



# CIENCIA Y TECNOLOGIA DE LA METALURGIA

## *APLICACIONES*

**Editores**

**M. GARCÍA-YREGOI  
N. PIEDAD-SÁNCHEZ  
G.B. ESCALANTE-IBARRA**

**Facultad de Metalurgia  
Universidad Autónoma de Coahuila**

**Editorial Valle de Cándamo**

**- MÉXICO -**



Universidad Autónoma de  
Coahuila



Facultad de Metalurgia

Maestría en Ciencia y Tecnología de la Metalurgia

---

# CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE LA METALURGIA

APLICACIONES

Editores

M. GARCÍA-YREGOI  
N. PIEDAD-SÁNCHEZ  
G.B. ESCALANTE-IBARRA

Editorial Valle de Cándamo

- MÉXICO -

Primera Edición 2013

Derechos Reservados

© Facultad de Metalurgia - Universidad Autónoma de Coahuila  
Carretera 57 km 5, Monclova, C.P. 25710, Coahuila de Zaragoza  
© Noé Piedad-Sánchez, Manuel García-Yregoi y Griselda Berenice  
Escalante-Ibarra

Abril 2013

ISBN: 978-607-8184-07-1

**Impreso en México - Printed in Mexico**

El formato es responsabilidad de los editores y el contenido de sus respectivos autores.  
Todos los derechos reservados. Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin la autorización escrita del titular de derecho de autor o de la casa Editorial. Por lo tanto está prohibido copiar por cualquier medio o procedimiento, ya sea de reproducción gráfica, electrónica o informática, incluyendo el fotocopiado, pues todo está amparado, delimitado y sancionado por la Ley General de Derecho de Autor.



**EDITORIAL VALLE DE CÁNDAMO**  
**VERACRUZ 1403 INT. A, COL. LOS PINOS**  
**MONCLOVA, COAHUILA, MEXICO**  
[www.editorialvalledecandamo.com.mx](http://www.editorialvalledecandamo.com.mx)  
[edit\\_valle\\_de\\_candamo@hotmail.com](mailto:edit_valle_de_candamo@hotmail.com)  
TELS.01 (866) 635-01-55 C.P. 25720

**Editores:**

Manuel García-Yregoi  
Noé Piedad-Sánchez  
Griselda Berenice Escalante-Ibarra

**Comité Editorial:**

María Gloria Rosales-Sosa  
Isabel Araceli Facundo-Arzola  
Lázaro Abdiel Falcón-Franco  
Claudia Verónica Reyes-Guzmán  
Yadira Marlén Rangel-Hernández  
Alberto Ramírez-Baesa

**Lista de autores:**

<sup>1</sup>Adrián Contreras-Briseño  
<sup>2</sup>Alberto Ramírez-Baesa  
<sup>1</sup>Cecilia Vásquez-Aldape  
<sup>3</sup>Claudia Verónica Reyes-Guzmán  
<sup>4</sup>Diego Martínez-Carrillo  
<sup>5</sup>Edith Madai Colunga-Urbina  
<sup>6</sup>Eduardo González-Partida  
<sup>1</sup>Gabriela Baltierra-Costeira  
<sup>1</sup>Georgina Rita Díaz-Balderas  
<sup>3</sup>Griselda Berenice Escalante-Ibarra  
<sup>5</sup>Iliana Margarita de la Garza-Rodríguez  
<sup>3</sup>Isabel Araceli Facundo Arzola  
<sup>1</sup>Jorge Antonio Sánchez-Lázaro  
<sup>7</sup>José Federico Chávez-Alcalá  
<sup>8</sup>José Luis Cadena-Zamudio  
<sup>9</sup>José Luis Muñoz García

<sup>10</sup>José R. Parga-Torres  
<sup>1</sup>Juan Antonio Hernández-Navarro  
<sup>11</sup>Juan Carlos Martínez-Escalante  
<sup>1</sup>Juanita Yazmin Guevara-Chávez  
<sup>2</sup>Juan Manuel Hernández-Moreno  
<sup>8</sup>Kinardo Flores-Castro  
<sup>3</sup>Lázaro Abdiel Falcón-Franco  
<sup>3</sup>María Gloria Rosales-Sosa  
<sup>1</sup>María Guadalupe González-Zamarripa  
<sup>1</sup>María Victoria Guadalupe Trejo-Merla  
<sup>1</sup>Mario Antonio Cordero-Barrientos  
<sup>4</sup>Mitzué Garza-García  
<sup>3</sup>Noé Piedad-Sánchez  
<sup>12</sup>Pascual Bartolo-Pérez  
<sup>13</sup>Rumualdo Servín-Castañeda  
<sup>3</sup>Yadira Marlén Rangel-Hernández

1. Estudiante - Maestría en Ciencia y Tecnología de la Metalurgia. Facultad de Metalurgia, Unidad Norte, Universidad Autónoma de Coahuila. Carretera 57 km 5, C.P. 25710. Monclova, Coahuila, México.

2. Investigador - Facultad de Metalurgia, Unidad Norte, Universidad Autónoma de Coahuila. Carretera 57 km 5, C.P. 25710. Monclova, Coahuila, México.

3. Profesor - Maestría en Ciencia y Tecnología de la Metalurgia. Investigador - Cuerpo Académico Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Facultad de Metalurgia, Unidad Norte, Universidad Autónoma de Coahuila. Carretera 57 km 5, C.P. 25710. Monclova, Coahuila, México.

4. Profesor - Maestría en Ciencia y Tecnología de la Metalurgia. Investigador - Escuela Superior de Ingeniería "Lic. Adolfo López Mateos", Unidad Norte, Universidad Autónoma de Coahuila. Blvd. Adolfo López Mateos s/n, C.P. 26800. Nueva Rosita, Coahuila, México.

5. Profesor - Maestría en Ciencia y Tecnología de la Metalurgia. Investigador - Facultad de Ciencias Químicas, Unidad Saltillo, Universidad Autónoma de Coahuila. Boulevard V. Carranza y José Cárdenas Valdés, Colonia República, C.P. 25280. Saltillo, Coahuila, México.

6. Investigador - Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México. Blvd. Juriquilla No. 3001, C.P. 76230. Querétaro, Querétaro, México.

7. Investigador - Escuela Superior de Ingeniería Química e Industria Extractiva, Unidad Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional. C.P. 07738. México, D.F., México.

8. Investigador – Cuerpo Académico Ciencias de la Tierra, Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Ciudad Universitaria, Carretera Pachuca-Tulancingo km 4.5, C.P. 42184. Pachuca, Hidalgo, México.
9. Industrial Minera México S.A. de C.V. (IMMSA). Calle Adolfo López Mateos S/N, Colonia del Seis, C.P. 26800. Nueva Rosita, Coahuila, México.
10. Investigador - Departamento de Posgrado Metalurgia y Materiales, Instituto Tecnológico de Saltillo. V. Carranza 2400, CP. 25000, Saltillo, Coahuila, México.
11. Grupo Minero Pánuco. Río Grijalva 212, Despacho 102, Col. Del Valle, San Pedro Garza García, Nuevo León, México.
12. Profesor - Maestría en Ciencia y Tecnología de la Metalurgia. Investigador - Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV), Unidad Mérida. Km. 6 Antigua carretera a Progreso, Apdo. Postal 73, Cordemex, C.P. 97310. Mérida, Yucatán, México.
13. Profesor - Maestría en Ciencia y Tecnología de la Metalurgia. Investigador - Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Norte, Universidad Autónoma de Coahuila, Carretera 57 Km. 4.5, C. P. 25710. Monclova, Coahuila, México.

## PRÓLOGO

En esta ocasión, la red de investigadores, imbricados en la Maestría Ciencia y Tecnología de la Metalurgia, con sede en la Facultad de Metalurgia de la Universidad Autónoma de Coahuila (FM-UAdeC), con este libro, **Ciencia y Tecnología de la Metalurgia - Aplicaciones**, busca contribuir al desarrollo de la Ciencias Metalúrgicas en México, especialmente en el norte del país, con trabajos que muestran la competitividad y el estado de arte de una temática tan amplia como la Metalurgia.

La realización de este libro, y de cada uno de los capítulos, sin duda contribuye a la difusión del desarrollo tecnológico y científico que actualmente se está realizando en el país, en sinergia a la consolidación de la cooperación entre diversas instituciones relacionadas a la temática de las Ciencias Extractivas y de la Tierra.

Este libro en el norte del país, particularmente en el estado de Coahuila de Zaragoza, concreta la vinculación y cooperación entre Instituciones Nacionales de reconocido prestigio, con la destacada participación del sector industrial, alianza substancial que apoya las actividades de investigación, la formación de recursos humanos de calidad comprometidos con la realidad social y económica de nuestro país, y el desarrollo tecnológico del país.

De este modo, en respuesta al continuo desarrollo y recientes avances en Ciencias Extractivas y Tecnología de Materiales, Carbón, Yacimientos Minerales, y Metalurgia *sensu strictu*, este libro pone al alcance del lector, tópicos como obtención de nuevos productos, aprovechamiento de minerales metálicos, desarrollo de nuevos materiales y procesos siderúrgicos, aprovechamiento de residuos, y aplicación de procesos metalúrgicos para la remediación ambiental, para propiciar el intercambio de ideas y experiencias sobre una amplia gama de especialidades, ofreciendo una visión contemporánea del estado de arte de la Metalurgia en nuestro país y con referencia internacional, por la calidad y prestigio de los investigadores participantes.

Los capítulos que se presentan en este libro, cumplen con el propósito de mantener en contacto a los interesados en la Metalurgia del país, fomentando y apoyando el estudio de la Ciencia y Tecnología de la Metalurgia, promoviendo el estudio y solución de problemas relacionados con las Ciencias Extractivas, y señalando la dirección de nuevos horizontes de investigación básica y tecnológica sobre esta disciplina.

Aprovechamos estas líneas para agradecer a las autoridades de la Universidad Autónoma de Coahuila, y a todos los entusiastas participantes, sin cuyo apoyo desinteresado no hubiera sido posible la realización de esta obra.

# Índice

	Página
Capítulo 1.....	1
Obtención y Caracterización de Breas de Alquitrán de Hulla .....	1
<i>J. Y. Guevara-Chávez, N. Piedad-Sánchez, J.L. Muñoz-García, P. Bartolo-Pérez, I.M. De la Garza-Rodríguez, I.A. Facundo-Arzola, M.G. Rosales-Sosa, E.M. Colunga-Urbina .....</i>	<i>1</i>
Capítulo 2.....	16
Caracterización por Difracción de Rayos X de Fluorapatita y de Residuos no Magnéticos del Proceso de Concentración Magnética de Fe .....	16
<i>J.A. Sánchez-Lázaro, N. Piedad-Sánchez, J.L. Cadena-Zamudio, E. González-Partida, P. Bartolo-Pérez, I.M. de la Garza-Rodríguez, I.A. Facundo-Arzola, M.G. Rosales-Sosa, K. Flores-Castro .....</i>	<i>16</i>
Capítulo 3.....	25
Desarrollo Tecnológico de Un Rodillo de Acero Forjado 3% Cr, Utilizado para el Proceso de Laminación en Frío .....	25
<i>R. Servín Castañeda, I.A. Facundo Arzola, G. Baltierra-Costeira, M.A. Barrera Moreno.....</i>	<i>25</i>
Capítulo 4.....	40
Desarrollo de una Red Neuronal Artificial Para el Análisis de Propiedades Mecánicas de un Acero ARBA Grado ASME SA-414G.....	40
<i>A. Contreras Briseño, M. Garza García.....</i>	<i>40</i>
Capítulo 5.....	53
La Electrocoagulación Como Alternativa en La Separación de Agentes Contaminantes en Aguas Residuales Industriales .....	53
<i>C. Vásquez-Aldape, G.B. Escalante-Ibarra, C.V. Reyes- Guzmán, Y.M. Rangel-Hernández, L.A. Falcón-Franco.....</i>	<i>53</i>
Capítulo 6.....	66
Cinética de la Adsorción de Plata por el Proceso de Electrocoagulación.....	66
<i>M.G. González Zamarripa, J.R. Parga Torres, D. Martínez .....</i>	<i>66</i>
Capítulo 7.....	83
Estado del Arte de la Síntesis y Caracterización de Nanopartículas Monodispersas Metálicas por Microemulsión Bicontinua.....	83
<i>M.V.G. Trejo-Merla, I.A. Facundo-Arzola, N. Piedad-Sánchez, G.B. Escalante-Ibarra, Y.M. Rangel-Hernández .....</i>	<i>83</i>
Capítulo 8.....	98

<b>Desarrollo de un Acero SAE J1268-15B37 con Garantía de Resistencia a la Abrasión para la Fabricación de Implementos Agrícolas .....</b>	<b>98</b>
<i>J.A. Hernández Navarro, D. Martínez Carrillo .....</i>	<i>98</i>
<b>Capítulo 9.....</b>	<b>110</b>
<b>Metodología de Superficies de Respuesta, como Alternativa para Determinar Valores Óptimos de Factores Involucrados en un Análisis Experimental.....</b>	<b>110</b>
<i>M.A. Cordero-Barrientos, M. García-Yregoi, M.G. Rosales-Sosa, I.A. Facundo Arzola.....</i>	<i>110</i>
<b>Capítulo 10.....</b>	<b>126</b>
<b>Desarrollo de Aceros Inoxidables Ferríticos de Alta Aleación con Mo, Al y Si .....</b>	<b>126</b>
<i>G.R Díaz-Balderas, J.F. Chávez-Alcalá, N. Piedad-Sánchez, P. Bartolo-Pérez, J.L. Cadena-Zamudio, E. González-Partida, I.A. Facundo-Arzola, M.G. Rosales-Sosa, J.C. Escalante-Martínez, J.M. Hernández Moreno, A. Ramírez-Baesa .....</i>	<i>126</i>



# Capítulo 10

---

## Desarrollo de Aceros Inoxidables Ferríticos de Alta Aleación con Mo, Al y Si

G.R Díaz-Balderas, J.F. Chávez-Alcalá, N. Piedad-Sánchez, P. Bartolo-Pérez, J.L. Cadena-Zamudio, E. González-Partida, I.A. Facundo-Arzola, M.G. Rosales-Sosa, J.C. Escalante-Martínez, J.M. Hernández Moreno, A. Ramírez-Baesa



## Desarrollo de Aceros Inoxidables Ferríticos de Alta Aleación con Mo, Al y Si

### 1. INTRODUCCION

Los Aceros Inoxidables reciben este nombre por su capacidad de formar en presencia de una atmósfera oxidante una película superficial de óxido de cromo la cual pasiva el proceso oxidación del material restante, de esta manera, el contenido de Cromo ( $Cr > 13\%$ ) es el elemento medular que dota a éstos de dicha propiedad. Dentro de sus propiedades metalúrgicas, la presencia del Cr en los aceros aleados actúa como un estabilizador de la ferrita, además hace que se contraiga la región de la austerita, en tanto que la región de la ferrita aumenta de tamaño, es un metal reactivo y se combina con el Oxígeno del aire o en cualquier otra condición oxidante para formar una película sobre el acero que lo aísla del medio agresivo (1). Pueden estar aleado además con Cu, Al, Si, Ni, Mo, Nb y/o Ti, que también aumentan su resistencia a la corrosión, directa o indirectamente, en condiciones específicas.

Aun cuando su resistencia a la corrosión es una de sus propiedades más apreciadas, no se debe olvidar otras. Algunos aceros se autotemplan, otros no toman temple, otras son más resistentes a las altas temperaturas, son de fácil maquinabilidad, tienen capacidad de deformarse plásticamente o son soldables. Son aleaciones capaces de presentar un amplio rango de resistencia a la corrosión en diferentes medios líquidos y gaseosos, resistencia mecánica y posibilidades de ser trabajado (2).

Su aplicación se extiende desde usos arquitectónicos hasta la utilización en equipos de la industria química con condiciones extremas de servicio. Sin embargo, el costo se eleva entre 5 y 10 veces al de un acero al carbono (1).

En este trabajo se propone desarrollar una nueva familia de aceros inoxidables ferríticos con la intención de mejorar los aceros inoxidables existentes contra condiciones extremas de corrosión a alta temperatura y en presencia de gases altamente corrosivos, mediante combinaciones de Cr, Mo, Al y Si. El trabajo se centra en la determinación de las condiciones adecuadas para su fabricación a nivel laboratorio por fusión-refinación-colado, para obtener las composiciones químicas deseadas y un alto grado de limpieza, así como en su desarrollo microestructural que permitirá diseñar sus procesos de fabricación a escala planta piloto e industrial y su potencial.

Por ello, se busca establecer las condiciones a nivel laboratorio para obtener los aceros para diferentes usos tecnológicos, que cumplan con intervalos estrictos de composición química y alto grado de limpieza, como bajo nivel de inclusiones, homogeneidad química, baja porosidad y baja segregación, además de establecer las relaciones de fases que componen su microestructura y sus propiedades mecánicas básicas.



Para ello se propone estudiar los siguientes aspectos particulares:

- La obtención de aceros inoxidables ferríticos por fusión-refinación-colado, con las composiciones químicas mostradas en la siguiente tabla:

Tabla 1. Composición química de los aceros nominados.

No.	DENOMINACIÓN	Fe	C	Cr	Mo	Al	Si
1	Fe9CrAlSi	86	0.08	9		2.5	2.5
2	Fe9Cr10Mo	81	0.08	9	10		
3	Fe9Cr10MoAlSi	76	0.08	9	10	2.5	2.5
4	Fe9Cr5Mo2.5AlSi	81	0.08	9	5	2.5	2.5

- Se establecen los cálculos de carga y se verifica experimentalmente las eficiencias de los aleantes.
- Se caracterizan los aceros fabricados por macroataque, microscopía óptica, análisis químico, microscopía electrónica de barrido (MEB) y microanálisis por EDS y microdureza.

Es de llamar la atención que las formulaciones que se proponen son novedosas por sus combinaciones de aleantes como Cr, Mo, Al y Si, por lo cual no existen referencias de metodologías para su fabricación. Estas formulaciones tienen el objetivo de buscar aquellas que mejoren sustancialmente la resistencia a la corrosión a alta temperatura y permitan aplicaciones especiales.

## 2. MARCO TEÓRICO

Los aceros inoxidables se dividen en tres grupos: Austeníticos, Ferríticos, y Martensíticos.

Estas clasificaciones se refieren principalmente a la estructura del acero. La estructura martensítica es dura y frágil, la ferrítica es blanda y dúctil, en cambio la austenítica es de alta resistencia a la tensión, al impacto y al mismo tiempo dúctil. En general mientras más alto sea el contenido de cromo, más resistente a la corrosión será el acero.

Los nombres de estas clases reflejan la microestructura de la cual está compuesto en forma normal el acero (Figura 1). Los elementos de aleación pueden clasificarse como estabilizadores de austenita y estabilizadores de ferrita.

Los estabilizadores de austenita de importancia son el carbono, níquel, nitrógeno y manganeso.

Estos elementos mejoran la retención de la austenita conforme se enfría el acero. Cuando está presente 12% o más de manganeso o cuando está presente 20% o más de níquel es imposible enfriar el acero con la lentitud suficiente para permitir que la austenita se transforme en ferrita. Aun con contenidos mucho más bajos de níquel



y manganeso, la transformación es muy lenta y la austenita es estable a la temperatura ambiente.

Los estabilizadores de ferrita de importancia son el cromo y los formadores fuertes de carburos. Los estabilizadores de ferrita tienden a evitar la transformación del acero en austenita bajo el calentamiento. El que un acero sea austenítico, ferrítico o martensítico depende del balance entre las cantidades presentes de estabilizadores de austenita y ferrita y el ciclo de calentamiento-enfriamiento al cual se sujeta el acero (3).

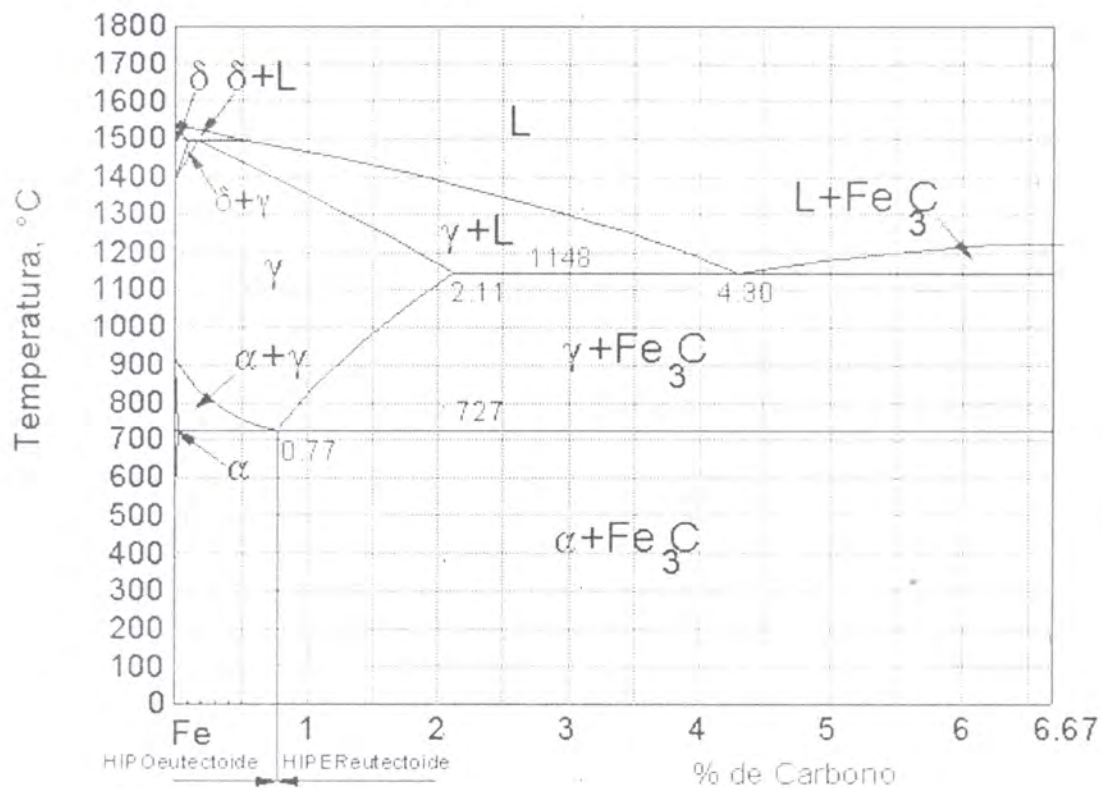


Figura 1. Diagrama de fases Fe-Fe<sub>3</sub>C.

### 3. ACEROS INOXIDABLES FERRÍTICOS

Los aceros inoxidable ferríticos son esencialmente aleaciones binarias hierro-cromo, que se caracterizan por lo siguiente:

Un contenido en cromo comprendido entre 10 – 30% Cr.

Un contenido en carbono menor del 0.12% C.

Poseen una estructura cristalina BCC (cúbica centrada en el cuerpo), lo que les confiere una buena resistencia mecánica y una ductilidad moderada, derivadas del endurecimiento por solución sólida y endurecimiento por deformación (4).



A temperaturas elevadas presentan una resistencia menor que los aceros inoxidables martensíticos, pero su resistencia a la corrosión y formación de cascarilla es generalmente mayor. Estos aceros son magnéticos; no es posible tratarlos térmicamente; tienen una capacidad de conformado moderada y son relativamente económicos (5).

El contenido de carbono es mucho menor que en los martensíticos, con el fin de obtener una estructura totalmente ferrítica. En los aceros ferríticos con alto contenido de cromo, puede aparecer la fase sigma (dura y frágil) cuando se les mantiene por mucho tiempo a temperaturas cercanas a 470 °C; por otro lado, los aceros ferríticos son muy propensos al crecimiento de grano (850 -900 °C) un inconveniente para ser unidos por soldadura (3).

Debido a ello, estos aceros no responden a los tratamientos térmicos, aunque cuando se calientan a 1095°C crece el tamaño de grano y sólo puede regenerarse posteriormente por trabajado en frío. Cuando el contenido de carbono es grande, se forman carburos de cromo, dando lugar a un empobrecimiento de cromo en la matriz y disminuyendo, por tanto, su resistencia a la corrosión. En relación a su comportamiento frente a la corrosión, ocupan un lugar intermedio entre los martensíticos y austeníticos.

Una característica mecánica a destacar, común a los aceros ferríticos y martensíticos, es que al tener una estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC), poseen una temperatura de transición dúctil-frágil, por debajo de la cual la tenacidad se hace muy pequeña (6).

#### 4. INFLUENCIA DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA EN LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN

**Cromo (Cr):** En la proporción >13% es el principal elemento de aleación en el acero inoxidable, ya que es esencial en la formación de la capa pasiva. Otros elementos pueden mejorar su eficacia en la formación y el mantenimiento de este recubrimiento, pero no sustituirla. Cuanto mayor es el contenido de Cr, mayor es la resistencia a la corrosión.

**Níquel (Ni):** Es el segundo más importante de los elementos aleantes del acero inoxidable. Eficaz para regenerar la capa pasiva (repasivación). El Ni estabiliza la austenita en la temperatura ambiente, mejorando la resistencia a la corrosión y potencializando la viabilidad del acero inoxidable (7).

**Molibdeno (Mo):** Mezclado con cromo, es eficaz en la estabilización de la capa pasiva en la presencia de soluciones cloradas. Las adiciones de Mo aumentan la resistencia general a la corrosión, por picaduras y por aberturas en el acero inoxidable. Actúa como apoyo del Cr en la resistencia a la corrosión provocada por cloruros a los aceros inoxidables. Cuando el contenido de Cr de un acero inoxidable es menor de 18%, las adiciones de Mo mejorarán cerca de 3 veces la resistencia a la corrosión por picaduras y en grietas en ambientes de cloruro.



**Manganeso (Mn):** Este elemento en cantidades inferiores al 1%, tiene muy poca influencia en la resistencia a la corrosión, pero en cantidades de 8-10%, hace que en los aceros se consigan estructuras austeníticas que favorecen sensiblemente la resistencia a la corrosión.

**Carbono (C):** La influencia del carbono en la resistencia a la corrosión depende del estado en que se encuentre dentro del acero. Si está uniformemente repartido en la estructura, su influencia será mucho menos nociva que si se encuentra en forma de carburos. Se considera que los carburos y el resto de la matriz, pueden formar pares galvánicos al ser de distinta composición. Además, los carburos hacen que la película pasiva sea discontinua (8). En cantidades pequeñas de C proporcionan una mayor resistencia a la corrosión en los aceros inoxidable. Es un elemento que otorga tratamiento térmico de temple de los aceros martensíticos, y promueve mayor resistencia mecánica en aplicaciones por alta temperatura. En los aceros ferríticos, el aumento de C provoca una disminución en la tenacidad.

**Nitrógeno (N):** Aumenta la resistencia mecánica y resistencia a la corrosión por picaduras en aceros austeníticos. Sin embargo, el N es perjudicial para las propiedades mecánicas de los aceros ferríticos.

**Azufre (S), selenio (Se) y fósforo (P):** Estos elementos reducen la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidable.

**Cobre (Cu):** Mejora la resistencia a la corrosión de los aceros altos en cromo y de algunos austeníticos frente algunas soluciones corrosivas (soluciones cloradas, soluciones de ácido sulfúrico), intervienen en los aceros en pequeñas cantidades, ya que dificulta la transformación en caliente y los hace propensos a las fisuras.

**Aluminio (Al):** En los aceros con cromo, con cantidades de 3-4% de aluminio, hace que presente una buena resistencia a la oxidación en caliente al formarse una película de alúmina en la superficie. Su influencia es superior a la del silicio. Mejora sensiblemente la resistencia a la corrosión en ambientes salinos. Es un elemento alfégeno, ya que favorece la formación de ferrita (8).

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

**Tungsteno (W):** La influencia del tungsteno en la resistencia a la corrosión es poco sensible.

**Titanio (Ti), Niobio (Nb) y Tántalo (Ta):** La finalidad que tienen estos elementos en los aceros inoxidable y refractarios es evitar la corrosión intergranular, al impedir la precipitación de carburo de cromo en las juntas de los granos (7).

## 5. DESARROLLO

### Carga y Fusión

Se determinó que con la secuencia adecuada, pueden utilizarse las materias primas como acero bajo carbono y ferroaleaciones comerciales para la fabricación de estos



aceros, procesando primeramente la chatarra de acero para decarburarla y desoxidarla, para adicionar posteriormente los aleantes, bajo cuidados especiales para optimizar su eficiencia y lograr la composición química buscada (Figura 2):

- Carga de toda la chatarra
- Encendido del horno
- Se acomoda la carga conforme va aumentando la temperatura
- A los 40 min se toma temperatura (baño líquido)

### **DECARBURACIÓN Y DESOXIDACIÓN**

Con las medidas descritas se consigue una decarburación eficiente (menores a 0.08 % C en todos los casos). Se determinará un tiempo adecuado de contacto del metal con la escoria decarburante para tiempos de 5 min y cantidades de escoria de 3% respecto a la carga metálica.

Se calculará la cantidad adecuada de desoxidantes adicionados en secuencia 5 g de FeSi y un minuto después 5 g de Al, ambos ligeramente en exceso. La tapa utilizada con un flujo de argón se pretende evite la oxidación del baño.

En las coladas posteriores, se realizarán las mismas operaciones técnicas solo con variaciones en los contenidos en las ferroaleaciones. El vaciado se llevará a cabo en lingotera de hierro gris de forma cónica, en el cual se podrá observar el comportamiento de solidificación.

### **ANÁLISIS QUÍMICO**

El análisis de las muestras se llevará a cabo en el microscopio electrónico de barrido (MEB) y absorción atómica, el cual arrojará el análisis de todos los elementos, excepto el C y S, que se analizarán en un equipo LECO.

### **TRATAMIENTO TÉRMICO**

Los aceros serán sometidos a un recocido de homogeneización a una temperatura de 950 °C durante 3 horas y se dejarán enfriar al aire.

### **MICROSCOPIA ÓPTICA**

Las muestras anteriores pulidas y atacadas se observarán en el microscopio óptico OLYMPUS PME3 obteniéndose micrografías en condiciones de vaciado y después de un tratamiento térmico.

### **MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB) Y MICROANÁLISIS**

Las mismas muestras serán observadas por microscopía óptica se utilizaron para su observación en el MEB JEOL JSM 6300 y microanálisis por EDS.



## MICRODUREZA

Las muestras cortadas para metalografías serán utilizadas para tomar dureza en un microdurómetro digital marca FUTURE TECH, obteniendo 12 mediciones, tanto en sentido transversal y longitudinal.

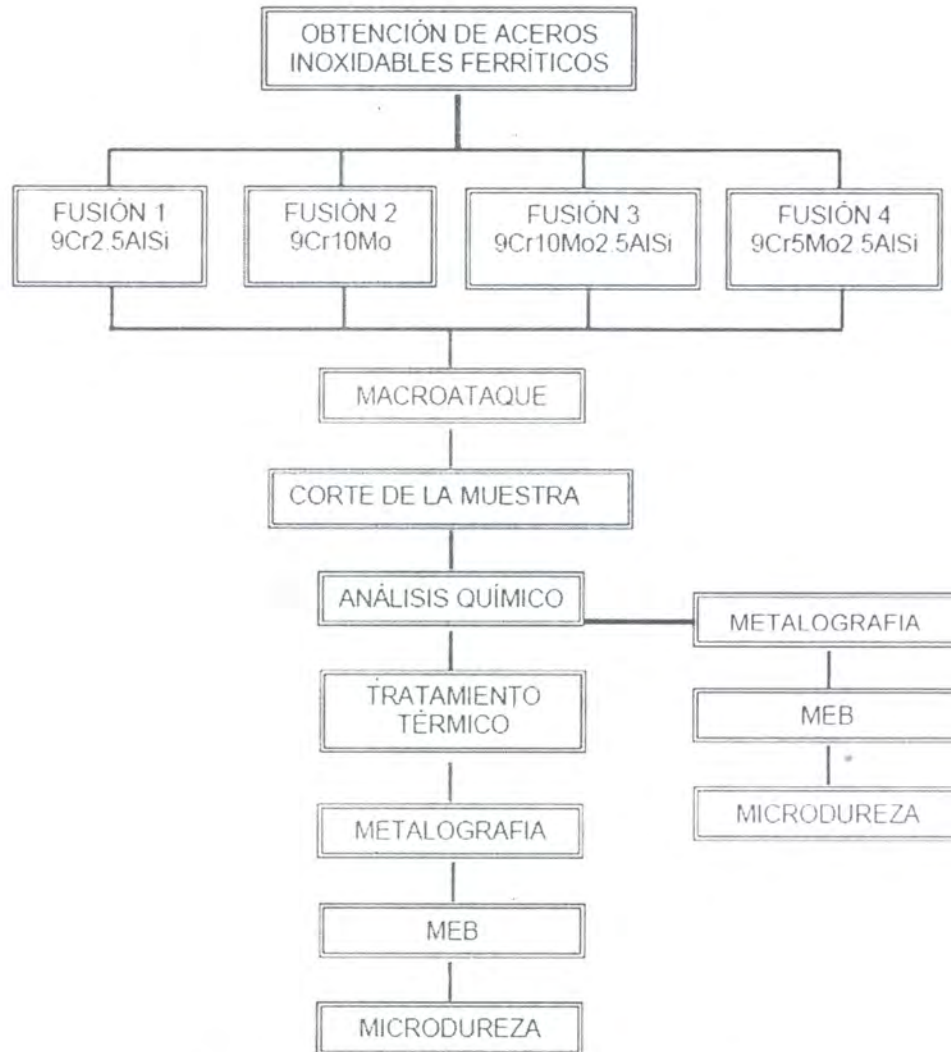


Figura 2. Diagrama de flujo experimentación.

## 6. APLICACIONES

Los aceros inoxidable ferríticos tienen unas propiedades mecánicas moderadas, aunque muchos de ellos son fácilmente conformables en frío, por lo que son utilizados en recipientes para las industrias químicas y de alimentación, en arquitectura, y en embellecedores de automóviles.

El acero AISI 444 es el ferrítico con mayor cantidad de Mo de la serie 400. El acero AISI 446 es el grado de acero inoxidable con mayor contenido en Cr de la serie 400 y





es el que tiene la más alta resistencia a la corrosión y a la oxidación de esta serie. Además, se le puede añadir Nb, Al y Ti para limitar el crecimiento de grano.

Los aceros inoxidables ferríticos se caracterizan por poseer unas buenas propiedades frente a la corrosión en general, muy buena resistencia a la corrosión bajo tensión y una tenacidad moderada.

En el caso del acero inoxidable ferrítico AISI 444, sus bajos contenidos de carbono y de nitrógeno le proporcionan un considerable aumento de su soldabilidad y tenacidad, aunque esta última está limitada en el caso de espesores gruesos. Esta es una de las razones por las que los inoxidables ferríticos normalmente sólo se fabrican y utilizan en espesores delgados.

Los ferríticos muestran una buena resistencia a la corrosión. La resistencia del AISI 444 puede ser comparable a la del acero inoxidable austenítico AISI 316 en algunos medios. Por otra parte, sus altos niveles de Cr dan lugar a una mejor resistencia a la oxidación, y la ausencia de Ni, a buenas propiedades en ambientes que contienen sulfuros a alta temperatura. Ésta es una de las principales áreas de aplicación del acero AISI 446.

El uso de los aceros AISI 430 y AISI 444 incluye: tuberías, tubos de intercambiadores de calor, depósitos y tanques en las industrias alimentaria, química y papelera.

El AISI 444 también puede emplearse en agua con moderados niveles de iones cloruro, en aplicaciones en las que existe un peligro de corrosión bajo tensión.

Los inoxidables ferríticos débilmente aleados también se emplean en medios suaves, en los que no se precisan materiales altamente resistentes a la oxidación.

En los últimos años se han desarrollado aceros inoxidables ferríticos diseñados especialmente para su empleo en la fabricación de tubos de condensadores para agua de mar. Aleaciones para esta aplicación suelen tener contenidos de Cr > 26% y Mo > 3%, y se les denomina aceros inoxidables super-ferríticos (6).

## 7. CONCLUSIONES

Se obtuvieron por fusión, refinación y colado 4 aceros inoxidables ferríticos de alta aleación con contenidos variables de Cr, Mo, Al y Si, de acuerdo a las composiciones químicas preestablecidas.

Se estableció la metodología para la fabricación de estos aceros inoxidables ferríticos, las secuencias adecuadas en su fusión, las eficiencias de los aleantes (Figura 3) y los mecanismos de decarburación y desoxidación, partiendo de un acero al carbono 1018, con el empleo de ferroaleaciones comerciales.

En cuanto al desarrollo microestructural de los aceros fabricados, se concluye lo siguiente:

- Se determinó que los elementos de aleación se distribuyen en diferente forma en la microestructura, observándose una fuerte tendencia del Molibdeno a formar precipitados, con diferentes contenidos de cromo, principalmente. Esto



con la ayuda de mapeos realizados en el microscopio electrónico de barrido (MEB).

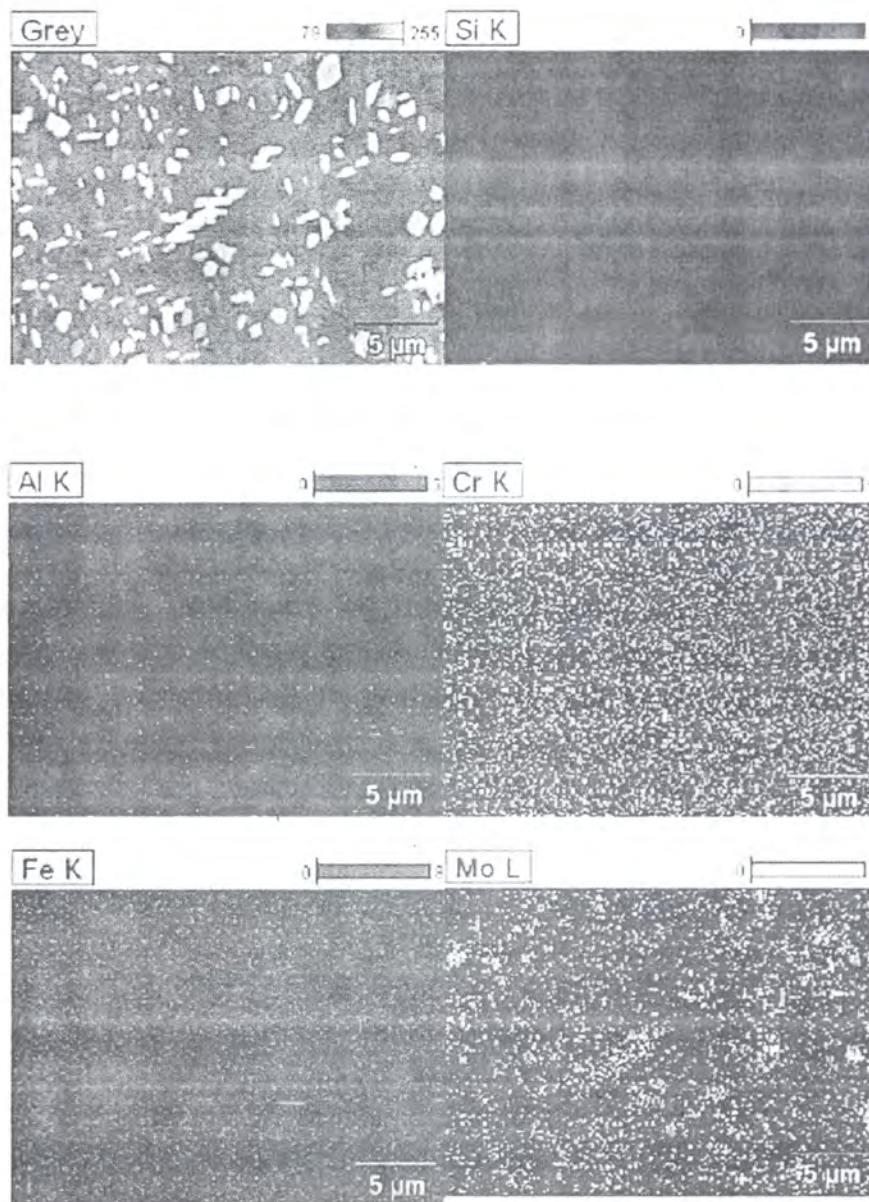


Figura 3. Mapeos de la distribución de los elementos aleantes a 5000X del acero Fe9Cr5Mo2.5AlSi en condiciones de homogeneizado.

- Se determinó que el tratamiento térmico de homogeneizado aplicado, 950 °C por 3 horas, fue determinante para romper la estructura de colada y para redistribuir los elementos de aleación, modificándose también la composición, distribución y tamaño de los precipitados. Bajo las condiciones de colada



experimentadas, se obtienen estructuras de colada convencionales con granos relativamente grandes en la zona de solidificación columnar y equiaxial. En todos los casos, el acero con tratamiento térmico presenta una estructura más homogénea, lo que se comprobó con las mediciones de microdureza (Figura 4).

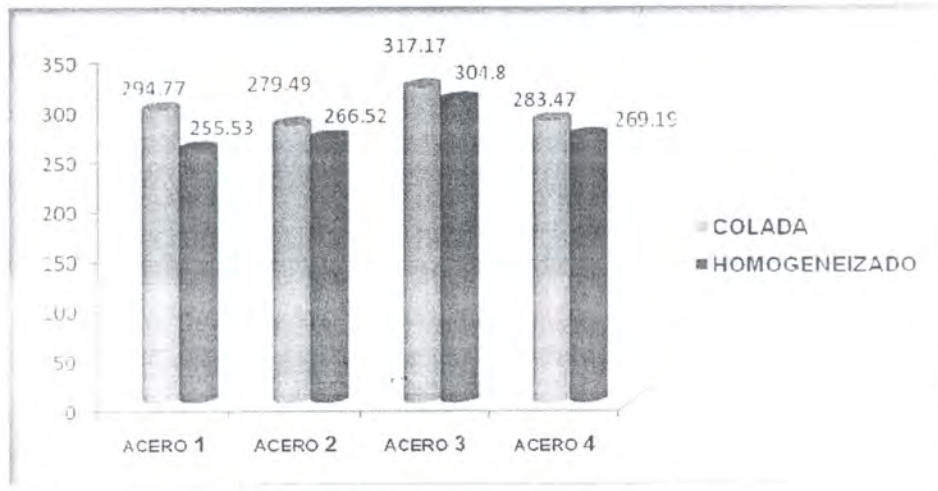


Figura 4. Comparación de dureza en condición de colada y homogeneizado de los 4 aceros.

- Estos aceros diseñados para resistir ambientes altamente corrosivos, requieren aún de un desarrollo microestructural para diseñar sus procedimientos más adecuados de fabricación, para los que este trabajo establece sus condiciones iniciales. Se requerirá establecer más claramente el efecto de las diferentes características microestructurales de estos 4 aceros, tanto para su posible procesamiento termomecánico, como para su aplicación final en ambientes corrosivo.
- De las características microestructurales determinadas, se puede esperar un efecto del Al y Si en la formación de capas pasivas, gracias a su distribución adecuada en la matriz ferrítica observada. Habrá que determinar el efecto de cada tipo y distribución de los precipitados encontrados, principalmente de Molibdeno, para las condiciones más apropiadas para aplicarlos.
- Se deberán asimismo estudiar más profundamente las condiciones del tratamiento térmico de homogeneizado, para obtener las estructuras y precipitados más adecuadas para su procesamiento posterior o aplicación final.



## REFERENCIAS

1. Castro Sedano, David. 2001. Apuntes sobre aceración y colada continua Editorial IPN. México, 271 p.
2. [http://html.rincondelvago.com/acero\\_9.html](http://html.rincondelvago.com/acero_9.html)
3. [www.eis.uva.es/~imeim/Grupo4.doc](http://www.eis.uva.es/~imeim/Grupo4.doc) -RESUMEN
4. <http://redalyc.vaemex.mx/redalyc/pdf/849/84934046.pdf>
5. Ricaurte Ospina López /Héctor Aguirre Corrales /Hernando Parra L., 2007. SOLDABILIDAD EN ACEROS INOXIDABLES Y ACEROS DISIMILES. Scientia Et Técnica, mayo, año/vol. XIII, No. 034, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia, pp. 273-278.
6. Aceros inoxidables ferríticos. Ana María Sequeiro Araújo. [materiales.wikispaces.com/file/view/Aceros+inoxidables+ferriticos.doc](http://materiales.wikispaces.com/file/view/Aceros+inoxidables+ferriticos.doc)
7. Donald R. Askeland. Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Cuarta Edición. Editorial Thomson. México, 2004, 1004 p.
8. [http://www.obtesol.es/index2.php?option=com\\_content&do\\_pdf=1&id=147](http://www.obtesol.es/index2.php?option=com_content&do_pdf=1&id=147)  
Obtesol Observatorio tecnológico de la soldadura, "Ferríticos"- Creado: 9 Febrero 2007.
9. [http://www.elinox.com.br/index.php?option=com\\_content&task=view&id=16&Itemid=38](http://www.elinox.com.br/index.php?option=com_content&task=view&id=16&Itemid=38)
10. Inchaurreza Zabala, Adrián. 1981. Aceros inoxidables y acero resistentes al calor. Editorial Limusa. Primera edición. México.