio (columbio) y Titanio	44
3.12. Cobre	
3.13. Fósforo	45
Capítulo 4 UTILIZACION DE LOS ELEMENTOS DE ALEACION EN LA FABRICACION DE ACEROS INOXIDABLES.	46
4.1. Introducción	
4.2. Uso de los agentes de adición durante el proceso de aceración en la fabricación de aceros inoxidables.	47
4.3. Facilidad de almacenaje de los agentes de adición.	48
4.4. Cambios de temperatura del acero líquido debido a la influencia de los agentes de adición.	
4.5. Ferroaleaciones.	49

Capítulo 5	CHATARRA PARA FABRICACION DE ACEROS INOXIDABLES.	53
5.1.	Introducción	
5.2.	Chatarra de acéero.	54
5.3.	Calidad de la chatarra.	56
5.4.	Preparación física de la chatarra.	
5.5.	Composición química de la chatarra.	57
5.6.	Cantidad de chatarra disponible.	59
5.7.	Inmovilizaciones.	60
Capítulo 6	HORNOS DE ARCO ELECTRICO.	61
6.1.	Introducción.	
6.2.	Clasificación de los hornos eléctricos.	62
6.3.	<i>Hornos eléctricos de resistencia.</i>	
6.3.a.	Horno de resistencia ó electrodo radiante.	
6.3.b.	Horno de resistencia metálica.	
6.4.	<i>Hornos eléctricos de inducción.</i>	65
6.5.	<i>Hornos eléctricos de arco.</i>	67
6.5.e.	Horno de arco indirecto monofásico.	
6.5.f.	Horno de arco directo monofásico ó trifásico.	
6.6.	<i>Clasificación de los hornos eléctricos de arco de acuerdo con la clase de refractarios empleados.</i>	74
6.6.1.	Hornos básicos.	
6.6.2.	Hornos ácidos.	
6.7.	Ventajas que tiene la fabricación de aceros en hornos eléctricos de arco.	76
6.8.	Materias primas empleadas para la fabricación de aceros en hornos electricos de arco.	
6.9.	Empleo del oxígeno en los hornos eléctricos de arco.	77

6.10. Tiempos de operación y consumos aproximados de un horno eléctrico de arco de 100 toneladas.	78
Capítulo 7 TECNOLOGIA DE LIMPIEZA DEL ACERO.	80
Capítulo 8 PROCEDIMIENTO (A.O.D.) . (ARGON - OXIGENO - DESCARBURACION)	83
8.1. Fabricación de aceros inoxidables en convertidor A.O.D.	85
8.2. Aspectos de calidad.	87
8.3. Refractarios utilizados (Recubrimientos).	88
8.4. Ventajas obtenidas en el proceso A.O.D	93
CONCLUSIONES	97
APENDICE	99
BIBLIOGRAFIA	103

Capítulo 1

INTRODUCCION

El presente trabajo tendrá como finalidad principal el mostrarnos uno de los procesos más actuales empleados para obtener aceros inoxidables.

El proceso de que se habla es el llamado proceso dúplex, el cual está constituido básicamente de un horno eléctrico de arco y de un convertidor denominado (convertidor A.O.D).

Esta técnica fué adoptada en México, desde el año 1980, por algunas compañías nacionales, las cuales debido a la gran demanda de aceros inoxidables en México, que fueran de mejor calidad, mejores propiedades mecánicas, y por supuesto a costos de producción menores, decidieron instalar en sus plantas ésta novedosa técnica. Ya que mediante los procesos convencionales de obtención de aceros inoxidables tenían fuertes limitaciones en cuanto a la eliminación de gases, desulfuración y hasta en algunas propiedades físicas de los aceros obtenidos.

Lograndose mediante el proceso dúplex, una gran mejoría en cuanto a parámetros y en lo que a costos se refiere.

Además de lograr mediante el proceso dúplex contra el proceso convencional una mejora en la productividad de aceros inoxidables de hasta un 28% arriba del mismo.

Aunque una descripción más detallada de los procesos mencionados se verán más adelante, el proceso dúplex presenta también un gran problema en cuanto a refractarios se refiere, ya que se tienen consumos demasiado altos de los mismos.

Esto debido a las características del proceso bastante severas como son :

Altas temperaturas, turbulencias del metal líquido, ciclos de temperatura y escorias ácidas, lo cual se ha ido resolviendo satisfactoriamente al aparecer en el mercado día a día productos más favorables para éste proceso de fabricación de aceros inoxidables.

Cabe mencionar que la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables se debe a la presencia del cromo. Se considera que aceros con un 5% de cromo; ya presentan cierta capacidad de resistencia química, aunque como aceros

inoxidables se consideran a aquellos que contienen un mínimo de 10% de cromo.

Según investigaciones se ha llegado a la conclusión de que el cromo forma parte de una película superficial que aparece en estos aceros cuando se encuentran en contacto con agentes capaces de ceder oxígeno.

Para que esta película tenga mayor resistencia química y mecánica se pueden añadir otros elementos como son : Molibdeno, níquel, cobre, etc. Los cuales más adelante se verá su influencia sobre los aceros inoxidables.

Es importante mencionar que los costos de fabricación de los aceros de alta calidad son mayores a los costos de fabricación de cualquier otro tipo de acero, debido en gran parte al alto costo de los elementos de aleación del acero, razón por la cual a lo largo de este trabajo se estudiará una forma más favorable para obtener aceros inoxidables a un menor costo de producción y con una mejor calidad.

objetivos

Objetivo General .

Evaluar las ventajas que presenta la producción de aceros inoxidable mediante el método convencional utilizado contra el método dúplex utilizando un convertidor (A.O.D).

Objetivos Particulares .

- a).- Conocer lo que son los aceros inoxidable, sus principales tipos y su clasificación.
- b).- Evaluar la influencia de los principales elementos de aleación sobre los aceros inoxidable.
- c).- Analizar el proceso convencional de fabricación de aceros inoxidable (tipos de hornos eléctricos, materias primas utilizadas para la fabricación de los aceros, tiempos de operación, ventajas de este proceso)
- d).- Analizar el proceso dúplex , aspectos de calidad, y ventajas principales en la fabricación de los aceros inoxidable.
- e).- Conocer las ventajas que presenta el proceso dúplex comparado contra el proceso convencional de fabricación de aceros inoxidable.

Capítulo 2

ACEROS INOXIDABLES.

Introducción

Los aceros inoxidable son seleccionados como materiales principales porque tienen una excelente resistencia a la corrosión lo cual se debe principalmente a su alto contenido de cromo.

Pequeñas cantidades de cromo, por ejemplo cerca del 5 % adiciona alguna resistencia al hierro, pero hablando de fabricación de aceros inoxidable se requiere que el contenido de cromo en el hierro sea de poco menos del 12 % .

De acuerdo a las teorías clásicas, el cromo hace la superficie del hierro " Pasiva ", debido a la formación de una película superficial de óxido. La cual protege la parte baja del metal de la corrosión debida a la acción de agentes oxidantes.

La adición de níquel a los aceros inoxidable mejora su resistencia a la corrosión. El níquel en cantidades suficientes, algunas veces mejora su ductilidad y formabilidad para fabricación, esto es posible por su estructura austenítica (FCC).

El molibdeno cuando se añade a los aceros inoxidable mejora la resistencia a la corrosión en presencia de iones cloridos.

El aluminio mejora el escariado a altas temperaturas.

2.1. ALEACION HIERRO - CROMO.

Ya que el cromo es el elemento de aleación principal de todos los aceros inoxidable, consideraremos primero el diagrama de fases binario hierro - cromo el cual se muestra en la figura 2.1.

Dos características principales de este diagrama de fases son el rizo (γ) gamma y la presencia de la fase (σ) sigma.

2.2. FORMACION DEL RIZO (γ) GAMMA.

Ya que el cromo tiene la misma estructura (BCC) que la ferrita (α), se comporta como un elemento estabilizador de ferrita, y extiende los campos de la

fase (α), aunque suprime el campo de fase (γ), como resultado se forma el rizo (γ), el cual divide el diagrama de hierro - cromo en dos regiones la FCC y la BCC.

Aleaciones hierro - cromo con menos de 12 ó 13 % de cromo se tendrá una transformación austenita - ferrita, en rangos de temperaturas dentro del rizo (γ).

Aleaciones hierro - cromo con más de 12 ó 13 % de cromo, no pueden transformarse de FCC a BCC, y en enfriamientos desde altas temperaturas permanece como una solución sólida de cromo en hierro (α).

2.3. FORMACION DE LA FASE (σ) SIGMA.

El diagrama de fases hierro - cromo a bajas temperaturas no es completo en el rango de soluciones sólidas; una fase intermedia llamada fase (σ), se forma abajo de 821°C. y cerca de un 46 % del contenido de cromo. ver figura 2.1.

La fase (σ) tiene una estructura de cristal tetragonal y es dura y quebradiza. Esta puede ser una fuente de dificultades en aleaciones de ingeniería, ya que si está presente puede conducir a estructuras, que sean quebradizas o que posean propiedades mecánicas variables.

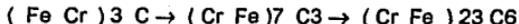
2.4. ALEACIONES HIERRO - CROMO - CARBONO.

El carbono es un estabilizador de la austenita y cuando se agrega a la aleación de hierro - cromo, aumenta el campo de la fase austenítica, según se muestra en la figura 2.2.

El efecto de incremento del contenido de carbono de 0.05 a 0.4 % sobreaumenta el campo de la fase austenítica en la aleación hierro - cromo, donde los límites de la fase austenítica aumentan a un valor máximo de un 18 % cromo, con un contenido de 0.6 % C.

Un incremento mayor de carbono despues de 0.6 % conducen a la formación de carburos libres.

La secuencia general de formación de carburos en la aleación hierro - cromo es probablemente la siguiente :



La cementita tipo carburo (Fe Cr)₃C , se forma en la aleación con hasta 10% Cr, y puede contener hasta 15 % Cr, con altos porcentajes de cromo, el carburo (Cr Fe)₇ C₃ , formado tienen un mínimo de 36 % Cr, con constantes relaciones de cromo y carbono.

El carburo (Cr Fe)₇ C₃ se transforma en (Cr Fe)₂₃ C₆.

El carburo (Cr Fe)₂₃ C₆, generalmente se precipita en los límites de granos en algunos aceros inoxidables tratados térmicamente bajo ciertas condiciones.

Mientras el carburo (Cr Fe)₇ C₃ se dispersa en el grano, los campos de fase donde estos carburos existen en el diagrama hierro - cromo, para contenidos de carbono de 0.05, 0.1, 0.2 y hasta un 0.4 % se muestran en la figura 2.2.

En esos diagramas las variables Kc, K1 y K2 son los carburos (Cr Fe)₃ C ; (Cr Fe)₂₃ C₆ y (Cr Fe)₇ C₃ respectivamente.

2.5. ALEACIONES HIERRO - CROMO - NIQUEL - CARBONO.

Cuando se agrega el níquel al hierro, este estabiliza la fase austenítica, ya que el níquel tiene la misma estructura cristalina (FCC) como la austenita. El níquel es de igual forma un estabilizador de austenita en hierro y contrarresta el efecto de la formación de ferrita de cromo en los aceros inoxidables.

Si se agrega suficiente níquel al acero inoxidable bajo en carbono, se puede producir la estructura austenítica en ciertos rangos de temperaturas.

La figura (2.3 a y b) muestran diagramas de fase para aleaciones Fe - 18 % Cr con un 4 y 8 % Ni , respectivamente.

Con un contenido de 4 % Ni (Fig 2.3 a), la zona ferrítica (δ) es desplazada a altas temperaturas y puede producirse una estructura austenítica, bajo un enfriamiento dentro del rango de temperaturas mostrado.

Por ejemplo, un acero conteniendo 0.2 % C , 19.8 % Cr y 4.4 % Ni , después de templarse a 1100 °C, puede producir una estructura austenítica, por lo tanto , este es inestable y puede fácilmente transformarse calentando a 650 °C. ó por trabajo en frío.

Un incremento en el contenido de níquel de aleaciones Fe - 18 % a 8 % , la fase ($\delta + \gamma$) se ve restringida a muy altas temperaturas y bajos contenidos de carbono aunque, en contraste se extiende el campo austenítico. La austenita es estabilizada por níquel con 8 % Ni. Una estructura austenítica estable es

producida en una aleación Fe - 18 % Cr y 8 % Ni en cierto rango de temperaturas.

La solubilidad del carbono es austenita para la aleación Fe - 18 % , Cr - 8 % y decrece rápidamente al disminuir la temperatura según la figura 2.3.b.

Por temple rápido de una aleación Fe - 18 % y Cr - 8 % que contiene cerca de 0.08 % C, para temperaturas cerca de 1000 °C. El carbono se retiene en solución sólida, aunque si esta aleación se enfria lentamente desde la región austenítica, el carbono desechado se puede combinar con cromo y hierro para formar carburos. Esta reacción toma lugar principalmente en los bordes del grano, donde la difusión atómica es más rápida.

2.6. CLASIFICACION DE LOS ACEROS INOXIDABLES .

Teniendo como base la diferencia de composición y estructura, los aceros inoxidable se dividen en 4 grupos principales que son :

- 1).- *Aceros Inoxidable Ferríticos.*
- 2).- *Aceros Inoxidable Martensíticos.*
- 3).- *Aceros Inoxidable Austeníticos.*
- 4).- *Aceros Inoxidable Endurecible por Precipitación.*

1).- Aceros Inoxidable Ferríticos .

Estas aleaciones normalmente contienen de 12 a 30 % Cr. con contenidos de carbono de cerca de 0.12 % . Otros elementos de aleación son añadidos en cantidades relativamente pequeñas para mejorar su resistencia a la corrosión u otras propiedades especiales como su maquinabilidad.

Los aceros inoxidable ferríticos por su bajo contenido de carbono normalmente no sufren la transformación de ferrita a austenita y por lo tanto de cualquier modo no son considerados tratables termicamente.

Pequeñas cantidades de carbono en muchos aceros inoxidable ferríticos producen algún endurecimiento, si estos aceros son templados desde altas temperaturas, para mejorar su soldabilidad, ductilidad y su resistencia a la corrosión. Los niveles de carbono y nitrógeno en estas aleaciones deben mantenerse extremadamente bajos.

2).- Aceros Inoxidables Martensíticos.

Estas aleaciones contienen de 12 a 17 % Cr, con contenidos de 0.1 a 1 % C. Pueden ser endurecidos por tratamiento térmico para formar martensita del mismo modo como en los aceros simples al carbono.

Se pueden obtener altas durezas si sus contenidos de carbono se acercan a un 1% y si se aplica el tratamiento térmico correcto. Se añaden pequeñas cantidades de otros elementos para mejorar la resistencia a la corrosión, resistencia mecánica y tenacidad.

3).- Aceros Inoxidables Austeníticos .

Estas aleaciones son esencialmente aleaciones ternarias, conteniendo de 6 a 22% Ni, al igual que los aceros inoxidables ferríticos, no pueden ser endurecidos por tratamiento térmico; sin embargo ellos usualmente retienen una estructura austenítica hasta en temperatura ambiente.

Son más dúctiles y normalmente tienen mejor resistencia a la corrosión que los aceros inoxidables ferríticos; para prevenir la corrosión intergranular, muchos de los aceros inoxidables tienden a ser especialmente tratados térmicamente o tener su composición química modificada.

4).- Aceros Inoxidables Endurecibles por Precipitación .

Estas aleaciones usualmente contienen de 10 a 30 % Cr, con cantidades variantes de níquel y molibdeno, las fases de endurecimiento por precipitación son formadas por adiciones de Cu, Al, Ti, y Cb.

Estas aleaciones tienen alta resistencia mecánica, sin significantes pérdidas de resistencia a la corrosión para muchas aplicaciones.

A altas temperaturas muchas de estas aleaciones poseen buenas propiedades de resistencia.

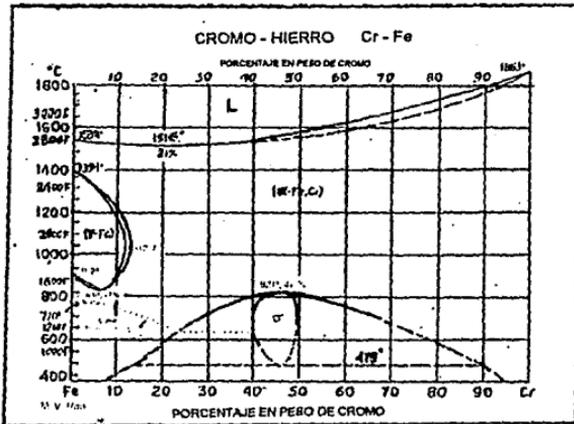
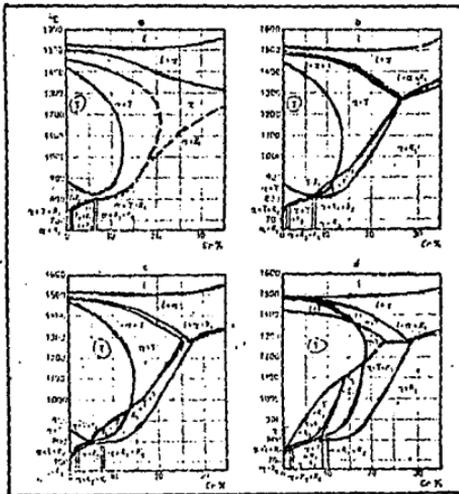
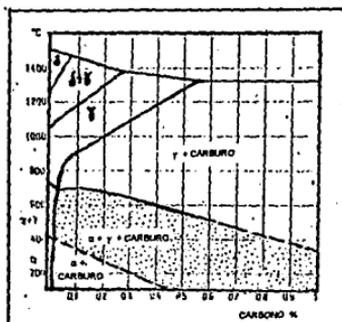


Fig. 2.1. Diagrama de fases Fe - Cr.



**Fig. 2.2. Diagrama de fases Hierro - Cromo
para diferentes contenidos de carbono**
a).- 0.05 % C. b).- 0.1 % C.
c).- 0.2 % C. d).- 0.4 % C.

FALLA DE ORIGEN



**Fig. 2.3 Diagrama de fases para la aleación Fe - 18 % Cr-C
conteniendo a).- 4 % Ni y b).- 8 % Ni**

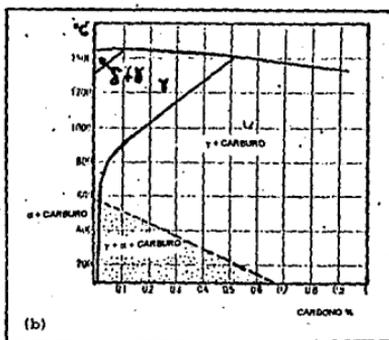


Fig. 2.3 Continuación

FALLA DE ORIGEN

2.7. ACEROS INOXIDABLES FERRITICOS.

2.7.1 Composición Química y Aplicaciones Típicas.

Los aceros inoxidable ferríticos son esencialmente aleaciones de hierro - cromo con contenidos de 12 a 30 % Cr.

Estas aleaciones son llamadas ferríticas, ya que su estructura es en su mayor parte ferrita (BCC α - Tipo hierro) en condiciones normales de tratamientos térmicos.

La tabla (2.1) nos muestra la lista de composición química y las principales aplicaciones de algunos aceros inoxidable ferríticos estandar.

Estas aleaciones son usadas principalmente como materiales generales de construcción , en la cual se requieren propiedades especiales de resistencia a la corrosión y resistencia al calor.

Los aceros inoxidable ferríticos son de interés para el diseño de ingeniería porque ellos presentan la misma resistencia a la corrosión que los aceros inoxidable que contienen más níquel, pero a bajos costos ya que el níquel no es necesario como un elemento de aleación, de cualquier modo los aceros inoxidable ferríticos tienen un uso más restringido que el de los aceros inoxidable austeníticos; por su falta de ductilidad, su grado de sensibilidad y su escasa soldabilidad.

Para superar los problemas de ductilidad de los aceros inoxidable estandar, nuevos aceros ferríticos con muy bajos contenidos de carbono y nitrógeno, tienden a ser desarrollados y producidos comercialmente (**Tabla 2.2**).

Estas aleaciones tienen mejor resistencia a la corrosión y son soldables.

TABLA 2.1

COMPOSICION QUIMICA Y APLICACIONES TIPICAS DE LOS ACEROS INOXIDABLES FERRITICOS.

Tipo AISI	COMPOSICION QUIMICA			Wt %		Aplicaciones Típicas
	Cr	C (Máx)	Mo	Al	Otras	
405	13.0	0.08		0.20		Grado no manejable para unione donde el endurecimiento por aire no es necesario como en los tipos 410 ó 403. cajas recocidas, racks, bloques resistentes a la oxidación.
409	11.0	0.08			Ti 6 x C	Inoxidables cuyo proposito general es la construcción, sistemas de escapes automovilisticos, cajas de transformadores y de capacitores, esparcidores de fertilizantes secos, tanques para atomizadores de agricultura.
430	17.0	0.12				Tipos no endurecibles cuyos propósitos generales son : recortes decorativos, tanques para ácido nítrico, canastas recocidas, cambios de combustión lavavajillas, calefactores, silenciadores, recuperadores, equipos para restaurantes.
434	17.0	0.12		1.0		Modificación del tipo 430 diseñado para resistir la corrosión atmosférica en presencia de climas húmedos, partes automotrices, cierres.

Tipo	Cr %	C(Máx) %	Mo %	Al %	Otras %	
AISI						
436	17.0	0.12	1.0		Cb 5 x C	Similares a los tipos 430 y 434 usados, donde se requiere resistencia a la corrosión y al calor. aplicaciones en partes de automóviles.
442	20.5	0.20				Aceros con alto contenido de cromo, principalmente para partes las cuales pueden resistir temperaturas altas sin escalas. se pueden utilizar como partes de hornos, toberas, cámaras de combustión, etc.
446	25.0	0.20				Alta resistencia a la corrosión y altas escalas de temperatura, turas especialmente para servicio intermitente frecuentemente usado en atmósferas sulfuradas, cajas recocidas, cámaras de combustión, moldes de vidrio, calentadores, tubos prismáticos, recuperadores, barras de movimiento, válvulas.

Tabla 2.2

COMPOSICION QUIMICA DE ALGUNOS DE LOS NUEVOS ACEROS INOXIDABLES FERRITICOS.

Nombre	% C	% Cr	% N	% Ti	% Mo
18 - 2	0.02	18.0		0.4	2.0
26 - IS	0.03	26.0		0.5	1.0
E - Brite	26-1 0.002	26.0	0.01		1.0
Airco					
29 Cr - 4 Mo	0.004	29.0	0.01		4.0
Dupont					

2.7.2 Propiedades Mecánicas De Los Aceros Inoxidables Ferríticos.

Las propiedades mecánicas de algunos aceros inoxidables ferríticos representativos en condiciones de recocido se muestran en la **tabla 2.3**.

Ya que éstas aleaciones no son completamente endurecibles por solución y temple, se usan en las condiciones de recocido; en las cuales su estructura consiste de una matriz ferrítica equiaxial con partículas de carburo dispersas. Los aceros inoxidables ferríticos estandar tienen ligeramente una mayor resistencia, y menor ductilidad, comparados con los aceros de bajo carbono.

Los nuevos aceros ferríticos, como consecuencia de sus bajos niveles de carbono y nitrógeno, tienen más altos valores de elongación que los aceros inoxidables ferríticos estandar.

La figura 2.4 muestra como se incrementa la energía de impacto de una aleación de Fe - 17 % Cr, en las condiciones de recocido cuando se reducen los contenidos de carbono y nitrógeno.

La transición dúctil - frágil de esta aleación es relativamente baja para todos los niveles de carbono de 0.002 a 0.061 %. Cuando se calienta por 1 hora a unos 850 °C. y se temple al agua (**Fig. 2.4.a**).

Sin embargo, cuando esta aleación se calienta por 1 hora a 815 °C. más 1 hora a unos 1150 °C. y se temple con agua.

La resistencia al impacto decrece drásticamente de tal modo que se necesitan disminuir los niveles de carbono, para así reducir la temperatura de transición de dúctil a frágil, a temperaturas más bajas. (**Fig. 2.4.b**).

Tabla 2.3 Propiedades típicas de algunos aceros inoxidables ferríticos recocidos estandar y no estandar.

ACERO	FUERZA DE FLEXION (APLICADA)		FUERZA DE TENSION		ELONGACION EN 2 IN (50.8 MM) %
	ksi	NI/m ²	ksi	NI/m ²	
ESTANDAR					
415	40	275.8	65	448.2	25
419	40	275.8	68	468.9	20
429	40	275.8	70	482.7	30
430	50	344.8	75	517.1	25
430F	55	379.2	80	551.6	25
439Se	55	379.2	80	551.6	25
474	55	385.4	77	530.9	25
476	55	385.4	77	530.9	25
442	45	310.3	80	551.6	20
446	50	344.8	80	551.6	20
NO ESTANDAR					
18-2	43	296.5	68	468.9	37
26-1	50	344.8	70	482.7	30

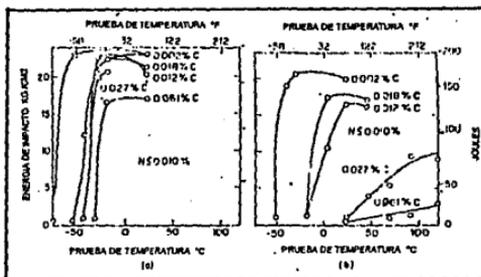


Fig. 2.4. Curvas de transición para pruebas de impacto en especímenes de aceros inoxidables ferríticos de Fe - 17 % Cr para 0.002 a 0.061 % C. Tratados térmicamente para :
a).- 815°C. por 1 hora y templados con agua.
b).- 815 °C + 1150 °C. por 1 hora y templado con agua.

2.8. ACEROS INOXIDABLES MARTENSITICOS.

2.8.1 Composición Química y Aplicaciones Típicas.

Los aceros inoxidable martensíticos son esencialmente aleaciones hierro - cromo, conteniendo de 12 a 17 % Cr. con suficiente carbono, así la estructura martensítica puede producirse por temple desde la región austenítica.

Esas aleaciones son llamadas martensíticas ya que son capaces de desarrollar una estructura martensítica con una austenitización y temple. La tabla 2.4. nos muestra la composición química y aplicaciones típicas de algunos de los aceros inoxidable martensíticos más comunes.

Puesto que la composición de los aceros inoxidable martensíticos se ajusta para optimizar su resistencia y dureza, la resistencia a la corrosión de esas aleaciones es relativamente pobre comparada con la de los aceros inoxidable ferríticos y austeníticos.

La composición química de los aceros inoxidable martensíticos, se limita a un mínimo de 12 % Cr, para tener resistencia a la corrosión, a este nivel de cromo, la máxima cantidad de carbono que puede adicionarse es cerca de 0.15 %, ya que el exceso de carbono puede precipitarse en forma de carburos cerca de los límites de grano, y bajar el contenido de cromo por debajo del crítico 12 %.

Para altas durezas, por ejemplo, para cuchillos, el nivel de carbono se aumenta de 0.60 a 1.1 % (Tipos 440 A,B y C). Con un incremento de contenido de cromo en un rango de 16 a 18 %, afortunadamente el rizo (γ) del diagrama de fases hierro - cromo se expande por un incremento del contenido de carbono a cerca del 18 % de cromo, así, esas aleaciones alto cromo, alto carbono, pueden ser austenitizadas y templadas para formar una estructura martensítica.

Las cantidades de elementos de aleación que pueden ser añadidos a los aceros inoxidable martensíticos son limitados, ya que ellos como el carbono bajan la temperatura (M_s); y si (M_s) disminuye, puede retenerse la austenita a temperatura ambiente.

Así, los otros elementos de aleación que pueden adicionarse a esas aleaciones se restringen a algunos porcentos de níquel, como en las aleaciones 414 y 431, con cerca de 1 % Mo, con 1 % W, y 0.25 % Vanadio en la 422.

Tabla 2.4.**COMPOSICION QUIMICA Y APLICACIONES TIPICAS DE LOS ACEROS INOXIDABLES MARTENSITICOS.****COMPOSICION QUIMICA Wt %**

Tipo	% Cr	% C	% Ni	%Mo	% V	% W	%otras	Aplicaciones Típicas.
AISI		Máx.						
403	12.2	0.15						Turbinas de alta calidad, turbinas de vapor, aletas para turbinas y otras partes. Incluyen partes de motores de aviones.
410	12.5	0.15						Proposito general, materiales resistentes al calor como : partes de máquinas flechas para bombas, pernos, bujes, tolvas para carbón, cuchillería, computadoras, partes de motores, maquinaria para minería, tornillos, válvulas.
414	12.5	0.15	1.8					Modificaciones del tipo alto carbono 410, cubiertos, instrumentos quirúrgicos, válvulas, partes resistentes al deterioro, moldes para vidrio, herramientas de mano, cortadoras de vegetales.

Tipo	%Cr	%C	%Ni	%Mo	%V	%W	%Otras	Aplicaciones Típicas.
AISI		Máx						
420	13.0	over 0.15						Aceros alta dureza , resor- tes, reglas de temperatu- ra, partes para maquinaria, pernos, maquinaria para minería, tijeras, partes de buques, ejes, válvulas de sello.
422	12.0	0.22		1.0	0.25	1.0		Aceros con alta fuerza y resistencia a altas tempera- turas, sobre 1200 °F. Aletas para turbinas de vapor, cierres.
431	16.0	0.20 Máx	1.8					Propósitos especiales, ace- ros duros ,usados donde se requieren propiedades mecánicas altas, proba- dores ó piezas de aviones, barras batidoras, maquina- ria para papel, pernos mecánicos.
440 A	17.0	0.72						Resistencia a altas dure- zas ,más que el tipo 420, con buena resistencia a la corrosión, cuchillería, coji- netes, herramientas quirúr- gicas.
440 B	17.0	0.85						Aceros grado cuchillería, partes de válvulas, instru- mentos de orientación.

Tipo	%Cr	%C	% Ni	% Mo	% V	% W	% Otras	Aplicaciones Típicas.
AISI		Máx						
440 C	17.0	1.07						Aceros de alto rendimiento y alta dureza, balas, rodamientos, bolas y asientos para cajas de aceite de bombas, partes de válvulas

2.8.2 Tratamientos Térmicos.

El tratamiento térmico de los aceros inoxidable martensíticos es para incrementar su resistencia y dureza, que es básicamente la misma que para los aceros al carbono ó aceros aleados. Esto es, la aleación es austenitizada, y se enfría rápidamente para producir una estructura martensítica, y por último es revenido para incrementar su tenacidad y disminuir tensiones.

2.8.3. Austenitización.

La figura 2.5 nos muestra los efectos del incremento de la temperatura de austenitización sobre la dureza de temple de cuatro aleaciones de Fe - 12 % Cr con 0.016 a 0.14 % contenidos de carbono.

En general, se logra la máxima dureza cuando la temperatura de austenitización esta entre 980 y 1090 °C. y se incrementa el contenido de carbono. El decremento de la dureza es causado por calentamientos debajo de 900 °C. lo cual no puede producir suficiente austenita (Ver el diagrama de fases hierro - cromo - carbono de la figura 2.2.).

2.8.4. Velocidad de Enfriamiento.

La alta templabilidad del material como consecuencia del alto contenido de cromo en aleaciones del tipo Fe - 12 % Cr , en las cuales se elimina la necesidad de un temple por agua despues de austenitarlo permiten producir una estructura martensítica a bajas velocidades de enfriamiento.

La influencia del cromo sobre la templabilidad de una aleación del tipo 410, es mostrada en el diagrama TTT de la figura 2.6. Con aceros 1035, enfatizando el efecto del cromo en el proceso comenzando por la austenita → ferrita + transformación a carburos para tiempos largos.

2.8.5. Revenido.

Como otras aleaciones, los aceros martensíticos requieren de un tratamiento de revenido, para incrementar su tenacidad y ductilidad.

La figura 2.7 muestra el efecto de la temperatura de revenido sobre la resistencia del Fe - 12 % Cr. en los aceros inoxidables conteniendo de 0.055 a 0.14 % C.

De esta gráfica puede notarse que estos aceros no pierden dureza, hasta que la temperatura de revenido no alcanza los 480 °C. Así mismo, cuando la temperatura de revenido alcanza los 430 °C. se observa un ligero endurecimiento secundario. Esto es probablemente debido a la formación de la fase (Fe Cr) 23 C6, la cual se hace estable alrededor de esta temperatura y gradualmente reemplaza la fase (Fe Cr) 3 C.

2.8.6. Propiedades Mecánicas.

Las propiedades mecánicas de los aceros inoxidables martensíticos pueden controlarse en algun grado por medio de tratamientos térmicos. Estas aleaciones por sus altos contenidos de cromo, pueden ser templados al aire y formar martensita, y ser subsecuentemente revenidos.

La tabla 2.5. muestra las propiedades de algunos aceros inoxidables templados y revenidos, y así mismo, en la condición de recocido.

La figura 2.8 muestra el efecto de la temperatura de revenido (por 1 Hr) sobre las propiedades mecánicas del acero inoxidable tipo 410 (12 % Cr - 0.1 % C). La resistencia de esta aleación sigue el mismo comportamiento como el de endurecimiento de los aceros con 12 % Cr.

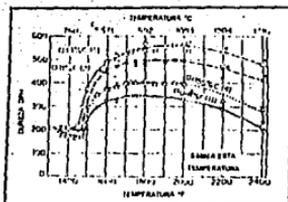
El ligero incremento de la resistencia a la tensión antes del rápido decremento de temperatura a cerca de 450°C , se cree es debida a un endurecimiento secundario por la precipitación del carburo (Fe Cr) 23 C6.

La figura 2.9 muestra el efecto de la temperatura de revenido (para 1 Hr) sobre la prueba de impacto Charpy V , de algunos aceros inoxidables como :

Fe - 12% Cr. Los valores de altos impactos son obtenidos alrededor de los 260°C. cerca de 260 °C los valores de impacto decrecen, alcanzandose un mínimo entre cerca de 450 y 550 °C.

En la práctica, el rango de temperaturas de revenido entre 475 °C a 550 °C es evitado por la pobre tenacidad de todos los aceros inoxidable martensíticos revenidos en esta región.

Este decremento en la resistencia al impacto corresponde al pico de endurecimiento secundario de la curva de revenido, y es atribuido a carburos precipitados (ó nitrúros), una gran parte de las cuales toman lugar en los límites del grano.



23

Fig. 2.5 Endurecimiento para cuatro aceros inoxidables Fe - 12 % Cr. conteniendo de 0.016 a 0.14 % C. Despues de templearse a series de temperaturas manteniendolo 1 hr. a 1093 °C. (2000 °F.) o menos y a 30 minutos a 1205 °C. (2200 °F) antes de templearse.

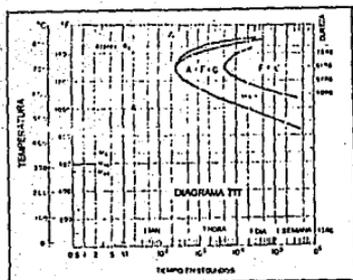


Fig. 2.6 Diagrama de transformación isotermita para un acero inoxidable tipo 410. (Fe - 12 % Cr - 0.1 % C) austenitizandolo a 980 °C. (1800 °F.) medidas del grano de 6 - 7
A: Austenita.
F: Ferrita
C: Carburos
M: Martensita

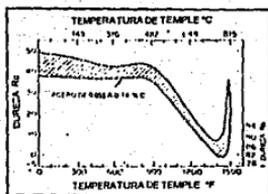


Fig. 2.7 Efecto de la temperatura sobre el endurecimiento del Fe - 12 % Cr. para 0.055 a 0.14 % C. acero inoxidable martensítico templeado por 2 hrs

FALLA DE ORIGEN

AISI	TEMPERATURA DE TEMPLE	FUERZA DE FLECCIÓN		FUERZA DE TRACCIÓN		ELONGACIÓN EN 200 MM, %	PERTECAH DE AFILAN
		Kg	kg/mm ²	Kg	kg/mm ²		
410	410	461	241	993.8	176	15.21	15
	420	456	240	1011.1	190	15.625	15
	430	456	240	1011.1	201	15.625	15
	440	456	240	1011.1	201	15.625	15
	450	456	240	1011.1	201	15.625	15
	460	456	240	1011.1	201	15.625	15
	470	456	240	1011.1	201	15.625	15
	480	456	240	1011.1	201	15.625	15
	490	456	240	1011.1	201	15.625	15
	500	456	240	1011.1	201	15.625	15
	510	456	240	1011.1	201	15.625	15
	520	456	240	1011.1	201	15.625	15
	530	456	240	1011.1	201	15.625	15
	540	456	240	1011.1	201	15.625	15
	550	456	240	1011.1	201	15.625	15
	560	456	240	1011.1	201	15.625	15
	570	456	240	1011.1	201	15.625	15
	580	456	240	1011.1	201	15.625	15
	590	456	240	1011.1	201	15.625	15
	600	456	240	1011.1	201	15.625	15
	610	456	240	1011.1	201	15.625	15
	620	456	240	1011.1	201	15.625	15
	630	456	240	1011.1	201	15.625	15
	640	456	240	1011.1	201	15.625	15
	650	456	240	1011.1	201	15.625	15
	660	456	240	1011.1	201	15.625	15
	670	456	240	1011.1	201	15.625	15
	680	456	240	1011.1	201	15.625	15
	690	456	240	1011.1	201	15.625	15
	700	456	240	1011.1	201	15.625	15
	710	456	240	1011.1	201	15.625	15
	720	456	240	1011.1	201	15.625	15
	730	456	240	1011.1	201	15.625	15
	740	456	240	1011.1	201	15.625	15
	750	456	240	1011.1	201	15.625	15
	760	456	240	1011.1	201	15.625	15
	770	456	240	1011.1	201	15.625	15
	780	456	240	1011.1	201	15.625	15
	790	456	240	1011.1	201	15.625	15
	800	456	240	1011.1	201	15.625	15
	810	456	240	1011.1	201	15.625	15
	820	456	240	1011.1	201	15.625	15
	830	456	240	1011.1	201	15.625	15
	840	456	240	1011.1	201	15.625	15
	850	456	240	1011.1	201	15.625	15
	860	456	240	1011.1	201	15.625	15
	870	456	240	1011.1	201	15.625	15
	880	456	240	1011.1	201	15.625	15
	890	456	240	1011.1	201	15.625	15
	900	456	240	1011.1	201	15.625	15

Tabla 2.5. Propiedades Típicas de aceros inoxidables martensíticos AISI, estándar dentro de sus condiciones de recado y templado.

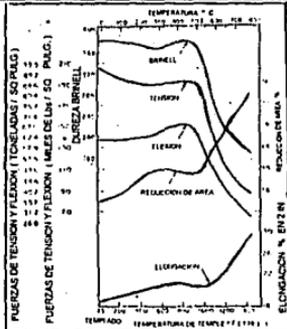


Fig. 2.9 Efecto de la temperatura de temple sobre las propiedades de impacto del acero inoxidable Fe - 12 % Cr.

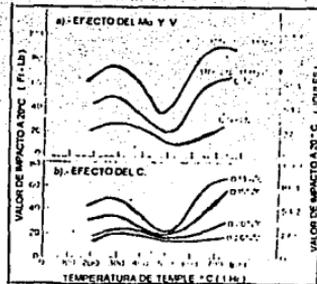


Fig. 2.8 Efecto de la temperatura de temple sobre las propiedades mecánicas del acero inoxidable tipo 410 Fe - 12 % Cr.

2.9. ACEROS INOXIDABLES AUSTENITICOS.

2.9.1 Composición Química y Aplicaciones Típicas.

Los aceros inoxidable austeníticos son esencialmente aleaciones ternarias hierro - cromo - níquel, conteniendo de 16 a 25 % Cr y de un 7 a 20 % Ni. Esas aleaciones son llamadas austeníticas, su estructura queda austenítica (FCC γ - Hierro) a toda temperatura normal de tratamiento térmico. En algunas aleaciones el níquel pueden ser reemplazado por manganeso y su estructura puede permanecer austenítica.

La tabla 2.6 muestra la composición química y aplicaciones típicas de algunos de los aceros inoxidable austeníticos más comunes.

Los aceros inoxidable austeníticos representan de un 65 % a un 70 % de la producción total de los aceros inoxidable producidos en los E.U.A . esas aleaciones tienen una posición dominante principalmente a que tienen alta resistencia a la corrosión y a la formabilidad, y así ellos poseen altas propiedades deseables para muchas aplicaciones de ingeniería.

Los tipos 302 y 304 son los aceros inoxidable más ampliamente usados, encontrando aplicaciones tanto a temperaturas elevadas como a temperatura ambiente. El tipo 316, el cual contiene un 2.5 % Mo. y esencialmente la misma base del tipo 304, tienen alta resistencia a la corrosión y realza la fortaleza a temperaturas elevadas, aceros con mayores contenidos de cromo de 23 a 25 %, como los tipos 309 y 310 encuentran sus usos a temperatura ambiente principalmente.

Tabla 2.6.

COMPOSICION QUIMICA Y APLICACIONES TIPICAS DE LOS ACEROS INOXIDABLES AUSTENITICOS.

Tipo AISI	COMPOSICION QUIMICA Wt %						Aplicaciones Típicas.
	Cr	Ni	C (Máx)	Mn	Mo	otras	
301	17.0	7.0	0.15				Tipo alta resistencia al trabajo, usados en aplicaciones donde se requiere alta resistencia y alta ductilidad, como : en carros de ferrocarril, cajas de trailers, estructuras de aviones, cierres, cubiertas para ruedas de autos, adornos, líneas de postes.
302	18.0	9.0	0.15				Proposito general de los aceros Inoxidables austeníticos, equipo para manejo de comida, turbinas de aviones, antenas, resortes, instrumentos de cocina, construcciones exteriores, tanques, hospitales, joyería, equipo para refinación de aceite, señales.
304	19.0	9.0	0.08				Modificación del tipo 302 bajo carbono para restricción de carburos precipitados durante la soldadura, equipo de proceso de químicos y comida, equipo cervecero, envases criogénicos (para temperaturas muy bajas). vertedores, tubos de desagüe, encendedores.

Tipo AISI	%Cr	%Ni	%C máx	%Mn	%Mo	% Otras	Aplicaciones Típicas.
304L	19.0	10.0	0.03				Modificación del tipo 304, extra bajo carbono, para restricción adicional de precipitación de carburos, durante la soldadura. Forros para equipo en manejo de carbono, tanques para fertilizantes y para pasta de tomate.
309	23.0	13.5	0.20				Resistencia a altas temperaturas, calentadores para aviones, equipo para tratamientos térmicos, cubiertas recocidas, partes de hornos, intercambiadores de calor, recipientes para tratamientos térmicos, partes de bombas.
310	25.0	20.5	0.25				Alta resistencia a elevadas temperaturas, más que el tipo 309. Usados en intercambiadores de calor, partes de hornos, cambiadores de combustión, metales de aporte en soldaduras, partes de turbinas de gas, incineradores, recuperadores.
316	17.0	12.0	0.08		2.5		Alta resistencia a la corrosión más que los tipos 302 y 304 .alta resistencia a la termofluencia plástica, equipos para manejo de productos químicos y pastas, equipo fotográfico, toneles para brandy, partes para fertilizadores, calderas para preparación de salsas de tomate, tubos fermentadores.

Tipo AISI	%Cr	%Ni	%C Máx	% Mn	%Mo	% Otras	Aplicaciones Típicas.
316 L	17.0	12.0	0.03		2.5		Modificación del tipo 316 extra bajo carbono, contrucciones soldadas, donde la precipitación intergranular de carburos puede ser evitada. Tipo 316 aplicaciones donde se requieren soldaduras importantes.
321	18.0	10.5	0.08			TI 5 x C	Estabilizadores para estructuras soldadas sujetas a condiciones corrosivas severas y para servicio de 800 a 1800 G. F. Múltiples de escapes de aviones, armaduras para calentadores, equipo de proceso, juntas de expansión, cámaras caloríficas, muros refractarios, coples flexibles, envases de presión.
347	18.0	11.0	0.08			Cb 10xC	Similar al tipo 321 con alta resistencia a la termofluencia plástica, escapes de aviones, chimeneas, carro de tanques soldados para químicos partes de motores de jets.
201	17.0	4.5	0.15	6.0			Tipos de alta resistencia al trabajo, bajo níquel equivalente al tipo 301, armaduras, cubiertas para ruedas de automoviles, adornos.
202	18.0	5.0	0.15	8.7			Proposito general bajo níquel equivalente al tipo 302. Equipo para cocinas, tapas, equipo para manejo de lacteos.

2.9.2 Microestructura De Los Aceros Inoxidables Austeníticos.

Los aceros inoxidables austeníticos retienen la estructura austenítica FCC a temperatura ambiente, después de un recocido a altas temperaturas, principalmente por el efecto de estabilización de la estructura austenítica debido a sus altos contenidos de níquel. La adición de níquel a las aleaciones de hierro cromo, amplían la región sobre la cual la austenita es estable (Fig. 2.3) y decrece la temperatura (Ms).

En un acero inoxidable 18 % Cr , 8 % Ni, puede retenerse una estructura austenítica a temperatura ambiente, después de un enfriamiento desde la temperatura de recocido. aprox. 1050 °C.

Sin embargo, la austenita en algunos aceros inoxidables Fe - Cr - Ni (tipo 301) no es termodinámicamente estable a temperatura ambiente, debido a su menor contenido de cromo y níquel.

Si aleaciones de este tipo son plásticamente deformadas a temperatura ambiente ó ligeramente debajo de este, alguna parte de la austenita se puede transformar a martensita.

Las propiedades mecánicas serán discutidas debido al efecto del trabajo en frío sobre la producción de esta transformación.

La mayoría de los aceros inoxidables usados comunmente contienen significantes cantidades de carbono. Por ejemplo, hay cerca del 0.1 % C.

En el tipo 302 y cerca de 0.06 % C en el tipo 304 ya que la solubilidad del carbono en los aceros inoxidables austeníticos como en las aleaciones 18 % Cr y 8 % Ni, decrece rápidamente con el decremento de temperatura, pueden precipitarse carburos de cromo si estas aleaciones son enfriadas lentamente.

(Fig. 2.10). Por ejemplo si la aleación tipo 304 (19 % Cr - 9 % Ni) se enfría lentamente desde los 1050 °C, hasta la temperatura ambiente, los carburos de cromo pueden precipitarse en los límites del grano en el rango de temperaturas de 850 a 400 °C.

Durante el enfriamiento lento a través del rango crítico de temperaturas de 850 a 400 °C. un número insuficiente de átomos de cromo se difunden del grano, para reemplazar aquellos átomos de cromo removidos de la región de los límites del grano por la precipitación de los carburos de cromo.

Consecuentemente, las regiones adyacentes a los límites de grano tienen sus contenidos de cromo bajos, a menos de 12 % crítico necesario. para obtener

resistencia a la corrosión, y la aleación así se hace susceptible a la corrosión intergranular. Aceros inoxidables austeníticos en estas condiciones son llamados " Sensibilizados " ya que son susceptibles a la corrosión intergranular. Tales aceros inoxidables austeníticos por lo tanto tienen que ser recocidos a temperaturas bastante elevadas para disolver los carburos de cromo, pero no tanto para prevenir el crecimiento excesivo del grano.

La mayoría de los aceros inoxidables son recocidos en el rango de temperaturas de 1050 a 1120 °C. Después de ser recocidos a altas temperaturas, tienen que enfriarse rápidamente para prevenir la precipitación de carburos de cromo.

Esto no siempre es posible mediante enfriamiento rápido, aceros inoxidables del tipo 304, después de recocerse a altas temperaturas puede causar problemas de corrosión, por ejemplo, aceros inoxidables soldados en campo donde estos tienden a ser enfriados lentamente pueden significar un subsecuente tratamiento de recocido para disolver los carburos de cromo precipitados y no sería posible.

Una forma para prevenir la precipitación intergranular causada por un enfriamiento lento, es la modificación en la composición química, las cuales combinan carbono con otros elementos.

En la aleación tipo 321, se añade titanio en la cantidad de 5 veces el contenido de carbono, calentando esta aleación a 870 °C. por suficiente tiempo, el titanio puede combinarse con el carbono para formar carburos de titanio (Ti C). Esto se conoce como " Tratamiento de Estabilización ". ya que se evita que se precipiten los carburos de cromo, si posteriormente el acero se somete a un tratamiento térmico en el cual, se enfríe lentamente a través del rango crítico de temperaturas del acero.

Otra variación de éste método de estabilización del acero inoxidable 18 - 8 es la adición de columbio (Niobio) para formar carburos de columbio (Cb C).

En la aleación tipo 347 una cantidad de columbio igual a 10 veces el contenido de carbono, se añaden en el acero inoxidable 18 -8.

Esta aleación tiene que ser igualmente estabilizada a 870 °C. para combinar el carbono con el columbio.

Otro método para prevenir la precipitación de carburos de cromo en los límites del grano de los aceros inoxidables austeníticos, es el reducir los contenidos de carbono a niveles lo suficientemente bajos.

En los tipos 304 L y 316 L, se permiten un máximo de 0.03 % de carbono, para servicio a temperaturas debajo de 425 °C. estas aleaciones se usan preferentemente a aquellas que contienen titanio y columbio.

Las aplicaciones y economía de estas aleaciones pueden aprovecharse para prevenir la corrosión intergranular en los aceros inoxidable austeníticos.

2.9.3. Propiedades Mecánicas.

Los aceros inoxidable austeníticos, tienen una microestructura austenítica FCC ellos no pueden ser endurecidos por cualquier tratamiento térmico, sin embargo pueden ser endurecidos mediante cualquier operación de trabajo en frío. Por ejemplo, la resistencia a la fluencia del tipo 301 puede ser incrementada de 40 a 200 Ksi, por trabajo en frío.

Los aceros inoxidable austeníticos pueden clasificarse en 2 grupos de acuerdo a la estabilidad de la austenita en la microestructura:

a).- Aceros Inoxidables Estables.

b).- Aceros Inoxidables Metaestables.

Los aceros austeníticos estables tienen una microestructura permanentemente austenítica después de trabajarse en frío.

La estructura de los aceros inoxidable austeníticos metaestables es transformada en algún grado por medio de trabajo en frío, de este modo, desarrollan una estructura mixta martensita - austenita.

La diferencia entre el comportamiento de endurecimiento deformación a temperatura ambiente de un acero inoxidable austenítico metaestable (tipo 301) y uno estable (tipo 304) se muestra mediante el diagrama esfuerzo - deformación de ingeniería de la figura 2.11.

El acero tipo 304 muestra un comportamiento normal, y muestra una curva parabólica, la cual es indicativa del endurecimiento normal debido a la deformación por la aplicación de esfuerzos.

Los metaestables tipo 301, muestran un acelerado efecto de endurecimiento por deformación después de un 10 a 15 % de la deformación plástica.

Este acelerado trabajo de endurecimiento se debe a la formación de martensita a partir de la austenita inestable.

La tabla 2.7. muestra las propiedades tensiles de los aceros inoxidable austeníticos seleccionados en la condición de recocido.

El efecto de pequeñas diferencias en el contenido de carbono en la resistencia a la fluencia, puede notarse comparando los tipos 304 con el 304L.

Donde un tipo 304L con su bajo contenido de carbono de 0.03% tiene una resistencia a la fluencia de únicamente 39 Ksi. La diferencia entre los aceros inoxidable austeníticos estables y metaestables se nota claramente por la

diferencia de sus resistencias a la tensión. Por ejemplo, los aceros inoxidables austeníticos metaestables tipo 301 tienen una resistencia a la tensión de 110 Ksi . donde los aceros inoxidables austeníticos estables tipo 304, tienen unicamente una resistencia a la tensión de 84 Ksi.

Para una cantidad dada de trabajo en frío, los aceros metaestables del tipo 301 muestran altas resistencias, resistencias de fluencia y elongaciones mayores a la de los aceros estables. Por ejemplo, el tipo 304, como se muestra en la figura 2.12.

La alta resistencia de los aceros metaestables son otra vez atribuidos a la transformación de alguna austenita inestable a martensita.

API	FUERZA DE FLECCIÓN		FUERZA		ELONGACIÓN EN %
	APLICADA		DE TENSIÓN		
TIPO	kg	MT/CM ²	kg	MT/CM ²	
201	35	372.5	115	742.9	55
202	55	379.2	105	726	55
301	40	272.8	110	728.5	60
302	40	278.1	90	629.6	50
303	40	275.0	93	635	55
304	35	241.3	90	629.6	50
304S	35	241.3	90	629.6	50
304	42	284.6	84	579.2	55
304L	39	244.9	81	558.5	55
305	38	262	85	586.1	50
308	35	241.3	85	586.1	50
309	45	310.3	90	629.6	45
309S	45	310.3	90	629.6	45
310	45	310.3	95	655	45
310S	45	310.3	95	655	45
314	50	348.8	120	649.5	40
316	42	289.6	84	579.2	50
316L	42	289.6	81	558.5	50
317	40	275.8	90	629.6	45
321	35	241.3	90	629.6	45
347	40	275.8	95	655	45
348	40	275.8	95	655	45
384	35	241.3	75	517.1	15
385	30	206.9	72	496.4	55

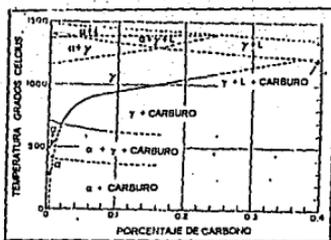


Fig. 2.10 Efecto del carbono en la constitución del acero inoxidable Fe - 18 % Cr - 8 % Ni.

Tabla 2.7. Propiedades típicas de tensión de un acero inoxidable austenítico recocido en el rango de temperaturas.

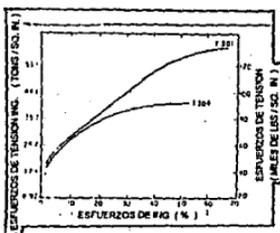


Fig. 2.11 Cargas de ingeniería y curvas de tensión para aceros inoxidables tipos 301 y 304.

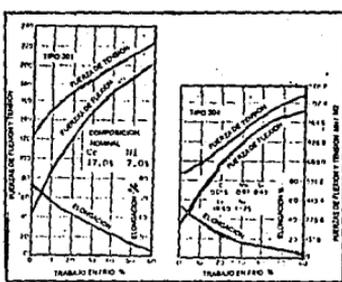


Fig. 2.12 Efecto del trabajo en frío sobre las propiedades mecánicas de los aceros inoxidables tipo 301 (Metaestable) y del tipo 304 (Estable).

FALLA DE ORIGEN

2.10. ACEROS INOXIDABLES ENDURECIBLES POR PRECIPITACION.

Los aceros inoxidable endurecibles por precipitación fueron los primeros desarrollados durante los años 40's, y desde que fueron fabricados aumentó su importancia por la variedad de aplicaciones que tienen, donde pueden aprovecharse sus propiedades especiales. La más importante de estas propiedades es que son fáciles de fabricar, su alta resistencia, su relativamente buena ductilidad y su excelente resistencia a la corrosión.

Los dos grupos de aceros inoxidable endurecibles por precipitación más comúnmente usados son :

a).- **Aceros Inoxidables Endurecibles por Precipitación. Semiaustenítico.**

b).- **Aceros Inoxidables Endurecibles por Precipitación. Martensíticos.**

2.10.a) .- Tipo Semiaustenítico : Estas aleaciones son llamadas semiausteníticas ya que son esencialmente austeníticas, en la condición de recocido (tratados en solución), pero pueden ser transformados a martensita de manera relativamente simple mediante tratamiento térmico ó termomecánico.

Para hacer este tipo de aleación, debe haber mucho control para mantener el balance entre austenita y ferrita.

Si la cantidad de austenita y / o ferrita es demasiado alta, la austenita puede ser demasiado estable para la transformación a martensita. Si la cantidad de austenita es demasiado baja, no podrá producirse una austenita estable en la condición de recocido, que resista total o parcialmente una transformación a martensita.

2.10.b) .- Tipo Martensítico : De gran utilidad son los aceros inoxidable endurecibles por precipitación tipo martensítico, y se usan más que los otros. Debido a que tienen una mayor dureza en la condición de tratados en solución. Estos aceros se usan principalmente en la forma de barras, varillas, alambres, y forja pesada, y solamente una mínima parte es en la forma de hoja de lámina.

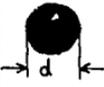
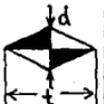
El balance de austenita y ferrita en estos aceros es tal que despues de un tratamiento térmico por solución y enfriado a temperatura ambiente , se encuentran en la condición martensítica.

Desde el desarrollo de inoxidables (W) en los años 40's, se desarrollo una serie completa de aceros inoxidables endurecibles por precipitación martensíticos. . La tabla 2.8 muestra la lista de composición química de cuatro de las más usadas aleaciones del tipo martensíticos.

GRADO	% C	% Mn	% Si	% Cr	% Ni	% Mo	% Al	% Cu	% Ti	% Ch
FUERZA MODERADA										
17-4PH‡	0.04	0.30	0.60	16.0	4.2			3.4		0.25
15-5PH‡	0.04	0.30	0.40	15.0	4.5			3.4		0.25
Custom 450‡	0.03	0.25	0.25	15.0	6.0	0.8		1.5		0.3
INOXIDABLE W	0.06	0.50	0.50	16.75	6.25		0.2		0.8	
FUERZA MAXIMA										
PH 13-8Mo‡	0.04	0.03	0.03	12.7	8.2	2.2	1.1			
Custom 455‡	0.03	0.25	0.25	11.75	8.4			2.5	1.2	0.3
† DESPUES DE REF. 1 P 7-14 ‡ 17-4 PH 13-8 Mo y 15-5 PH SON MARCAS REGISTRADAS DE ARMCO STEEL CORPORATION ‡ CUSTOM 450 Y CUSTOM 455 SON MARCAS REGISTRADAS DE CARPENTER TECHNOLOGY CORPORATION ‡ INOXIDABLE W ES UNA MARCA REGISTRADA DE CORPORACION DE ACEROS DE ESTADOS UNIDOS.										

Tabla 2.8 Composición Química de Algunos Aceros Inoxidable Endurecibles por Precipitación Tipo Martensíticos.

METODOS DE ENSAYO DE DUREZA.

ENSAYO	IDENTADOR	FORMA DE LA IDENTACION		CARGA	FORMULA DEL NUM. DE DUREZA
		VISTA LATERAL	VISTA SUPERIOR		
BRINELL	ESFERA DE ACERO O CARBURO DE TUNGSTENO DE 10MM DE DIAMETRO.			P	BHN = $\frac{2P}{\pi D \sqrt{D^2 - d^2}}$
VICKERS	PIRAMIDE DE DIAMANTE.			P	VHN = $1.72 P / dt^2$
MICRO-DUREZA KNOOP	PIRAMIDE DE DIAMANTE.			P	KHN = $14.2 P / dt^2$
ROCKWELL					
A	CONO DE DIAMANTE			60 KG	RA = } RC = } RD = } 100 - 500t
C				150 KG	
D				100 KG	
B	ESFERA DE ACERO DE 1/16 PULG. DIAMETRO			100 KG	RB = } RF = } RG = } 130 - 500t
F				60 KG	
G				150 KG	
E	ESFERA DE ACERO DE 1/8 PULG. DIAMETRO			100 KG	RE = }

Capítulo 3

INFLUENCIA DE LOS ELEMENTOS DE ALEACION EN LA FABRICACION DE ACEROS INOXIDABLES.

3.1. INTRODUCCIÓN

Los elementos de aleación son los que brindan a los aceros inoxidable las propiedades que los caracterizan y que los hacen presentar una gran resistencia a la corrosión en diversos medios, que de otra manera afectan considerablemente la superficie del acero expuesto a ella, para luego ir avanzando hacia el interior del mismo.

Aunque ya se ha hablado de la corrosión a lo largo de éste trabajo, no se ha definido aún lo que es la llamada corrosión.

Por lo que comenzaremos a decir que la corrosión, es la destrucción lenta y progresiva de un metal por la acción de un agente exterior.

La corrosión atmosférica es la producida por la acción combinada del aire y la humedad. Pero existe también la corrosión química, debida a la acción de los ácidos y los álcalis (atmósferas industriales).

La corrosión causa pérdidas enormes y desgracias incalculables debidas a accidentes producidos por la rotura de piezas debilitadas por la corrosión.

Aunque existen métodos para evitar la corrosión de los metales, el que es de mayor interés para nosotros es el uso de aceros inoxidable, los cuales presentan una buena resistencia a la corrosión, debido a la formación de una capa superficial e impermeable muy fina y compacta de elementos de aleación indispensables para brindar estas propiedades de anticorrosión en el acero, ya sea en forma normal o de ataque químico.

Esta propiedad se conoce como "Pasividad" y es consecuencia del efecto y propiedades de cada uno de los elementos aleantes de los aceros inoxidable, los cuales se mencionan a continuación, así como algunas características y propiedades de los mismos.

3.2 CROMO.

El cromo es un elemento básico en los aceros inoxidable y su presencia promueve la adquisición de pasividad. Este elemento ejerce una influencia muy favorable cuando se encuentra en la martensita, ferrita o austenita; pero cuando forma carburos no sirve para aumentar la resistencia a la corrosión en los aceros, siendo con frecuencia precisamente los carburos los principales causantes de la corrosión.

Al aumentar el porcentaje en contenido de cromo aumenta considerablemente su resistencia a la corrosión.

Esta resistencia es desarrollada en los medios oxidantes activos.

Agentes como : Ácidos clorhídricos y fluorhídricos, destruyen la pasividad y corróen a estos aceros.

Las variaciones de cromo dentro de los intervalos especificados no influyen en las propiedades de maquinabilidad del acéero.

3.3 NIQUEL.

Es el elemento que ocupa un segundo lugar de importancia dentro de los aceros inoxidable. Este se encuentra en los aceros inoxidable austeníticos en cantidades no menores de 6%, siendo la suma de cromo - níquel de no menos de 24%.

Este elemento además de favorecer la formación de austenita estable, ejerce un efecto notable en la resistencia a la corrosión, reforzando la influencia de cromo. El níquel mejora ciertas propiedades de los aceros inoxidable y hace posible la soldabilidad de éstos.

Sin embargo al aumentar el contenido de níquel disminuye la maquinabilidad, ya que éstos aceros tienden a endurecerse con el trabajo en frío y además los hace más débiles a la corrosión.

3.4. CARBONO

El carbono es un elemento inevitable y frecuentemente adicionado en forma intensional, aunque debe de procurarse tener en la menor cantidad posible.

El efecto perjudicial del carbono resulta de su combinación con el cromo para formar carburos, que en ocasiones son los principales causantes de la corrosión, ya que evitan la formación de óxidos de cromo que son protectores al disminuir el contenido de cromo y así aumentan la oportunidad de que sea más fácilmente atacado.

El contenido de carbono en los aceros inoxidable no interfiere con las propiedades de maquinado del mismo. En general, aumentando el contenido de carbono se consigue un mejoramiento en la resistencia mecánica y en la resistencia a la deformación plástica a temperaturas elevadas, pero se ocasiona una reducción en la ductilidad del metal. El efecto nocivo del carbono se puede eliminar de una ó mas de las siguientes maneras :

- 1).- Sosteniendo el contenido de carbono abajo de 0.03%.
- 2).- Agregando un elemento que se combine de preferencia con el carbono, como el niobio ó el titanio, eliminandolo de ésta manera, y evitando la formación de carburos de cromo.
- 3).- Sometiendo al acéro a un tratamiento térmico que consiste en calentarlo a una temperatura elevada para disolver los carburos que se hayan precipitado y luego enfriar el acéro rápidamente para evitar la precipitación.

3.5. SILICIO.

Adiciones de silicio de 0.5% a 1% mejoran la resistencia a la corrosión en ciertos ácidos, pero su mayor influencia radica en la resistencia a la oxidación a elevadas temperaturas que confiere a los aceros inoxidable y refractarios.

El silicio ayuda en la fundición de las piezas y tiene un beneficio sobre la resistencia del acéro contra la carburización que ocasiona una reducción de ductilidad, aunque algunas veces su presencia es perjudicial. Entre las principales características de este elemento de adición de los aceros inoxidable y refractarios tenemos :

- 1).- Desoxidante barato en aceración. Se usa como ferrosilicio.

- 2).-Aumenta la resistencia a la oxidación. Para esto se usa para materiales en trabajo en caliente.
- 3).-Se disuelve en la matriz aumentando la resistencia, tenacidad y resistencia a la fatiga.
- 4).-Aumenta la templabilidad moderadamente.
- 5).- Aumenta la fluidéz del acéro fundido, por lo que se utiliza para vaciar piezas complicadas.

3.6. MANGANESO.

El manganeso, en cantidades inferiores al 1% tiene muy poca influencia en la resistencia a la corrosión, pero en cantidades de 8% a 10% hace que en los aceros se consigan estructuras que favorecen sensiblemente la resistencia a la corrosión.

El manganeso es de mucha importancia en el procedimiento de aceración pero su presencia en cantidades moderadas no afecta las propiedades mecánicas ni anticorrosivas del metal.

Entre sus características principales tenemos :

- a).- Imparte templabilidad a bajo costo.
- b).- Formador de austenita. Produce los aceros inoxidable al Cr-Ni-Mn serie 200.
- c).- Se une al azufre como sulfúro de manganeso (MnS) evitando que se forme el dañino sulfúro de hierro (FeS), Favoreciendo así la maquinabilidad.
- d).- Produce los aceros austeníticos al manganeso con alto carbono (11% a 13% Mn). Estos aceros son muy difíciles de maquinar pero poseen mucha resistencia al desgaste.
- e).- No es un fuerte formador de carburos; tiende a disolverse en la matriz

aumentando su resistencia mecánica.

f).- Excelente desoxidante en aceración. Se usa como ferromanganeso.

3.7. MOLIBDENO.

El molibdeno tiene una influencia similar a algunos otros elementos en lo referente a la resistencia al ataque corrosivo que nos brinda, a la acción por picaduras en soluciones cloradas.

Hace que la pasividad adquirida por la acción del cromo sea efectiva, en casos donde el cromo solo no es suficiente. Particularmente cuando se requiere resistencia a la corrosión de soluciones de ácido sulfúrico, soluciones neutras de cloro y agua de mar.

Agregando éste elemento se mejora la resistencia del material a altas temperaturas.

Dentro de sus características principales tenemos :

- a).- Fuerte formador de carburos. Aumenta la resistencia a la abrasión y al desgaste.
- b).- Aumenta la templabilidad.
- c).- Aumenta la resistencia al ataque de ácidos.
- d).- Aumenta la resistencia a la corrosión en los aceros inoxidables y refractarios.

3.8. TUNGSTENO.

La influencia del tungsteno en la resistencia a la corrosión es poco sensible.

El tungsteno (wolframio) se aporta voluntariamente al acero en forma de ferrotungsteno, considerándose como un elemento de aleación cuando su proporción supera al 0.30 %.

Forma parte de los aceros inoxidable, los cuales mantienen una elevada resistencia mecánica a altas temperaturas. Este elemento es un fuerte formador de carburos.

Los carburos de tungsteno son muy duros y presentan mucha resistencia a la abrasión y al desgaste, de los aceros que los contienen.

3.9. ALUMINIO.

En los aceros con cromo, cantidades de 3 a 4 % de aluminio hacen que presenten una buena resistencia a la oxidación en caliente. Al formarse una película de alúmina (Al_2O_3), en la superficie de los mismos. Su influencia es superior a la del silicio.

Para que el aluminio se considere como un elemento de aleación su porcentaje debe ser superior de 0.3 %, llegando hasta un 14 % aproximadamente.

El aluminio se añade a la cuchara de colada al final de la fabricación del acero.

La única dificultad que ofrece ésta operación se deriva de la pequeña densidad del aluminio, que lo hace flotar sobre el baño; por lo que a veces se utiliza ferroaluminio especial cuya densidad sea mayor a lo normal.

Entre las características principales del aluminio tenemos :

- 1).- Energético desoxidante en aceración.
- 2).- Restringe el crecimiento del grano.
- 3).- Disminuye la templabilidad.
- 4).- Muy baja tendencia a formar carburos y Favorecer la formación de grafito.

3.10. AZUFRE Y SELENIO.

Los aceros inoxidable, como se ha indicado con anterioridad, presentan cierta dificultad al maquinado; sin embargo, se ha encontrado que adicionandoles azufre ó selenio su maquinabilidad mejora considerablemente. Normalmente se

adicionan con un contenido de 0.15 a 0.35 % cuando son utilizados para éstos casos.

El azufre y el selenio no aumentan la resistencia a la corrosión, pero sí ayudan a evitar ésta indirectamente, ya que hacen posible obtener superficies más lisas, las cuales resisten más el ataque de la corrosión.

Los aceros que contienen azufre ó selenio son llamados aceros de maquinado libre y la diferencia que existe entre las propiedades que imparte el azufre y el selenio, son pocas, pero bastante importantes, ya que están en función de su maquinabilidad, ductilidad, forjabilidad, y resistencia a la corrosión.

3.11. NIOBIO (COLUMBIO) Y TITANIO.

Estos elementos se agregan en ocasiones para evitar la precipitación intergranular de los carburos de cromo. Lo cual ocurre en algunas aleaciones a temperaturas intermedias.

También tienen un efecto benéfico sobre la resistencia, contra el agrietamiento causado por la fátiga térmica en el servicio.

3.12. COBRE.

Este elemento mejora la resistencia a la corrosión de los aceros altos en cromo y de algunos austeníticos, frente a soluciones corrosivas (Soluciones cloradas, soluciones de ácido sulfúrico, etc). Intervienen en los aceros en pequeñas cantidades , ya que dificultan la transformación en caliente y los hace propensos a las fisuras.

El cobre puede encontrarse en los aceros como elemento de adición voluntaria ó en todo caso aportado por la chatarra involuntariamente, pues no lo contienen ni los minerales de hierro, ni los combustibles. El cobre se incorpora generalmente al acéero como metal puro, y para que éste se considere como elemento de aleación es preciso que se tenga en un porcentaje de 0.30% ó más.

El cobre no ejerce ninguna protección contra la corrosión del acero, en agua o en tierra.

3.13. FOSFORO.

El fósforo que contienen los aceros procede de los minerales de hierro, aunque también se utiliza como elemento de adición en algunos casos particulares.

Generalmente se considera al fósforo como un elemento residual. Razón por la cual se debe mantener a un límite bajo durante el proceso de aceración; Ya que de no hacerlo produciría un acero frágil.

Además el fósforo en presencia del cobre, eleva la resistencia del acero a la corrosión atmosférica.

Capítulo 4

UTILIZACION DE LOS ELEMENTOS DE ALEACION EN LA FABRICACION DE ACEROS INOXIDABLES.

4.1. INTRODUCCION

La fabricación de estos aceros involucra la adición deliberada de varios elementos químicos agregados al metal fundido, a fin de obtener los efectos finales deseados en el mismo.

Los cuales nos pueden causar la desoxidación del metal fundido al grado deseado; control del tamaño del grano, control de inclusiones no metálicas, formas de la inclusión, mejoramiento de las propiedades físicas y de resistencia a la corrosión del acero, aumento de la respuesta del acero a subsecuentes tratamientos térmicos, y logros de otros efectos específicos.

Generalmente, los elementos químicos son incorporados dentro del acero en el baño, en forma de una aleación de elementos básicos en la constitución del acero y que contienen principalmente hierro; pero es rica en su mayoría de los elementos que más se deseen agregar.

Aleaciones semejantes, a causa de su alto contenido de hierro, llegan a ser conocidas como "Ferroaleaciones".

Y otros tipos disponibles de ellas, fueron producidas en los altos hornos.

Eventualmente, la producción de aleaciones para fabricación de aceros contienen relativamente poco hierro.

Por esta razón el término adición de agentes se refiere a describir cualquier material añadido al acero fundido para alterar su composición o propiedades; bajo ésta definición, las ferroaleaciones forman una clase especial de agentes de adición.

La adición de agentes más comunmente utilizadas en las ferroaleaciones incluyen aleaciones de hierro con :

Aluminio, Boro, Cromo, Columbio (Niobio), Manganeso, Molibdeno, Níquel, Nitrógeno, Fósforo, Selenio, Silicio, Titanio, etc.

Algunos de estos elementos químicos son disponibles como agentes de adición únicos y por ello no se consideran como ferroaleaciones; como ocurre con las formas puras, estas incluyen relativamente metales puros como son : Aluminio,

Calcio, Cobalto, Cobre, Manganeso, y Níquel, óxidos de molibdeno, de níquel y de tungsteno, además elementos como : Carbono, Nitrógeno y sulfúros en varias formas y aleaciones consistiendo principalmente de combinaciones de dos o más de los elementos anteriores.

Los más importantes agentes de adición incluyen a las ferroaleaciones, cuya composición se presentará más adelante.

4.2. USO DE LOS AGENTES DE ADICION DURANTE EL PROCESO DE ACERACION. (FABRICACION DE ACEROS INOXIDABLES).

Los agentes de adición pueden ser añadidos con la carga en el horno en la fabricación del acero, o en el baño fundido cerca del final del último periodo, o en la cuchara de coladas ó bien en el molde. La distribución de la aleación adicionada es dependiente sobre todo del efecto de la adición sobre la temperatura del metal fundido, la facilidad con la cual los agentes específicos de adición entran en solución , susceptiblemente de una adición particular de agentes a oxidación y formación de productos de reacción.

La economía en la manufactura de los aceros requiere de una considerable afinidad entre los elementos de aleación y el metal fundido. Por ejemplo elementos como :

Cobre, Molibdeno, ó Níquel, pueden ser añadidos con la carga ó durante el trabajo de fusión, y son totalmente recuperados. Fácilmente se oxidan materiales como :

Aluminio, Cromo, Manganeso, Boro, Titanio, Vanadio y Zirconio, que son normalmente añadidos en la cuchara del colado; con el fin de minimizar las pérdidas por oxidación.

Para compensar la tendencia al enfriamiento del metal fundido debido a grandes adiciones de agentes y para minimizar o eliminar la necesidad del precalentamiento en los mismos antes de ser añadidos, ferroaleaciones como : Ferromanganeso y ferrocromo, se pueden mezclar con reagentes químicos para provocar reacciones exotérmicas que eviten la pérdida de temperatura del acero.

Los agentes son agregados al baño formados por bloques de aproximadamente 125 mm ó 5 in, favoreciendo la oxidación de la escoria fácilmente. Para adiciones en la cuchara la aleación tendrá tamaños máximos de 50 mm ó 12 in aprox. Para asegurar su rápida disolución.

4.3. FACILIDAD DE ALMACENAJE DE LOS AGENTES DE ADICION.

Desde el punto de vista del manejo de materiales y de conservación e identificación, es aconsejable el almacenar los agentes de adición y buscar los medios en los cuales estos sean protegidos del tiempo y del medio ambiente.

La localización y el diseño de las áreas de conservación deben ser para contener y disponer rápidamente, de ellos.

Además de trabajar con costos de manejo de estos materiales relativamente bajos. Toda área mostrará y proveerá los contenidos químicos exactos y rápidos disponibles; aunque se deberá de prevenir cualquier error ya que acarrearía grandes costos adicionales al proceso de fabricación del acero. Ciertamente algunos agentes de adición son más fácilmente manejados y controlados que otros, por lo cual se deben de tomar todas las precauciones necesarias para llevar a cabo la conservación y manejo en forma eficiente de los agentes de adición (Ferroleaciones), catalogadas como una de las principales bases en la fabricación de los aceros inoxidables que estudiamos.

4.4. CAMBIOS DE TEMPERATURA DEL ACERO LIQUIDO DEBIDO A LA INFLUENCIA DE LOS AGENTES DE ADICION.

Cuando los agentes de adición son añadidos al acero líquido, ocurre lo siguiente :

- 1).- Calentamiento de su temperatura ambiental inicial a la temperatura del acero, ya fundido.
- 2).- Fundición de los mismos en el baño.
- 3).- Disolución de ellos, dentro del acero líquido.

Para adiciones de más agentes al mismo tiempo, éstas series de eventos como absorción de calor del acero líquido, causan un decremento en la temperatura; sin embargo, la adición de algunos agentes causan un incremento de temperatura. El cambio de temperatura puede ser expresado en términos de un factor de enfriamiento en Sistema Internacional.

Unidades de temperatura (Grados Celsius) cuando un kilogramo de agentes de adición son añadidos a una tonelada de acero líquido y en unidades (FPS) Sistema Inglés, es el cambio de temperatura (Grados Fahrenheit) de una tonelada neta de acero líquido, debido a la adición de dichos agentes aleantes del acero que se está procesando.

4.5. FERROALEACIONES.

A lo largo de éste trabajo se ha mencionado el empleo de las llamadas ferroaleaciones, las cuales son aleaciones de hierro, carbono y un tercer elemento como :

Silicio, Manganeso, Cromo, Vanadio, Molibdeno, principalmente. Los cuales generalmente se encuentran en proporciones elevadas de hasta un 85 %.

Hay también ferroaleaciones formadas por dos y hasta tres elementos además del carbono y el hierro.

Las ferroaleaciones se utilizan como productos de adición en el proceso de fabricación del acero para desoxidarlo y recarburarlo al final de la operación.

Las ferroaleaciones más utilizadas con éste fin son las ya mencionadas, aunque otros elementos de aleación como :

Níquel, Cobre, etc. Se adicionan puros al acero ya fundido.

Las ferroaleaciones de uso más práctico en la fabricación de los aceros inoxidables son :

- (a).- Ferromanganeso.
- (b).- Ferrosilicio.
- (c).- Ferrocromo.
- (d).- Ferrovanadio.
- (e).- Ferromolibdeno.
- (f).- Ferrotungsteno.
- (g).- Ferrocolumbio.
- (h).- Ferrotitanio.
- (i).- etc.

La tabla (4.1) muestra las composiciones de cada ferroaleación de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana (N.O.M). Más reciente.

TABLA (4.1.)

FERROMANGANESO (NOM - B - 40)	ALTO CARBONO	Mn	MEDIO CARBONO	Mn	BAJO CARBONO	Mn
	72 - 74 %		80 - 85 %		85 - 90 %	
	7.5 % MAX	C		C	0.5, 0.3, 0.2, 0.1%	C
	1.2 % MAX	Si	1.5 % MAX	Si	2.0 % MAX	Si
	0.35 % MAX	P	1.0 % MAX	P	0.20 % MAX	P
	0.05 % MAX	S	0.30 % MAX	S	0.02 % MAX	S
			0.02 % MAX			
FERROCROMO (NOM - B - 220)	CLASE B					
	58 - 65 %	Cr			65 - 75 %	Cr
	4 - 6 %	C			0.05 %	C
	4 % MAX	Si			1.0 % MAX	Si
	0.04 % MAX	S			0.025% MAX	S
	0.03 % MAX	P			0.030 % MAX	P
FERROSILICIO (NOM - B - 48)	CLASE E		CLASE C			
	FE - SI 45 %	Si	FE - SI 75 %	Si		
	50 - 56 %	Si	74 - 79 %	Si		
	0.10 % MAX	C	0.10 % MAX	C		
	0.025 % MAX	S	0.025 % MAX	S		
	0.040 % MAX	P	0.035 % MAX	P		
	1.25 % MAX	Al *	1.50 % MAX	AL *		
	0.75 % MAX	Mn	0.40 % MAX	Mn		
	0.50 % MAX	Cr	0.30 % MAX	Cr		
	0.30 % MAX	Ni	0.10 % MAX	Ni		
	0.30 % MAX	Cu	0.10 % MAX	Cu		
	0.20 % MAX	Ti	0.20 % MAX	Ti		

(*).- CUANDO SE ESPECIFIQUE CON BAJO ALUMINIO SE HARA CON UN 0.40 % MAX. DE ESTE ELEMENTO.

FERROCOLUMBIO (NOM - B - 236)	CLASE A		
	50 - 70	% MAX	Cb
	2.0	% MAX	Ta
	0.30	% MAX	C
	3.0	% MAX	Mn
	3.5	% MAX	Si
	2.0	% MAX	Al
	0.15	% MAX	Sn
	0.01	% MAX	Co
	0.05	% MAX	P
0.03	% MAX	S	

FERROMOLIBDENO (NOM - B - 346)	CLASE B		
	60	% MIN	Mo
	0.10	% MAX	C
	0.05	% MAX	P
	0.15	% MAX	S
	1.0	% MAX	Si
	1.0	% MAX	Cu
	0.010	% MAX	Pb
	0.010	% MAX	Sn

TRIOXIDO MOLIBDENO (NOM - B - 92)	55 - 64	% MAX	Mo
	0.10	% MAX	P
	0.25	% MAX	S
	0.25	% MAX	Cu *

(*) .- POLVO.

Capítulo 5

CHATARRA PARA FABRICACION DE ACEROS INOXIDABLES.

5.1. INTRODUCCION

La chatarra consiste de productos fabricados de acéero y piezas fuera de úso, separada y desechada; de la misma forma conteniendo hierro ó acéero. La chatarra en forma de hierro ó acéero son una de las principales fuentes de obtención de metálicos en la fabricación de acéeros de alta calidad; la otra principal fuente es el hierro proveniente de los altos hornos.

La chatarra es de gran valor práctico. Todas las toneladas de chatarra utilizadas actualmente en la fabricación de aceros, se piensa se podrán utilizar aún en usos futúros y desplazarán en forma considerable a otros recursos naturales incluyendo al mineral de hierro, carbón y piedra caliza.

En promedio la industria del acéero consume cerca de 1/5 más de lingotes de hierro que de chatarra.

De acuerdo a publicaciones del Instituto Americano del Hierro y del Acéero (A.I.S.I), la industria del acéero consume entre 50 y 56 millones de toneladas de hierro y chatarra de acéero, en producción de 100 millones de toneladas de acéero crudo.

Los diversos procésos de fabricación de los acéeros difieren básicamente en sus consumos de chatarra. El horno eléctrico usualmente es cargado casi totalmente con chatarra fría.

La chatarra utilizada para fabricación de acéeros proviene generalmente de :

Chatarra picada, lingotes demasiado cortos para laminár, lingotes rechazados, rieles, barras, maquinaria obsoleta, acéero desechado, rejas, maquinaria industrial dañada, barcos viejos, automóviles arruinados, productos rechazados en procesos de manufactura, artefactos del hogar inútiles como : Estufas, lavadoras, etc.

5.2. CHATARRA DE ACERO.

Las principales materias primas utilizadas en la obtención de acéros de alta calidad (Inoxidables) y refractarios son :

Chatarra de acéero, cal ó piedra caliza, ferroaleaciones, etc.

A continuación se estudia detalladamente la chatarra de acéero con especial insistencia en cuanto a las consideraciones económicas que rigen su empleo en los procedimientos de fabricación de éstos acéeros.

El precio de compra de la chatarra es casi siempre inferior al del hierro, por lo que los fabricantes tienen como objetivo general emplear la mayor cantidad posible, siempre que concurren ciertas condiciones.

En ocasiones, cuando existe una gran demanda de acéero, el precio de la chatarra aumenta en muchos países, hasta alcanzar un valor excesivo que sobrepasa el precio del hierro fundido, ya que contiene más unidades (Fe) por tonelada y además sólo necesita ser fundida para convertirse de nuevo en lingotes.

En tales ocasiones, los fabricantes de acéero estudian las posibilidades de reducción directa del mineral de hierro ó la esponja de hierro, en unidades pequeñas en relación con los modernos altos hornos, pero que producen

" Chatarra " a un costo medio entre el del arrabio líquido y el precio excesivo de la chatarra de acéero ó posiblemente aún menor que el del hierro.

Hasta ahora se han hecho escasos progresos en la instalación de procedimientos de reducción directa con este objeto.

El deseo de utilizar la chatarra, más barata en condiciones normales, constituye a menudo un factor importante cuando se estudia el procedimiento que debe utilizarse en una localidad particular; en realidad, la posibilidad de utilizar un mayor porcentaje de chatarra puede ser un factor decisivo.

El estudio de las estadísticas de una nación industrializada demuestra que los lingotes de acéero se producen aproximadamente con la misma cantidad de arrabio que de chatarra.

Para conseguir el mejor rendimiento térmico general, el hierro debiera ser transferido a la acería en estado fundido y utilizado directamente en la obtención de acéeros especiales de alta calidad.

Esto obliga a que los altos hornos y las acerías se encuentren situados muy próximos.

La chatarra se utiliza fría y en este aspecto su proximidad al punto de fabricación de los acéros carece de importancia.

El costo de transporte puede ser, no obstante, muy elevado y la introducción del método de colada, anima a emplear pequeños hornos de fundición de chatarra en localidades donde ésta sea barata y abundante, ya que el transporte a las acerías resulta demasiado costoso.

La chatarra de acéero puede clasificarse según su origen en :

a).- **CHATARRA CIRCULANTE** : Procede de la fabricación y tratamiento del acéero en un determinado taller.

Consiste en las sobras, recortes y material desechado que se devuelve casi inmediatamente al convertidor.

b).- **CHATARRA DE PROCESO** : Procede de los talleres del cliente y se origina durante la manufactura y acabado de los artículos. Por lo general, se devuelve con rapidéz a las plantas de obtención de acéero.

c).- **CHATARRA DE CAPITAL** : Procede de desechos de productos y equipos manufacturados. En algunos casos puede volver a los talleres después de tres ó cuatro años de empleo.

Si se trata de grandes inmobilizaciones su vida puede ser de cincuenta años ó más ; el término medio parece ser de unos veinte años aproximadamente.

5.3. CALIDAD DE LA CHATARRA .

Tanto la chatarra circulante como la chatarra de proceso, suelen volver al fabricante de aceros sin estar contaminadas por elementos extraños que perjudiquen su reutilización; y lo mismo suele ocurrir con la chatarra procedente del equipo capital de gran tamaño.

Gran parte de la chatarra del equipo capital de corta duración se llega a contaminar generalmente con revestimientos de diversos tipos ó se devuelve mezclada con elementos no ferrosos en forma de paquetes prensados.

Esto produce gran cantidad de residuos en el acero, privándole de algunas de sus propiedades, con lo que resultará inservible para ciertas aplicaciones.

Dentro de los principales residuos dañinos al acero se encuentran los siguientes : Cobre, Níquel, Estaño, etc.

Los cuales llegan a originar serios problemas en las plantas que funden un elevado porcentaje de chatarra procedente de equipo capital de corta duración.

También la chatarra circulante en determinados talleres produce un aumento lento pero cierto del contenido residual, aunque en otros tipos de aceros pueden emplearse cantidades variables de chatarra de capital.

5.4. PREPARACION FISICA DE LA CHATARRA.

La chatarra se clasifica de acuerdo a su tamaño físico y a su composición química.

Piezas demasiado largas son acomodadas por cajas de máquinas cargadoras, deben hacerse cortes para obtener el tamaño adecuado, éstos cortes se realizan con cizallas, con flama (sopletes de corte), y otras formas dependiendo sobre todo del tipo de chatarra existente.

Algunas veces, piezas muy grandes de chatarra, las cuales no pasan a través de las puertas del horno, pueden ser cargados dentro del horno por medio de una grúa, ó bien como se indicó haciéndose uso de cizallas laminadoras, y otras a fin de obtener piezas delgadas y pequeñas de chatarra, para poder ser compactadas dentro de blocks (paquetes) por una prensa hidráulica balanceada y especialmente diseñada; desde entonces se utiliza éste método por ser uno de los más adecuados.

Las propiedades físicas de preparación de la chatarra están haciendo posible aumentar la cantidad de chatarra que puede ser cargada en un tiempo menor dentro de las cajas de carga, para ser colocada la chatarra dentro de los hornos de producción de los acéros.

La densidad de carga en las cajas y el número de cajas surgen y dependen de la necesidad de la carga, transporte y de sus necesidades básicas de producción, dependen también de factores como son : Contenidos depositados dentro del horno y el menor tiempo consumido en la carga del horno.

Los retazos en la carga del horno pueden ocasionar una correspondiente pérdida en la producción del acéro.

El primer grado en la producción del acéro lo tiene la chatarra comprada con aproximadamente 3 mm. de espesor, no más de 460 mm. de ancho y no más de 1.5 mts. de largo.

El horno eléctrico requiere de chatarra comprada con dimensiones pequeñas en medidas de 1 mt.

Se prefieren longitudes pequeñas para la carga del horno.

5.5. COMPOSICION QUIMICA DE LA CHATARRA.

Ciertamente los elementos químicos son constituyentes indispensables en la fabricación del acéro, especialmente cuando se utilizan hornos eléctricos. En general, como quiera que sea, para todo proceso de fabricación de acéro con chatarra, estos elementos pueden ser desconocidos y buscados como una aleación adecuada al proceso de fabricación del acéro.

La segregación de la chatarra doméstica, de acuerdo a su composición química, es relativamente simple. Chatarra comprada, especialmente presenta algunos problemas donde un gran porcentaje de estos son de origen y composición desconocida. Mientras que un análisis químico resultará impráctico a cada pieza individual de la enorme montaña de chatarra consumida cada año, los análisis químicos de muestras seleccionadas de lotes individuales, algunas veces son empleados por plantas fabricadoras de acéro en la clasificación de la chatarra.

Un análisis espectrográfico, se emplea algunas veces en lugar de un análisis químico, porque éste es más rápido ; sin embargo, son lentos y costosos y los dos requieren de una cuidadosa selección y preparación de muestras.

Algunas pruebas menos costosas, pero menos exactas se utilizan comunmente; éstas incluyen : Pruebas magnéticas, pruebas de chispas, pruebas de mancha, pruebas de pellets.

Cuando la composición de la chatarra es conocida, la chatarra puede proveer valiosas fuentes de elementos de aleación, necesarias para producir los acéros deseados.

Grandes ventajas proporcionan éstas fuentes en la producción de acéros en hornos eléctricos.

En el horno de oxígeno básico y en los hornos de solera abierta, sin embargo, la preponderancia de producción consiste de acéros al carbono y acéros aleados.

En general, los elementos de aleación no definidos en la chatarra puede ocasionar dificultades.

Aunque elementos como : Estaño, Cobre, Níquel, y otros presentan problemas en la producción del acéro, pero éstos no se pueden evitar, por estar siempre presentes en la chatarra utilizada, pero se deben de controlar sus porcentajes al mínimo valor posible, ya que pequeñas cantidades de éstos elementos pueden modificar la temperatura del acéro en el baño.

Además el estaño y el cobre en ciertos rangos de composición causan fragilidad y superficies en malas condiciones en el acéro.

El níquel y el estaño, no solamente modifican la temperatura interna en el baño en el horno, sino que pueden ser introducidos sin intención y sin embargo, pueden depositar residuos en el horno que son absorbidos por calentamientos sucesivos, dando por resultado una contaminación general del acéro.

Los ejemplos mencionados representan algunos problemas causados por algunos de éstos elementos químicos, los cuales son introducidos como ya se dijo de la chatarra pobremente preparada ó de una chatarra mal clasificada.

5.6. CANTIDAD DE CHATARRA DISPONIBLE.

La disponibilidad media de la chatarra circulante es el 26 % peso del lingote. Varía, no obstante, con relación al producto de la forma siguiente :

CHAPAS	32 PORCIENTO DEL LINGOTE	
RIELES	24 "	"
PERFILES	19 "	"
FLEJE CALIENTE	24 "	"
FLEJE FRIO	32 "	"
TUBOS	38 "	"
PIEZAS DE FORJA	47 "	"

La chatarra de proceso varía también con la naturaleza del producto :

	% DE ACABADO DE ACERO.
CONSTRUCCION DE BUQUES	19
VEHICULOS DE MOTOR	30
FERROCARRILES	38
FORJADO DE ESTAMPACION	10

El promedio de chatarra de proceso devuelto a las acerías es del 20 % del acéero acabado utilizado, que equivale al 14 % del peso del lingote equivalente.

La devolución de la chatarra de capitál varía sensiblemente con las condiciones económicas en un momento determinado, por ejemplo, cuando la industria de acéero trabaja a pleno rendimiento el precio de ésta chatarra asciende.

Esto incita a su compra, así como al desecho de instalaciones anticuadas ó superfluas.

En épocas de depresión comercial, disminuye la demanda y decrece la cantidad disponible.

La chatarra de capitál puede alcanzar hasta el 20 % del peso del lingote.

Por tanto, en general, el 60 % ó más del peso del lingote disponible para su refundición. Por diversas razones un 10 % se utiliza en altos hornos y fundiciones en un país industrialmente desarrollado, un 50 % de la producción de lingote se hace a partir de chatarra refundida.

5.7. INMOVILIZACIONES.

Aparte de su costo inicial, la chatarra ofrece una nueva ventaja en cuanto al costo de la instalación.

La producción de lingotes a partir de la chatarra precisa tan sólo de un horno de arco eléctrico, mientras que el arrabio líquido, además del equipo normal en la obtención del acero, necesita mezcladoras, altos hornos y en ocasiones, plantas de sinterización, hornos de coque y hasta minas de minerales con sus plantas de extracción. Es, por tanto, una ventaja considerable utilizar la cantidad máxima de chatarra desde el punto de vista de inmobilizaciones, costos de fabricación y del material.

Si es posible, se ha de evitar el empleo de altos porcentajes de chatarra oxidada, a fin de evitar el efecto nocivo del hidrógeno sobre los aceros de alta calidad. Durante el paso del acero por el convertidor A.O.D.

El empleo del gas argón cuando barbotea a través del acero líquido en porcentajes apropiados, reduce hasta cierto punto el contenido de gas hidrógeno.

Capítulo 6

HORNOS DE ARCO ELECTRICO.

6.1. INTRODUCCION.

El horno de arco eléctrico, concebido en un principio para producir acéero fundido, ha adquirido gran importancia en la fabricación de los aceros inoxidables y, aún más, está en vías de convertirse en el equipo de fusión más apropiado para la producción de aceros comerciales a partir de la chatarra.

Ya que en comparación con otros tipos de hornos sus ventajas económicas son cada vez más notables.

Esta evolución, ha sido favorecida enormemente en los últimos años, por la posibilidad de conducir la energía necesaria directamente a la chatarra ó al baño de acéero líquido en forma limpia y muy concentrada; es decir, al realizarse la fusión con rapidez y limpieza. Evitando las impurezas, en especial las originadas por el azúfre del coque o del combustible que sea utilizado.

Aún más, el hecho de que la carga del horno se lleve a cabo en muy poco tiempo; desplazando la bóveda del mismo y que la elevada potencia del transformador produzca en seguida la fusión. Constituyen características particularmente benéficas desde el punto de vista energético y contribuyen a que las reacciones metalúrgicas se lleven a cabo con facilidad y rapidez, todo ésto ayudado por la elevada temperatura de la escoria.

Gracias a la considerable concentración de energía, es factible abreviar la duración de la colada, ésto es, desde la carga hasta la sangría. Dando por resultado tiempos efectivos de producción más cortos , y rendimientos mucho más elevados en comparación con los obtenidos por otros tipos de hornos.

Por ello, resulta fácilmente comprensible que recientemente se hayan instalado en muchas partes hornos eléctricos para la producción de aceros de alta calidad.

6.2. CLASIFICACION DE LOS HORNOS ELECTRICOS.

Los diversos tipos de hornos eléctricos adoptados actualmente en los procesos de fabricación de los aceros pueden clasificarse como siguen :

(I).- HORNOS ELECTRICOS DE RESISTENCIA.

- a).- Hornos de resistencia no metálica o de electrodo radiante.
ver figura 6.1
- b).- Hornos de resistencia metálica.
ver figuras 6.2 y 6.3

(II).- HORNOS ELECTRICOS DE INDUCCION. (ver figura 6.4)

- c).- Hornos de inducción de baja frecuencia.
- d).- Hornos de inducción de alta frecuencia.

(III).- HORNOS ELECTRICOS DE ARCO.

- e).- Hornos de arco indirecto monofásico.
ver figura 6.5
- f).- Hornos de arco directo monofásico ó trifásico.
ver figura 6.5

Aunque en el proceso de fabricación de los aceros inoxidable mediante el método dúplex, el tipo de horno que se utiliza en combinación con el convertidor A.O.D, es el de arco eléctrico directo monofásico, por ser éste el que más ventajas brinda al proceso de obtención de los aceros inoxidable que estudiamos a lo largo de éste trabajo. Es importante mencionar a los demás tipos de hornos electricos para así poder tener una comparación importante entre las características de cada uno de ellos contra el utilizado.

6.3. HORNOS ELECTRICOS DE RESISTENCIA.

6.3.a .- Horno de resistencia no metálica ó de electrodo radiante.

El horno de electrodo radiante es un horno eléctrico en el cual el propio electrodo actúa como resistencia, y el paso de la corriente irradia el calor necesario para la fundición del metal.

Dicho electrodo es, en general, un cilindro de grafito que se instala sobre el eje de la cámara del horno.

En éste horno se alcanzan temperaturas de hasta 2000 °C, en el electrodo y 1650 °C. en la cámara con una alimentación monofásica de 500 volts.

Su esquema se muestra en la figura (6.1)

6.3.b .- Horno de resistencia metálica.

El horno de resistencia metálica, es un horno eléctrico que básicamente convierte la energía eléctrica en energía calorífica.

Puede ser una cámara en la cual la resistencia metálica se encuentra muy próxima al metal a fundir, logrando el calor necesario para la fundición del metal. Además de ser ayudado grandemente de materiales refractarios, para conservar el máximo calor posible.

O bien puede ser un crisol colocado entre dos resistencias metálicas las cuales mediante la radiación producida por las mismas, logran la cantidad de calor necesario para poder fundir el metal que se desee, este método puede permitir regular la cantidad de calor necesario que se requiera, ya que está ligada directamente a la cantidad de energía eléctrica que se proporciona a las resistencias metálicas. Ver figuras 6.2 y 6.3

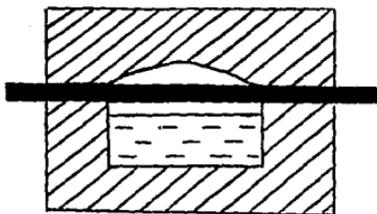


Fig. 6.1. Horno de resistencia no metálica ó de electrodo radiante.

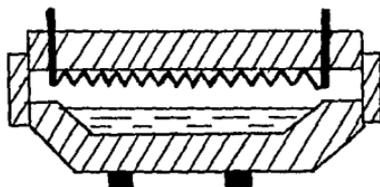


Fig. 6.2. Horno de cámara con resistencia metálica.

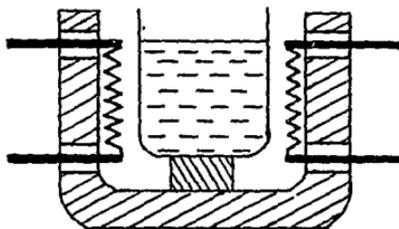


Fig. 6.3. Horno de crisol con resistencia metálica.

6.4. HORNOS ELECTRICOS DE INDUCCION.

El horno eléctrico de inducción de alta frecuencia, es muy empleado para la fabricación de aceros de alta calidad.

Utilizándose principalmente para la elaboración de aceros de muy elevada aleación y precio, en especial aceros para herramientas, inoxidable, etc.

En estos hornos, el calentamiento del metal se hace por medio de corrientes eléctricas inducidas en la chatarra, que se carga en el horno y que llegan a fundirla, alcanzándose temperaturas muy elevadas.

En 1925, se instaló el primer horno, que pudieramos llamar industrial, con una capacidad de 350 kg. El funcionamiento de éstos hornos se puede comparar al de un transformador cuyo secundario está constituido por la materia que se requiere calentar y que es recorrida por una corriente inducida por el paso de la misma por el enrollamiento primario de una corriente alternativa de alta frecuencia. Ver figura 6.4.

Los hornos de inducción de alta frecuencia pueden ser de revestimiento ácido ó básico.

El revestimiento ácido se suele emplear para la fabricación de aceros cuando se utiliza como materia prima chatarra bien seleccionada.

Para la fabricación de aceros inoxidables, de aleaciones cromo - níquel, para resistencias eléctricas y para aceros altos en manganeso, se suele emplear el revestimiento básico.

Los tiempos necesarios para la fusión y para la duración de operación, en hornos de inducción de alta frecuencia, son mucho más cortos que en los hornos eléctricos de arco.

Por lo tanto, para una misma capacidad por colada, la producción total diaria de los hornos de inducción de alta frecuencia es bastante mayor que la de los hornos eléctricos de arco.

Aunque la carga ó capacidad de éstos hornos no es muy grande y en la actualidad, los mayores son de 10 toneladas. En cambio hay hornos eléctricos de arco de hasta 400 toneladas.

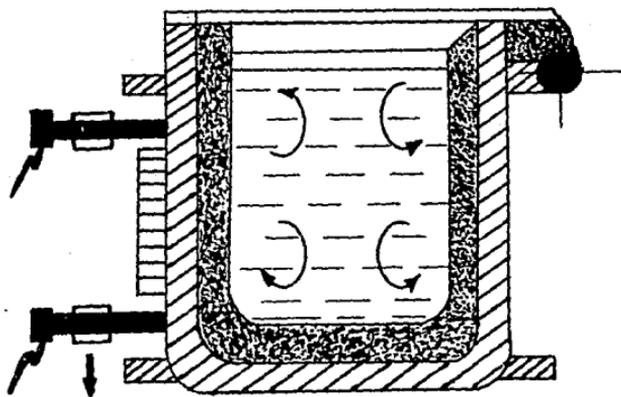
Los hornos eléctricos de arco son mucho más utilizados por la industria, en comparación con los hornos de inducción.

La frecuencia de la corriente eléctrica empleada en los hornos de inducción varía de 500 a 15,000 ciclos por segundo, según sea la capacidad del horno y el generador empleado.

En instalaciones muy pequeñas, se utilizan muy altas frecuencias, hasta de 100,000 ciclos por segundo.

Una de las causas principales de que los hornos de arco eléctrico, sean más utilizados que los hornos de inducción, es que, los hornos de inducción son grandes consumidores de energía eléctrica, lo cual acarrea grandes costos a las plantas que cuentan con ellos.

Fig. 6.4. Horno de inducción de alta frecuencia sin núcleo magnético.



6.5. HORNOS ELECTRICOS DE ARCO.

Se pueden dividir a los hornos eléctricos de arco en :

- e).- Hornos de arco indirecto monofásico.
- f).- Hornos de arco directo monofásico ó trifásico.

6.5.e .- Homo de arco indirecto monofásico.

En éste tipo de hornos al igual que en los hornos eléctricos de electrodo radiante, el propio electrodo actúa como resistencia, y el paso de corriente genera el calor para poder fundir el metal. Este horno consta de dos electrodos que se desplazan horizontalmente hasta que sus puntas forman un arco que nunca está en contacto con el metal (chatarra).

Un horno de éste tipo puede girar por completo cuando el metal se ha licuado para suprimir los recalentamientos de la bóveda provocados por el arco.

En general, solo se construyen hornos de poca capacidad y se emplean bastante en las fundiciones pequeñas y medianas de hierro colado y otros metales.

Un tipo más notable de ésta clase de hornos es un modelo norteamericano, el cual se instala con corrientes monofásicas y para equilibrar la línea son necesarios tres hornos ó bien con un concatenado especial del transformador.

6.5.f .- Homo de arco directo monofásico ó trifásico.

Los hornos más comunmente usados son derivaciones del Heroult de electrodos verticales, son muy sencillos y de fácil manejo, y se diferencian de éste último solo en algunas particularidades en su construcción.

Un horno de arco eléctrico está constituido esencialmente por las siguientes partes : Crisol, Bóveda, Electrodos, Portaelectrodos e Instalación.

Según se muestra en la figura 6.6.

La función de cada parte se describe a continuación :

Crisol .- Está constituido por un recipiente de plancha sellada ó remachada con dos aberturas, una para la carga y otra para la colada. De altura y diámetro variables.

La inversión se obtiene de un dispositivo electromecánico ó bien hidráulicamente con una electrobomba que acciona uno ó más cilindros hidráulicos. Ver figura 6.7.

Además lleva un recubrimiento refractario. El crisol puede variar de capacidad desde algunos cientos de kilogramos, hasta unas cien toneladas.

Bóveda .- Está construida con un material refractario (Normalmente se usa el silicio, por ser el más económico) Dejando tres aberturas para el paso de los electrodos.

Actualmente, se está difundiendo mucho el empleo de la Mullita ó Magnesita especial. Su duración varia entre 50 y 150 coladas, según las condiciones de trabajo a que se sometan.

Electrodos .- Conducen la energía eléctrica al lugar donde se realiza la fusión, deben soportar temperaturas elevadísimas y resistir la acción corrosiva de las escorias, por lo cual, son fabricados con :

Antracita calcinada de coke y de grafito. Cuando derivan de los dos primeros productos, se llaman electrodos de carbón amorfo, en el otro caso reciben el nombre de electrodos de grafito natural.

Los primeros no son muy usados pues se emplean sobre todo en hornos para aleaciones férricas. Los electrodos de grafito, se fabrican de dos formas : Una utiliza el grafito natural de Madagascar, Ceylán ó de Italia, y el otro se produce de un elemento de coke de petróleo, que después es grafitizado en hornos eléctricos especiales, en donde la resistencia está representada por los mismos electrodos, en el interior del horno se alcanzan temperaturas de hasta 3000 °C.

Este tipo de electrodos se conocen como electrodos de grafito Acheson.

En los hornos de arco tiene mucha importancia el consumo de electrodos referido a las toneladas de producto terminado, lo cual es índice seguro de la marcha normal del horno.

Dadas sus distintas características, los electrodos no pueden tener el mismo consumo, de modo que su precio varía en relación a su calidad y cada uno de ellos tiene su propio campo de aplicación.

Brazos portaelectrodos .- Sostienen con varillas a los tubos de cobre que llevan la corriente y a las bridas de cobre que sujetan a los electrodos. Tanto las bridas como los electrodos deben calibrarse para que puedan soportar, sin calentarse en exceso, la intensidad de corriente generada por el transformador. Los brazos portaelectrodos se conectan con todo el sistema mecánico necesario a sus operaciones.

Transformador .- La corriente llega a los hornos desde líneas de alta tensión (13 ó 23 KV), y con transformadores adecuados se reduce desde 220 a 60 volts.

El disponer de varios voltajes se deriva de las necesidades del proceso metalúrgico, ésto es, mientras que inicialmente se emplean elevados valores para acelerar la fusión, se reduce en el período de afino.

El cuarto del transformador y su cuadro de maniobras deben ser manejados y construidos por especialistas.

Regulador automático .- En los primeros años de los hornos eléctricos de arco, los electrodos se regulaban a mano, lo cual éra lento e insuficiente, principalmente durante la fusión.

Los hornos modernos están provistos de dispositivos que aseguran la absorción de una potencia constante y eliminan las variaciones bruscas de corriente y las consiguientes oscilaciones que perturban grandemente la red de alimentación. Se pueden regular los hornos a potencia constante, a intensidad constante y también a factor de potencia constante.

El regulador de intensidad constante, funciona con la corriente de alimentación del horno que actua sobre los electrodos por medio de servomotores, los cuales a su vez, apartan los electrodos con la máxima rapidéz.

Los servomotores pueden ser hidráulicos ó eléctricos. El más común suele ser el servomotor hidráulico, el cual se muestra en la figura 6.7.

Pozo de colada .- Es una de las partes fundamentales de la acería, suele disponer de dos grúas. La mayor de ellas con capacidad para llevar la cuchara y hacer la colada del acérola, y otra menor, para el movimiento de lingotes, tochos de acérola, refractarios, etc.

El cuidado y limpieza en el pozo de colada, en la preparación de las lingoteras, limpieza de las mismas en su zona interior material refractario, etc. Es de mucho interés cuando se desean fabricar aceros inoxidables de alta calidad.

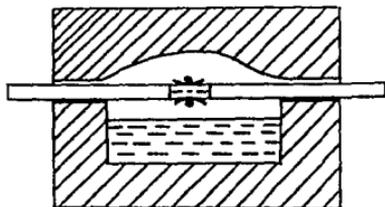
Además de que el horno eléctrico de arco representa el único equipo universal de fusión en el que, con completa independencia del tipo de los materiales de carga, pueden fabricarse una amplia gama actual de aceros, desde los simples hasta los aceros inoxidables, que estudiamos a lo largo de éste trabajo.

Afortunadamente, en América latina, el desarrollo de los hornos eléctricos no se ha quedado atrás y, actualmente gran cantidad de los aceros de alta calidad son obtenidos por medio de este tipo de hornos.

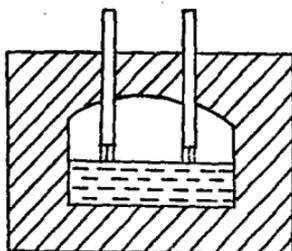
Es por ésto último, que nuestro estudio se abocará a la fabricación de los aceros inoxidables en México, utilizando para ello el método dúplex (Horno Eléctrico de Arco - Convertidor A.O.D.) e indicando las ventajas que se obtienen mediante éste proceso.

Así como los problemas que se presentan en la fabricación de los mismos y sus posibles soluciones.

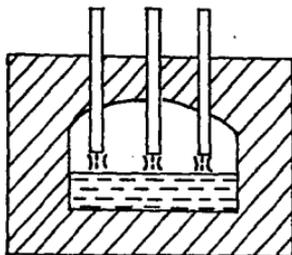
Fig. 6.5. ESQUEMA DE LOS PRINCIPALES TIPOS DE HORNOS ELECTRICOS DE ARCO.



HORNO DE ARCO INDIRECTO MONOFASICO.

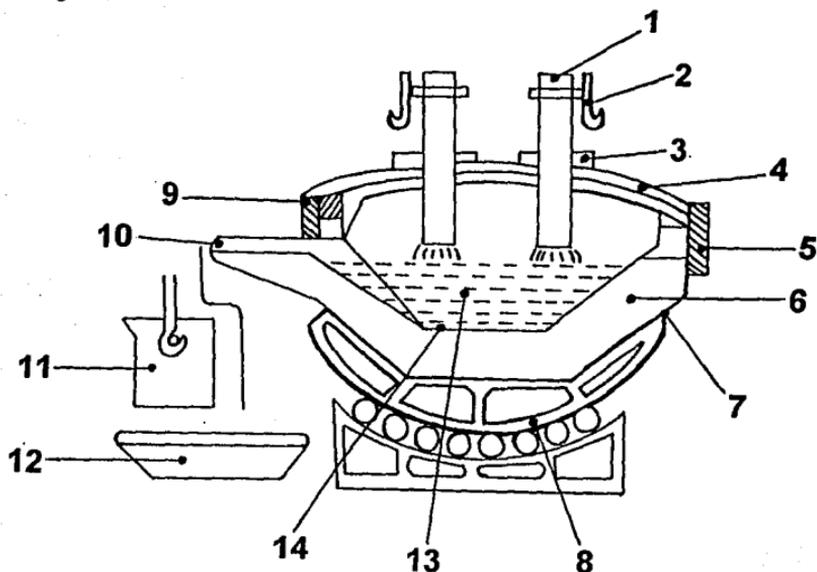


HORNO DE ARCO DIRECTO MONOFASICO.



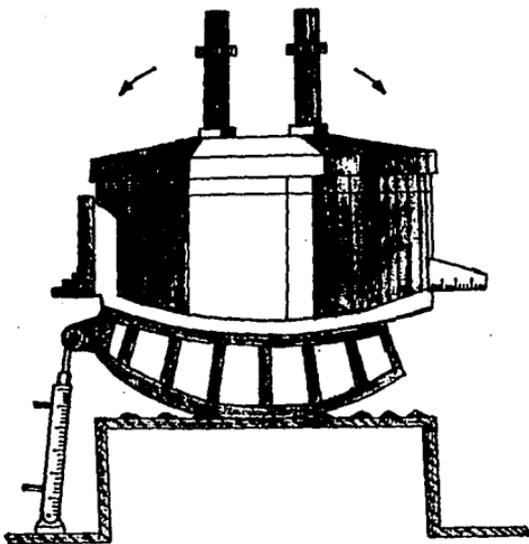
HORNO DE ARCO DIRECTO TRIFASICO.

fig. 6.6. ESQUEMA DE UN HORNO ELECTRICO DE ARCO.



- 1.- ELECTRODOS.
- 2.- MORDAZA Y PORTAELECTRODOS.
- 3.- BOQUILLA DE ELECTRODO.
- 4.- BOVEDA.
- 5.- PUERTA DE TRABAJO.
- 6.- REVESTIMIENTO REFRACTARIO DEL CRISOL.
- 7.- CASCO DE LAMINA.
- 8.- CREMALLERA DE VOLTEO.
- 9.- PARED LATERAL.
- 10.- CANAL DE COLADA.
- 11.- OLLA DE COLADA.
- 12.- CAJA DE ESCORIA.
- 13.- BAÑO LIQUIDO.
- 14.- PISO O SOLERA.

Fig. 6.7 REGULADOR AUTOMÁTICO PARA UN HORNO DE ARCO ELÉCTRICO.



REGULADOR AUTOMÁTICO TIPO BALANCI, MANIOBRADO POR MEDIO DE UN CILINDRO HIDRAULICO.

6.6. CLASIFICACION DE LOS HORNOS ELECTRICOS DE ARCO DE ACUERDO CON LA CLASE DE REFRACTARIOS EMPLEADOS.

Aunque ya se indicó una clasificación de los hornos eléctricos de arco de acuerdo a su forma de conducción eléctrica, es importante mencionar una clasificación de los mismos pero de acuerdo al recubrimiento interior refractario que se tenga en el horno independientemente de su forma de conducción eléctrica. Ya que de éste recubrimiento depende en gran parte, el tipo de acéero que se desee, como se indicará más adelante.

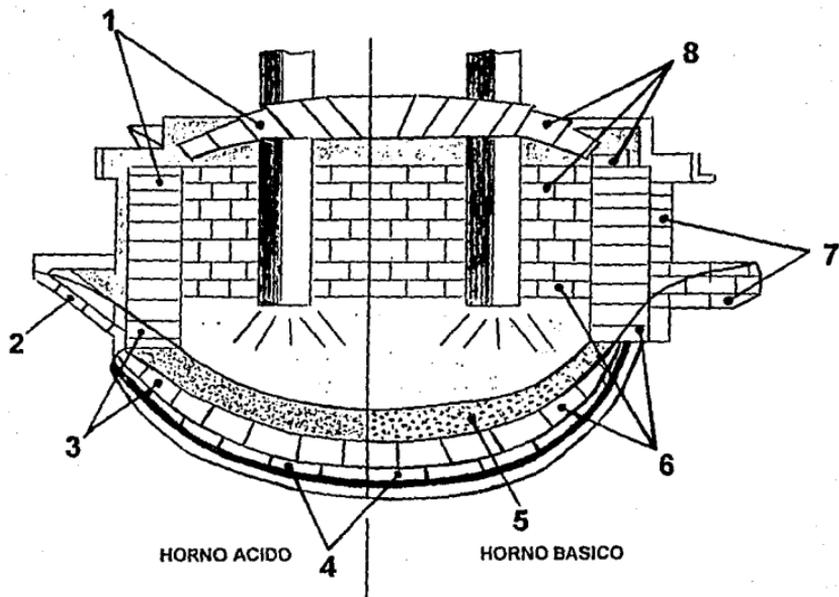
Los hornos eléctricos de arco de acuerdo con la clase de revestimiento empleado, se clasifican en dos grupos :

6.6.1).- HORNOS BASICOS : Que son los más importantes y también los más empleados para fabricar aceros de alta calidad, y en los que la solera se prepara con Magnesita ó Dolomita. Empleando además chatarra corriente. Ver figura 6.8.

6.6.2).- HORNOS ACIDOS : En los que la solera es de arena siliciosa. Se emplean mucho menos que los anteriores y se usan casi exclusivamente para fabricar piezas de acéero moldeado. Ver figura 6.8.

A partir de 1950 se utilizan, en las paredes de los hornos básicos, refractarios de Magnesita y Magnesita - Cromo y, recientemente, en las bóvedas de estos hornos se han comenzado a emplear con gran éxito ladrillos refractarios altos en alúmina (Al₂O₃ Mayor al 70 %).

fig. 6.8 DIFERENTES CALIDADES DE REFRACTARIOS UTILIZADOS EN LOS HORNOS ELECTRICOS DE ARCO ACIDOS Y BASICOS.



- 1.- LADRILLOS DE SILICE.
- 2.- LADRILLOS SILICO - ALUMINOSOS.
- 3.- ARENA SILICIOSA.
- 4.- SILICO - ALUMINOSOS.
- 5.- MAGNESIA CALCINADA.
- 6.- LADRILLOS DE MAGNESIA O MAGNESIA - CROMO.
- 7.- LADRILLOS SILICO ALUMINOSOS.
- 8.- LADRILLOS DE SILICE (ANTES DE 1955)
LADRILLOS ALTOS EN ALUMINA (MENOS DE 70 %)
(DESPUES DE 1955).

6.7. VENTAJAS QUE TIENE LA FABRICACION DE ACEROS EN HORNOS ELECTRICOS DE ARCO.

Una de las principales ventajas de los hornos eléctricos es que su instalación es mucho más sencilla y menos costosa que la de cualquier otro tipo de horno de los utilizados para fabricar cualquier acero. Ver figura 6.9.

Para cualquier empresa ó grupo industrial es mucho más fácil montar hornos eléctricos, que los costosos hornos Siemens ó convertidores.

El horno eléctrico se carga con chatarra, que puede adquirirse en mercados muy diversos.

En cambio, los hornos Siemens y los convertidores exigen grandes cantidades de arrabio o lingotes de hierro, generalmente controlados por poderosos grupos siderúrgicos que, en ocasiones, pueden poner dificultades de suministro de materiales.

6.8. MATERIAS PRIMAS EMPLEADAS PARA LA FABRICACION DE ACEROS EN HORNOS ELECTRICOS DE ARCO.

La principal materia prima empleada para la fabricación de aceros en hornos eléctricos básicos es la chatarra de hierro dulce ó de acero.

Como elementos de adición auxiliares se cargan, también en los hornos eléctricos pequeñas cantidades de fundición, de mineral de hierro y de ferroaleaciones.

Para la formación de escoria se añade caliza, cal, arena, coque, y al final del proceso se añade ferrosilicio, ferromanganeso, aluminio, carbúo de calcio, y silico - calcio, como elementos desoxidantes y auxiliares del proceso.

6.9. EMPLEO DEL OXIGENO EN LOS HORNOS ELECTRICOS DE ARCO.

De la misma forma que en otras instalaciones siderúrgicas, también en los hornos eléctricos de arco, el empleo del oxígeno ha tenido una difusión extraordinaria.

Se suele emplear el oxígeno con dos fines diferentes :

(a).- Inyección de oxígeno entre los trozos de chatarra, en la primera parte del proceso, antes de la fusión. Así se favorece la combustión de gases, que se producen en la cámara del horno, se mejora el rendimiento térmico del proceso, y se acelera la primera etapa de fusión de las cargas.

(b).- Inyección de oxígeno en el baño fundido.

Así se acelera la oxidación de las impurezas principalmente la eliminación del carbono y se reduce la duración del período oxidante.

El empleo del oxígeno reduce el consumo de energía eléctrica, aunque aumenta el consumo de electrodos sensiblemente y acorta la operación.

Aunque normalmente se emplean los electrodos de grafito cuyo diámetro varía desde 60 mm. Para hornos de 5 toneladas.

Y de hasta 800 mm. Para hornos de 350 tons. Su longitud varía desde 2 hasta 3 metros.

6.10. TIEMPOS DE OPERACION Y CONSUMOS APROXIMADOS EN UN HORNO ELECTRICO DE ARCO DE 100 TONS.

Mediante pruebas experimentales realizadas a un horno eléctrico de arco de 100 toneladas, se obtuvieron los siguientes resultados :

- Tiempo de fusión : 153 Minutos.
- Tiempo de refinación : 15 Minutos.
- Tiempo de vaciado : 30 Minutos.
- Tiempo de colada a colada : 198 Minutos. para 92.2 Tons.
de acero líquido (t.a.l).

CONSUMOS :

MERMA	6.0 %
ELECTRODOS	5.0 Kg / t.a.l
ENERGIA	642 Kwh / t.a.l
MAGNESITA	2.4 Kg / t.a.l
DOLOMITA	9.0 Kg / t.a.l
CAL	5.7 Kg / t.a.l

REFRACTARIOS :

REVESTIMIENTO	160 Kg / colada
TAPAS	70 Kg / colada
MANO DE OBRA	0.9 HH / t.a.l

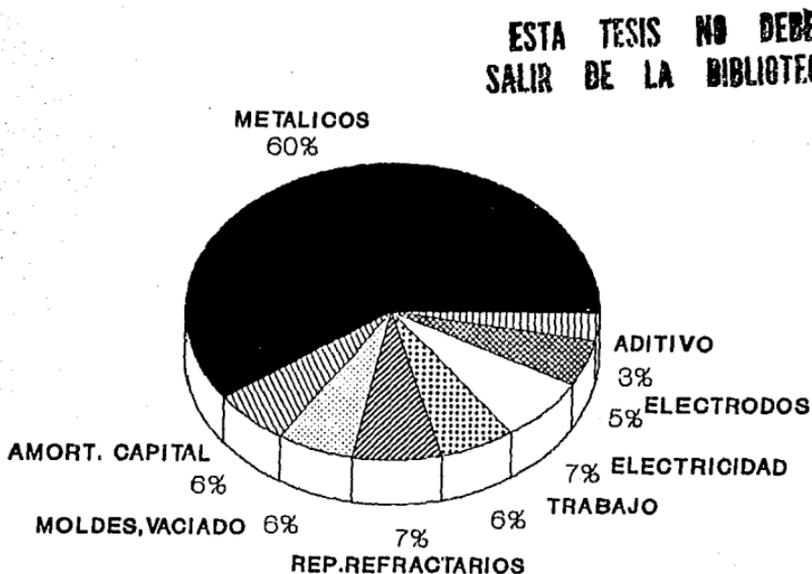
(HH).- Horas Hombre.

FUENTE : Apuntes de las asignaturas de procesos de manufactura de procesos (I) y procesos industriales mecánicos.

FACULTAD DE INGENIERIA , U.N.A.M

Ing. Raúl Espinosa Islas.

**FIG. 6.9 DISTRIBUCION DE COSTOS DE OPERACION
EN EL HORNO ELECTRICO DE ARCO.**



**FIG.6.10. LA GRAFICA ANTERIOR NOS MUESTRA EN FORMA
ADECUADA LOS PRINCIPALES COSTOS DE OPERACION
DE UN HORNO ELECTRICO DE ARCO.**

**CONSIDERANDO PARA ELLO COSTOS DE ENERGIA
MATERIAS PRIMAS,MANO DE OBRA, ETC.
MOSTRANDO VARIACIONES DE PORCENTAJES Y TIPOS.**

Capítulo 7

TECNOLOGIA DE LIMPIEZA DEL ACERO.

Actualmente las inversiones de modernización de las empresas fabricantes de acéero están concentradas en el campo de la metalúrgica secundaria.

Los requerimientos tecnológicos de las aplicaciones actuales de los aceros es imposible obtenerlos con los procesos convencionales, los cuales han quedado relegados como máquinas de fundir.

La tecnología de metalúrgica secundaria ofrece los medios para incrementar la calidad requerida actualmente de los aceros, a la vez que un incremento en la productividad de las instalaciones más caras de las acerías : los hornos eléctricos de arco.

Las limitaciones metalúrgicas del horno eléctrico de arco son las siguientes :

(1).- No es posible cambiar rápida y completamente a condiciones reductoras después de la fusión y oxidación, así mismo, no se pueden evitar las contaminaciones posteriores de oxígeno de la escoria y de refractarios contaminados con los óxidos metálicos.

(2).- Todas las reacciones entre un baño de acéero y una escoria refinante - desoxidación, refinación, desulfuración, solo proceden a velocidades óptimas si la materia puede intercambiarse entre el acéero y la escoria a un nivel de difusión muy corto y al más íntimo contacto posible entre fases.

En los hornos de arco, las áreas específicas de interfases entre el acéero y la escoria son pequeñas. Las condiciones pueden mejorarse significativamente por un mezclado usando métodos mecánicos, neumáticos ó electromagnéticos, pero ésto representa un costo elevado en tiempo.

(3).- Las reacciones que son favorecidas por un vacío ó dilución parcial (Desgasificación y Descarburación), se lleva a cabo de manera incompleta.

Los fenómenos fisicoquímicos implicados en la fabricación del acéero están sujetos a un proceso difusional, junto con un proceso químico. La oxidación del acéero líquido es una reacción de primer orden, y la velocidad real de oxidación

está limitada por la rapidéz con la cual el oxígeno se ponga en contacto con el acéero por difusión .

La desulfuración es un paso progresivo de dicho elemento ,desde el metal a la escoria que viene determinada por la difusión del mismo en el metal hasta la línea de intercambio metal - escoria .

En un proceso químico, la transferencia de masa puede aumentarse incrementando la superficie específica, una mayor diferencia de concentración ó con el coeficiente de difusión.

Por tanto, las velocidades de refinación del acéero y la eficiencia de esta refinación, dependen fundamentalmente del grado de contacto alcanzado entre las fases involucradas, que es básicamente la ventaja de la metalúrgia secundaria, sobre los procesos convencionales.

Los propositos de la metalúrgia secundaria son los siguientes :

- Desulfuración.
- Descarburación.
- Desoxidación.
- Control de la forma de sulfúros.
- Reducción por CO.
- Degasificación (H, N, O).
- Ajustes de química a niveles estrechos.
- Homogeneización de composición y temperatura.
- Aglomeración y flotación de inclusiones.
- Modificación a las inclusiones de óxidos.
- Reducción en el nivel de elementos residuales nocivos.

Los procesos de refinación secundaria, pueden llevarse a cabo en ollas, moldes ó convertidores.

La selección de los procesos dependen de diversos factores : La técnica que se tenga en operación, condiciones económicas, programas de producción, tipos de aceros, la calidad requerída del producto final, materias primas, energía e instalaciones disponibles, tamaño de la colada, sistemas de colado, y lay out de la planta.

Aunque un proceso específico no obtiene el total de los resultados óptimos en rendimiento para cada objetivo en términos de calidad y eficiencia.

Los procesos tradicionales tenían fuertes limitaciones metalúrgicas y económicas en la eliminación de los elementos residuales, que es la mayor influencia sobre la calidad del producto : Gases (O, N, H) ; Inclusiones (S, P, Zn, Sn, etc).

Los procesos de refinación secundaria surgieron hace unas dos décadas, por la necesidad de fabricar aceros con una mayor calidad, exigida por lo nuevos requerimientos cada vez más críticos de la industria moderna, a un costo que permitiera ser competitivo en el mercado internacional.

Dentro de la tecnología de fabricación de aceros conocida como refinación secundaria del acero, se encuentra el proceso dúplex llamado **A.O.D** que se refiere a la descarburización por medio de oxígeno y argón.

Capítulo 8

PROCEDIMIENTO (A.O.D) (ARGON - OXIGENO - DESCARBURACION)

El procedimiento A.O.D utiliza un convertidor especial con soplado de oxígeno y argón por la zona inferior del equipo. Se utiliza casi exclusivamente para la fabricación de aceros inoxidable de alta aleación con muy bajo contenido de carbono y alto contenido de cromo. Se utiliza mucho, para fabricar aceros con carbono al 0.02 % ; cromo al 18 % y níquel al 9 %.

Este proceso comenzó a desarrollarse hacia 1953, ante las dificultades que había para fabricar en los hornos eléctricos de arco, aceros inoxidable de muy bajo contenido de carbono.

Las dificultades principales eran debidas a que los electrodos cedían carbono al baño y que, al intentar disminuir el carbono del baño metálico por oxidación, se producían también unas pérdidas considerables de cromo, el cual al oxidarse pasa a la escoria en forma de óxido, y se pierde con el consiguiente perjuicio económico.

En los hornos eléctricos, en condiciones normales, es muy difícil fabricar aceros muy bajos en carbono y con buen rendimiento económico, hablando de aceros con un porcentaje de carbono menor a 0.08 % y altos en cromo ó sea de 16 a 20 %.

Cuando se fabrican aceros de muy alto porcentaje de cromo es imprescindible emplear Ferrocromo fino (Bajo contenido de carbono), la dificultad que surge con esto es que el ferrocromo fino es más caro que el ferrocromo duro (Alto carbono), que no se puede utilizar en la fase final del proceso porque eleva mucho el contenido de carbono en el baño.

En el proceso A.O.D, se puede utilizar el ferrocromo duro que es más barato, ya que en éste proceso aunque el carbono del baño aumenta en una fase de operación, luego la etapa de descarburación no ofrece dificultades y, además, en esa fase descarburante del proceso no se oxida el cromo.

El proceso A.O.D tiene la ventaja de que, durante la fase oxidante, se inyecta argón y oxígeno y se consigue que se produzca la oxidación del carbono con preferencia a la oxidación del cromo.

Así, se pueden fabricar económicamente y sin dificultad aceros de altos porcentajes de cromo. (16 a 20 %), con contenidos de carbono de hasta 0.03% sin muchas pérdidas considerables de cromo.

El oxígeno empleado, es utilizado para reducir el contenido de carbono y mantenerlo a límites muy pequeños.

La figura 8.1 muestra una sección transversal de un convertidor A.O.D.

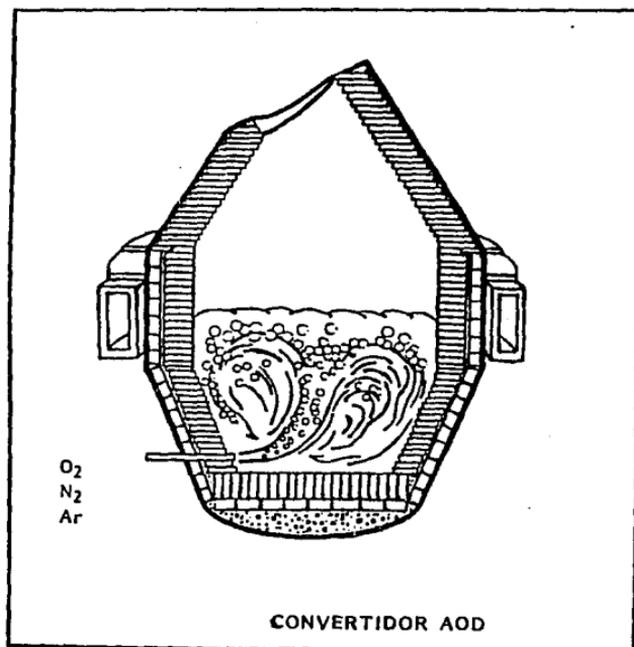


FIGURA 8.1

8.1. FABRICACION DE ACEROS INOXIDABLES EN CONVERTIDOR A.O.D

Los convertidores A.O.D trabajan siempre en procesos dúplex, combinados generalmente con un horno eléctrico y en ocasiones con un convertidor con oxígeno. La primera parte de la fabricación se hace generalmente en hornos eléctricos y la segunda en un convertidor A.O.D.

En el proceso se emplean generalmente para la carga chatarras de acero inoxidable Cromo - Níquel. Y así se adiciona chatarra al alto carbono, ó lingote de hierro, para conseguir en el horno eléctrico un baño fundido con la composición siguiente :

C = 0.75 % , Si = 0.50 % , y Cr = 18 %.

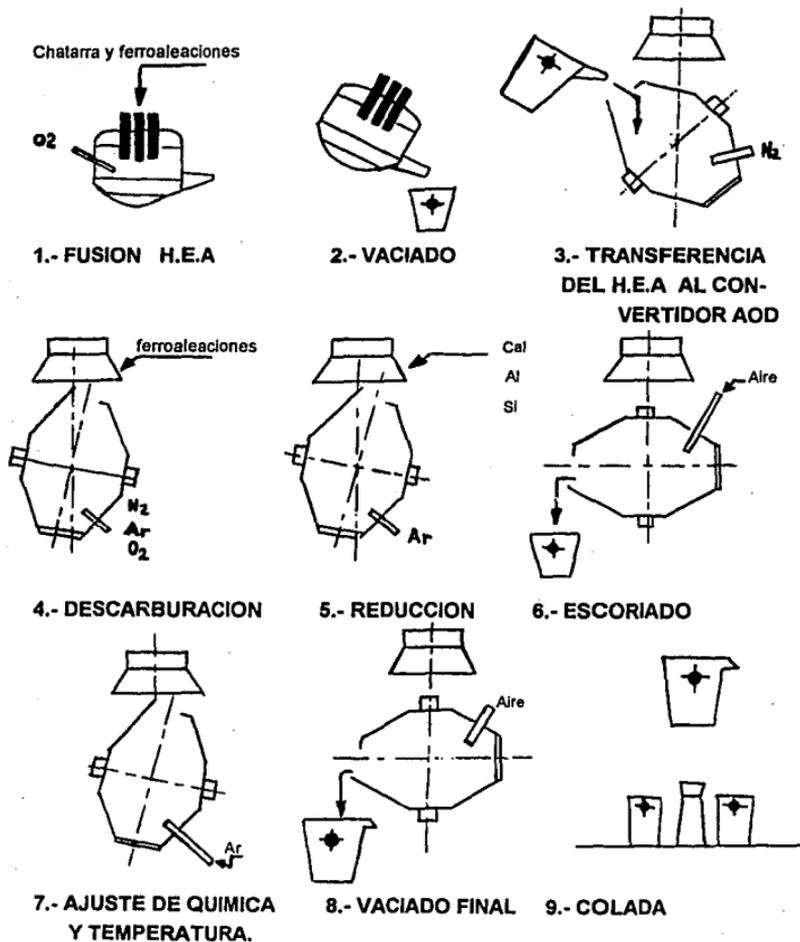
Al final de ésta fase de fusión y ligero afino, se toman muestras para conocer la composición y temperatura del baño. Luego se desescoria y se pasa la carga líquida al convertidor A.O.D, donde su operación será la siguiente :

- 1).- Soplado en 3 períodos con proporciones variables de oxígeno y argón.
Al comenzar se emplea más oxígeno que argón. Se comienza con una proporción oxígeno / argón de 3 a 1.
Luego de 1 a 1 , y al final de 1 a 3 .
- 2).- Se hacen adiciones de cal y ferrosilicio, y se forma una escoria básica con una relación de CaO / Si O₂ igual a 2.5 aprox.
- 3).- Se hace burbujear argón, para favorecer la desulfuración del acéero.
- 4).- Se ajusta la composición y la temperatura.
- 5).- Se voltea el convertidor y se cuela el acéero a la cuchara.

El tiempo total empleado en el proceso es de 85 minutos en promedio, el cual varía según el contenido de carbono inicial.

Para mayor claridad del proceso A.O.D, ver figura 8.2.

Figura 8.2. Proceso A.O.D para aceros inoxidables.



8.2. ASPECTOS DE CALIDAD.

El proceso tiene tres ventajas principales : Dilusión, Mezclado y Desgasificación. Esto permite un contacto metal - escoria y gas - metal excelente dando por resultado una alta calidad del producto en los aspectos siguientes :

(1).- Bajos Contenidos de Gases : La etapa reductora con la inyección de argón es particularmente efectiva para controlar los niveles de oxígeno, hidrógeno y nitrógeno, donde se tienen los siguientes valores :

O = 40 - 70	ppm	(partes por millón)
N = 150 - 200	ppm	Aceros Inoxidables.
H = 2 - 4	ppm	

(2).- Mejor Microlimpieza. Bajo nivel de inclusiones :

Esta característica del proceso fué inmediatamente reconocida en los aceros nitrogenados, aceros al silicio y aceros con requerimientos de extremada limpieza donde se observó una mejoría notable en cuanto a morfología, y además tamaño y frecuencia de inclusiones.

(3).- Bajos Contenidos de Azufre :

Debido al excelente mezclado, existe una buena correlación entre el azufre final esperado y la relación de basicidad de la escoria, ayudado además por un baño bien desoxidado en la etapa reductora. La desulfuración se lleva a cabo en 5 minutos. En la fabricación de aceros inoxidables, se obtienen fácilmente azufres finales de 0.005 % a 0.007 % partiendo de 0.025 % - 0.030 % con una sola escoria.

(4).- Incremento en el control de composición :

El proceso tiene una gran capacidad para controlar el análisis químico final en rangos muy cerrados de manera precisa. Esta resulta del peso exacto del baño líquido, empleo del 100 % de oxígeno inyectado y esencialmente una reducción de la escoria. Adicionalmente la capacidad de alear de manera precisa conduce una respuesta más uniforme al tratamiento térmico subsecuente.

(5).- Control en las temperaturas de vaciado :

Son fácilmente controlables las temperaturas de vaciado en un rango de más menos 5 °C.

(6).- Bajos contenidos de elementos residuales :

Plomo, Estaño, Bismuto y otros elementos son fácilmente removidos en el proceso A.O.D. a niveles muy bajos.

(7).- Mejora de propiedades físicas :

En el caso particular de los aceros que se procesan en el proceso A.O.D para la fabricación de piezas fundidas se ha observado un incremento en la ductilidad y tenacidad a niveles de resistencia equivalentes, así como una mejora de resultados de impacto.

En la tabla 8.1 se muestran las cantidades típicas en aceros inoxidables mediante proceso dúplex (H.E.A - A.O.D) de residuales.

En la tabla 8.2 se muestra la fuente de elementos residuales en los aceros.

8.3. REFRACTARIOS (RECUBRIMIENTOS)

Uno de los mayores problemas durante la introducción del proceso A.O.D. fué el alto consumo de refractarios.

Esto debido a las características del proceso bastante severas :

Altas temperaturas, turbulencias del metal líquido, ciclos de temperaturas y escorias ácidas, lo cual provoca un mecanismo de desgaste combinado de corrosión - erosión.

También está presente el daño por choque térmico particularmente entre colada y colada.

Estos problemas se han ido resolviendo satisfactoriamente al aparecer en el mercado productos que reúnen los requisitos siguientes :

A).- Suficiente refractariedad para resistir temperaturas de 1750 °C.

B).- Resistencia química para combatir condiciones de escoria variantes de ácidas a básicas.

C).- Baja porosidad (Permeabilidad), para limitar la penetración de escorias.

D).- Resistencia al choque térmico.

E).- Resistencia en altas temperaturas.

Dentro de los refractarios para revestimientos más utilizados en el proceso del convertidor A.O.D. se encuentran :

1).- MAGNESITA - CROMITA (+ RFG - H22)

2).- REFRACTARIOS DOLOMÍTICOS.

Algunas de sus características se indican en la figura 8.3.a

+ RFG - H22 : Rebonded Fused Grain Magnesite Chrome
(55 Mg O - 20 Cr₂O₃)

H - 22 : 50 % Fused Grain Magnesite Chrome
(55 Mg O - 20 Cr₂O₃)

Los refractarios dolomíticos hace más de una década que se aplicaron al proceso A.O.D. compitiendo ventajosamente con los refractarios de magnesita - cromita, al mejorar su comportamiento y costos efectivos.

Rebonded : Revestimiento.
Fused : Fundido.
Grain : Grano.
Magnesite : Magnesita
Chrome : Cromo

ELEMENTOS RESIDUALES

CANTIDADES TÍPICAS DE ACEROS INOXIDABLES. (HORNO ELECTRICO DE ARCO).

ELEMENTO	CANTIDAD TIPICA
Pb	20 ppm
Sn	100
Co	2000
Cu	1500
Zn	100
Cb	100
As	100
Al	100
Mo	500
Bi	5
Ti	500
V	500
Se	200
Sb	100
N	400
O2	150
P	200
S	150
Si	0.60 (%)
Mn	1.25 (%)
H2	7

(ppm) .- Partes por millón.

TABLA (8.1)

TABLA (8.2). FUENTE DE ELEMENTOS RESIDUALES EN LOS ACEROS.

CHATARRA DE ACEROS AL CARBONO	C , P , S , Cu , Sn
CHATARRA DE ACEROS INOXIDABLES	Bi , Cu , Hf , Mo , P , Pb , S , Se , Sn , Sb , W , Zn
FERROALEACIONES.	Al , Co , Ta , Pb , C , Si
DESOXIDANTES	Al , Si , B , Ti , Tierras raras.
ATMOSFERA	N , H , O

TABLA (8.3. a). REFRACTARIOS PARA A.O.D MAS UTILIZADOS.

REFRACTARIOS CROMITA - MAGNESITA EN (A.O.D) APLICACION	* CORHART	
	ZONAS DE MAYOR DESGASTE RFG	ZONAS DE MENOR DESGASTE H-22
MgO	55 - 56 %	59.1
Cr2O3	20.0	20.3
Al2O3	8.0	6.4
FeO	11.0	9.5
SiO2	2.5	2.9
CaO	0.5	0.6
F2	0.3	-----
TiO2	1.3	0.3
DENSIDAD	3.27 gr / cm ³	3.25
POROSIDAD APARENTE	14 %	15 %

TABLA(8.3.b).REFRACTARIOS PARA A.O.D MAS UTILIZADOS.

REFRACTARIOS DOLOMITICOS PARA A.O.D		*BAKER DOLOMITE.
APLICACION	ZONAS DE MAYOR DESGASTE	ZONAS DE MENOR DESGASTE
DESCRIPCION	YORK FIRED 65 D	YORK FIRED D
MgO	60.5	40.0
CaO	37.0	57.2
Al ₂ O ₃	0.4	0.8
Fe ₂ O ₃	0.5	1.1
SiO ₂	1.4	0.9
DENSIDAD	2.96 gr / cm ³	2.95
POROSIDAD APARENTE	13 %	11 %

8.4. VENTAJAS OBTENIDAS EN EL PROCESO A.O.D

- 1).- El proceso es altamente predecible y reproducible.
- 2).- Se obtienen rendimientos en cromo del 98 % y del Mn del 85 %.
- 3).- Permite la fabricación de aceros inoxidables extra bajo carbono (menores de 0.03 %) sin dificultad.
- 4).- Se obtienen fácilmente contenidos de azufre de 0.002 % - 0.008 % en menos de 5 minutos, partiendo de 0.020 - 0.030 % de azufre.
- 5).- Se pueden procesar sin dificultad cargas hasta con 1.8 % - 2.0 % de carbono inicial.
- 6).- Se obtiene un alto control en la composición y las temperaturas de vaciado.
- 7).- Se obtiene una notable limpieza del acero.
- 8).- Bajos contenidos de gases como : Hidrógeno, Nitrógeno y Oxígeno.
- 9).- Un ahorro en el empleo de ferroligas; al sustituirlas a las de bajo carbono, por alto carbono.
- 10).- Bajos contenidos de elementos residuales : Pb, Estaño, Bismuto.
- 11).- Una mejora en el formado en caliente, sobre todo en los acéros extra bajo carbono, en el desbaste en el molino, disminuyendo así las mermas y trabajo en la preparación del bilete.
- 12).- Incremento de productividad de 28 % a 50 %.

En la tabla (8.4) se muestra una comparación general del proceso convencional (H.E.A) Horno Eléctrico de Arco contra el proceso dúplex (H.E.A - A.O.D) . Para un acéero especificado.

Tabla (8.4)

COMPARACION ENTRE LOS PROCESOS .

PROCESO CONVENCIONAL H.E.A Vs PROCESO DUPLEX H.E.A - A.O.D

ESPECIFICACION DEL ACERO :	- 0.06 % C
	- 19.0 % Cr
	- 9.5 % Ni
	- 2.2 % Mo
	- 0.03 - 0.04 % S

CONVENCIONAL H.E.A DUPLEX A.O.D

CROMO INICIAL	8 - 12 %	19.50 %
CARBONO INICIAL	0.20 - 0.40 %	1 - 1.5 %
TEMPERATURA MAX.	800 - 1850 °C.	1710 °C.
CROMO OXIDADO EN ESCORIA.	6 %	2 %
REDUCCION Y ENFRIAMIENTO	Fe Si Cr Fe Cr bajo carbono	Fe Si CaI
CARBONO FINAL	0.05 - 0.06 %	0.04 %
TIEMPO EN H.E.A PARA 9 TONS.	5 Horas	2.8 Horas
TIEMPO PROMEDIO EN CONVERTIDOR A.O.D	_____	1.5 Horas
INCREMENTO DE PRODUCTIVIDAD EN H.E.A	_____	78 %
RENDIMIENTO DE CROMO	80 - 85 %	98 - 99 %

RENDIMIENTO DE MANGANESO	60 - 65 %	88 - 90 %
BASICIDAD CaO / SiO₂	2.5 - 3.0	1.6 - 1.8
AZUFRE FINAL	0.010 - 0.015 %	0.005 - 0.008 %
CONTROL ANALISIS QUIMICO	60 %	100 %
CONTAMINACION DE C POR CAL O ELECTRODOS.	muy pobable	ninguna

CONCLUSIONES.

Las conclusiones del presente trabajo, como se mencionó anteriormente son el producto de un análisis comparativo realizado entre dos procesos de fabricación de aceros inoxidable, uno de ellos es un proceso convencional de fabricación de aceros inoxidable utilizando un horno eléctrico de arco ó bien un horno de inducción eléctrica.

Y el otro método es un método similar llamado método dúplex de fabricación de aceros inoxidable, el cual se lleva a cabo mediante el empleo del horno eléctrico y de un convertidor A.O.D

el cual opera mediante la inyección de los gases argón y oxígeno para llevar a cabo una descarburización del acéero, o sea un refinamiento del mismo, para obtener un acéero más fino y de mejor calidad.

Aunque antes de hablar en sí del proceso duplex de fabricación de aceros inoxidable, a lo largo de este trabajo se tuvo la necesidad de mencionar en forma particular algunos conceptos indispensables para lograr entender el método dúplex de fabricación de aceros inox.

Entre los cuales se mencionarán que son los aceros inoxidable, como se clasifican, cuales son sus principales composiciones y usos, algunas de sus propiedades mecánicas, la influencia de los elementos de aleación de estos aceros, utilización de dichos elementos de aleación, la forma en que son introducidos al horno eléctrico, los principales tipos de hornos eléctricos y cual es el más utilizado en el proceso dúplex, para que se realiza la limpieza de los aceros, y en sí la descripción general del método dúplex (Horno eléctrico - convertidor A.O.D).

Lograndose con ello algunas ventajas en el proceso dúplex sobre el método convencional como son : se logran obtener rendimientos en cromo de hasta un 98 % y en manganeso del 85% , se obtiene un acéero notablemente limpio en comparación con el obtenido convencionalmente, se tienen bajos contenidos de gases como hidrógeno, nitrógeno y oxígeno, se obtienen comparativas reducciones de elementos residuales, al utilizar chatarra de acéero se reducen los costos de producción.

Además se obtiene una productividad mayor hasta de un 50 % , ya que se acortan los tiempos de operación al tener un alto control en la composición y temperaturas.

Es por estas y muchas causas más que este proceso se considera como el de mayor eficiencia en cuanto a calidad del acéero y costos del mismo al tener mayor productividad, y menores tiempos de operación. Y aunque existen otros tipos de convertidores y procesos diferentes , no son más que una adaptación del proceso aquí nombrado.

Y así como se nombraron sus principales ventajas también existe una desventaja en este proceso, la cual es importante mencionar es el alto consumo de refractarios ó recubrimientos, debido a las características del proceso bastante severas como son : altas temperaturas, turbulencias del metal líquido, escorias ácidas, choques térmicos entre colada y colada, aunque por fortuna estos problemas se han ido resolviendo satisfactoriamente, al aparecer en el mercado productos refractarios de mejor calidad, y más compatibles con el proceso A.O.D.

Aun así ,desde el punto de vista del área productiva, el método dúplex representa una mejor inversión utilizando un convertidor A.O.D, como se observó a lo largo de este trabajo.

APENDICE

IDENTIFICACION DE LOS ACEROS INOXIDABLES.

Dentro de los diferentes métodos de identificación de los aceros inoxidable, se considera como el más exacto y seguro el del análisis químico, aunque es importante hacer la mención de que no todos los talleres ó plantas que utilizan aceros inoxidable disponen de laboratorios químicos adecuados para realizar el análisis químico en forma eficiente.

A continuación, se mencionarán algunas pruebas mecánicas y químicas de fácil aplicación que permiten la identificación de los principales tipos de aceros inoxidable.

PRUEBA MAGNETICA .

Simplemente un imán nos sirve para separar los aceros austeníticos (al cromo - níquel) serie 300 de los aceros martensíticos y ferríticos (al cromo) serie 400. Los aceros inoxidable austeníticos NO SON MAGNETICOS en su estado de recocido, LOS MARTENSITICOS Y FERRITICOS SON MAGNETICOS, no importando el estado en el que se encuentren.

PRUEBA DE CHISPA.

La prueba de chispa es un método muy rápido para identificar aceros, pero se requiere un conocimiento bastante experimentado; sin embargo, con muestras de aceros utilizadas como patrones, se tendrá una guía efectiva para la identificación.

Los aceros del tipo 302, 303 y 316 producen chispas cortas de color rojizo y con pocas explosiones.

Los tipos 308, 309, 310 y 446 emiten pocas chispas cortas de color rojo, con una que otra explosión.

La chispa de los aceros tipo 410, 414, 416, 430 y 431, es abundante, larga y blanca, con pocas explosiones.

Los del tipo 420, 440 A, 440 B, y 440 C, producen chispas largas que van de blanco a rojo con bastantes explosiones.

PRUEBAS DE DUREZA AL TEMPLE.

Los aceros austeníticos (series 300) trabajados en frío, adquieren un ligero magnetismo; por lo tanto, para esos casos el ensayo magnético no es conclusivo.

Los aceros austeníticos calentados en el rango de 1000 a unos 1100 °C. y enfriados con agua, pierden el magnetismo ocasionado por el trabajo en frío y al mismo tiempo su dureza es inferior a 165 Brinell (85 Rb. aprox.)

Los aceros ferríticos calentados a 950 ó 1000 °C y enfriados en aceite, adquieren durezas inferiores a 250 Brinell (24 Rc. aprox.).

Los aceros martensíticos 410, 414, 416 y 431 tratados en la misma forma, toman durezas entre 340 y 400 Brinell. (36 - 43 Rc).

Los martensíticos tipos 420, 420 F, 440 A, 440 B, y 440 C. sometidos al mismo tratamiento toman durezas de unos 500 a 600 Brinell. (52 - 60 Rc. aprox.).

PRUEBAS CON ACIDOS.

En estas pruebas es recomendable comparar las reacciones con muestras cuya composición sea conocida.

Acido Sulfúrico .- Sirve para diferenciar los aceros 302, 304, 316 y 317. La superficie del metal se prepara limpiándolo ó esmerilándolo. Se aplican unas gotas de ácido sulfúrico al 20 % en volúmen.

Los aceros 302 y 304, se atacan rápidamente obscureciéndose la superficie hasta tomar un color marrón ó negro, y formando pequeños cristales verdosos.

El acéero 316, es atacado lentamente tomando en su superficie un color bronceado que oscurece hasta tomar un color marrón y formando pequeños cristales verdosos.

El acéero 317, se comporta de la misma manera que el 316, pero por ser más resistente a la corrosión, su reacción es más lenta.

Acido Clorhídrico .- Esta prueba sirve para separar los aceros por su contenido de cromo, así como los que contengan selenio ó azufre.

Disolviendo muestras iguales en peso en ácido clorhídrico al 50 % se notará que el color verdoso de la solución aumenta con el contenido de cromo; en esta forma es posible separar los tipos 430, 431, 440 y 446.

También es posible separar los aceros austeníticos, ya que el níquel cambia la coloración del cromo verde a verde azulado.

Y si un acéero contiene azufre, producirán al estarse atacando un olor a huevo podrido.

Acido Nítrico .- Esta prueba nos permite separar los aceros inoxidables de otros aceros, ya que los inoxidables no son atacados por el ácido nítrico y los demás aceros sí lo son . Sin embargo deberá cuidarse de no confundir los grados 420 y 440 que sí son atacados por este ácido.

Acido Fosfórico .- Esta prueba, nos permite diferenciar los aceros austeníticos al cromo - níquel, de los aceros austeníticos al cromo - níquel - molibdeno.

Al ácido fosfórico concentrado se le agrega 0.5 a 1 % de fluoruro de sodio y se calienta a 60 - 65 °C.

Se sumergen las muestras. Los aceros 316 y 317 no reaccionan y los aceros 302 , 304 , etc. reaccionan con producción de burbujas.

Sulfato de Cobre .- Esta prueba nos permite distinguir los aceros inoxidables de los aceros comunes. La superficie deberá limpiarse muy bien con lija y desengrasarse perfectamente.

Si se aplican unas gotas de solución de sulfato de cobre al 5 ó 10 % en agua, la superficie que corresponda a los aceros inoxidables no se alterará, en cambio, la superficie de aceros comunes se cobrizará en poco tiempo.

Prueba de Mecanizado .- Los aceros con contenidos de selenio ó azúfre pueden ser separados de los que no contienen estos elementos.

Se analizan colocando las muestras en un tomo para obtener virutas, las cuales, serán cortas y quebradizas para los aceros con contenidos de selenio ó azúfre.

Los otros aceros producirán una viruta larga y tenaz.

BIBLIOGRAFIA .

- Tecnología del acero
José María Lasheras y Estéban
Edit. Cedel.
Barcelona España 1978.

- Catálogo General de Aceros Solar.
Técnica Latrobe Steel Company.
México.

- Limpieza del acero (Convertidor A.O.D)
Cursos y Conferencias.
Ing. Rafael Francisco Mendiola M.
México 1988

- Aceros Inoxidables y Aceros Resistentes al Calor.
(Propiedades, Transformaciones y Normas)
Adrián Inchaurreza Zabála.
Edit. Limusa, México 1981

- El A.O.D y la Refinación Secundaria del Acero Inoxidable.
XII Semana Metalúrgica.
Instituto Politécnico Nacional
México 1985

- Catálogo de especificaciones para ferroaleaciones
Aceros Solár S.A
Ing. Dora Elia Acosta M.
Laboratório químico. 1983

- Fabricación de aceros con oxígeno.
A. Jackson.
Edit. URMO S.A

- The Making, Shaping and Treating of Steel.
10 Th. Edition.
(U.S.S) United States Steel.
William T. Lankford Jr.
Robert F. Craven. 1985

- Structure and Properties
of Engineering Alloys
William F. Smith
Mc. Graw Hill.