



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

FABRICACION DE ACEROS MICROALEADOS AL NIOBIO, VANADIO Y TITANIO Y SU APLICACION EN LA INDUSTRIA NACIONAL

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE: INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A N :

- CERVANTES CABELLO J. JAVIER
FRUTIS GODINEZ JESUS
SANTAMARIA OROZCO JOSE LUIS
TELLEZ GILES ARMANDO





Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **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.

## I N D I C E

I .-	Introducción.	1
II .-	Aceros Microaleados.	4
	II.1.- Propiedades.	
	II.2.- Elementos Microaleantes.	
	II.3.- Ferroaleaciones.	
	II.4.- Laminación Controlada.	
III.-	Fabricación de Aceros Microaleados.	46
	III.1 Procesos de Fabricación del Acero.	
	III.2 Técnica de Fusión del Acero.	
	III.3 Horno de Inducción de la Facultad de Ingeniería.	
IV.-	Producción Experimental de Aceros Microaleados.	58
V.-	Propiedades Mecánicas de los Aceros Microaleados al Niobio, Vanadio y Titanio.	73
	V.1.- Ensayos antes del Programa de Laminación.	
	V.2.- Programa de Laminación Controlada.	
	V.3.- Propiedades.	
VI.-	Conclusiones.	92
VII.-	Apéndice.	94
VIII.-	Bibliografía.	98

## CAPITULO 1

## INTRODUCCION

Durante las tres décadas pasadas, la demanda de aceros estructurales de alta resistencia y de fácil soldabilidad por parte de la industria de la construcción, petrolera, transportación y energía, han encausado al sector siderúrgico en la realización de nuevos aceros para satisfacer estas necesidades. Después de arduos estudios, se ha logrado la obtención de los aceros de alta resistencia y de baja aleación (HSLA), dentro de los cuales están comprendidos los aceros microaleados.

Estos aceros se caracterizan por la adición de pequeñas cantidades de uno o varios elementos de aleación, tales como niobio, vanadio y titanio además del carbono. Los elementos de aleación son utilizados eficientemente dentro de un rango que va del orden de 0.01 % a 0.08%. Estos aleantes contribuyen al incremento en resistencia y tenacidad, al disminuir el tamaño de grano ferrítico y hacen al acero susceptible a ser endurecido por precipitación de carburos o carbonitruros. La resistencia lograda por la presencia de microaleantes puede ser incrementada aún más con el proceso de laminación controlada, el cual ha ido a la par con el desarrollo de éstos.

En cuanto a la aplicación de estos aceros a nivel nacional, al realizar este trabajo nos hemos percatado de que

2

existe muy poca información y un desconocimiento en el sector productivo de esta área de la siderurgia, teniéndose por lo mismo que una gran variedad de productos que requieren de alta resistencia, se fabriquen con elementos tradicionales, los cuales son agregados en gran proporción comparados con las pequeñas cantidades que se requieren en los aceros microaleados. Resultando, por tanto, que debido al desconocimiento sobre estos aceros se incurre en gastos innecesarios, puesto que resultan ser más económicos por el bajo porcentaje en los elementos de aleación, además de sus mejores características mecánicas y de soldabilidad.

El estudio que a continuación se presenta, consiste de dos partes fundamentales, la primera puede enunciarse como de revisión bibliográfica, mientras que la segunda tiene como objetivo la fabricación y evaluación de las propiedades mecánicas de varias clases de aceros microaleados.

En la primera parte, se hace alusión a los aceros microaleados, partiendo de sus propiedades que son los distintivos que los caracterizan. Posteriormente, se estudian los elementos de aleación niobio, vanadio y titanio y los efectos que con ellos se logran en estos aceros. De igual forma se presenta el proceso de laminación controlada ya que este es uno de los mecanismos principales mediante el cual se logra el incremento de la resistencia de estos aceros. En esta parte, también se incluye el estudio realizado sobre ferroaleaciones, ya que como se sabe los minerales no se agregan al acero en estado puro, puesto que tienen mayor temperatura de fusión y presentan una menor eficiencia en

la asimilación de estos por el acero que la lograda cuando son agregados en forma de ferroaleación, por esto se estudian los procedimientos para producir las diferentes ferroaleaciones, así como la situación de las mismas en el país durante los últimos años.

A continuación, se presenta el proceso de fabricación seguido en la obtención de los aceros microaleados. Así mismo, cabe mencionar que se realizó el estudio sobre la fabricación de los aceros microaleados a nivel nacional, por lo cual se visitaron las principales y más grandes industrias del ramo siderúrgico del país, obteniéndose como resultado que estos son de muy escasa producción y debido a la importancia que esto representa para nosotros, este estudio ha pasado a ser el apéndice que se encuentra al final de este trabajo.

La parte práctica consistió en la fabricación de aceros microaleados al niobio, vanadio y titanio a nivel experimental, para lo cual fué necesario realizar la fusión y obtención de los mismos, debido a que no se pueden adquirir fácilmente en el mercado nacional. Lograda la fabricación de los aceros se procedió a efectuar el plan de laminación previamente seleccionado y posteriormente se sometieron a estudios tanto metalográficos, como algunas pruebas destructivas con el fin de determinar las propiedades mecánicas de cada uno de los aceros.

## C A P I T U L O   I I

### A C E R O S   M I C R O A L E A D O S

#### II.1.- PROPIEDADES.

Los aceros microaleados, están comprendidos dentro de un grupo de aceros, en los cuales las propiedades mecánicas y en algunos casos la resistencia a la corrosión atmosférica se obtienen con la adición de cantidades pequeñas de uno o varios elementos de aleación además del carbono. A este grupo de aceros se les denomina HSLA (High Strength, Low Alloy) que son aceros de alta resistencia y baja aleación.

Los aceros HSLA se caracterizan por su alta resistencia mecánica y por su versatilidad. Después de ser laminados en caliente alcanzan tensiones de fluencia de 275 MPa comparados con los 60 MPa que se obtienen con los aceros al carbono, y tienen pequeñas concentraciones de elementos aleantes que les dan una buena combinación de propiedades, tales como resistencia mecánica, tenacidad, facilidad de conformado (formabilidad), soldabilidad y resistencia a la corrosión atmosférica.

A continuación se estudian cada una de las propiedades mencionadas anteriormente, así como los mecanismos para lograrlas.

## RESISTENCIA MECANICA.

Las características logradas en los aceros microaleados en cuanto a su resistencia mecánica, han sido posibles gracias a la utilización de diferentes mecanismos, siendo los principales :

- 1.- Refinación del tamaño de grano.
- 2.- Endurecimiento por precipitación.
- 3.- Formación de estructuras de subgrano.
- 4.- Endurecimiento por solución sólida.

Ya que a la temperatura ambiente predomina la fase ferrítica, un mecanismo de elevación de la resistencia mecánica se basa en tener un grano lo más fino posible, lo cual disminuye la longitud de la trayectoria del movimiento libre de las dislocaciones, dando con esto el aumento en la resistencia y requiriéndose, por tanto, un mayor esfuerzo para lograr una misma deformación que el aplicado al mismo acero teniendo este un tamaño de grano mayor, figura 2.1.

Es bien conocido que el grano fino de ferrita resulta de una alta razón de nucleación y una baja razón de crecimiento del grano durante la transformación de austenita en ferrita. Por lo tanto, la manera de producir granos finos es incrementar la velocidad de nucleación, lo que a su vez se puede conseguir aumentando el número de sitios para la nucleación heterogénea. El niobio, vanadio y titanio son fuertes formadores de carburos y, al estar estos aleantes en disolución en la austenita, precipitan durante el enfriamiento actuando como sitios de nucleación para la ferrita.



TAMANO DE GRANO-MICROMETROS

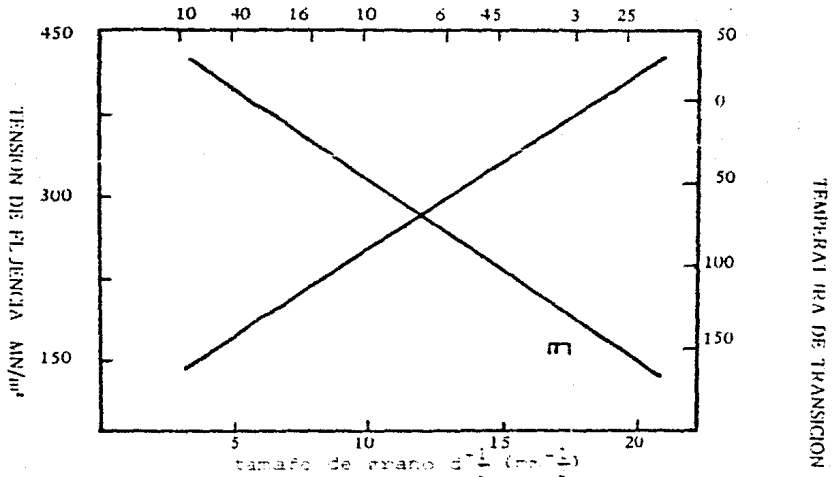


FIG. 2.1 Tensión de fluencia y temperatura de transición frágil-dúctil de un acero con 0.1% C en función del tamaño de grano de la ferrita.

El niobio es preferido sobre el vanadio porque el carbonitruro de niobio tiene una menor solubilidad en la austenita que el carburo o nitruro de vanadio, lo cual hace que su precipitación comience a temperaturas mayores que las necesarias para los precipitados de vanadio. El aluminio y el titanio pueden actuar también como afinadores de grano en los aceros HSLA, pero el aluminio tiene un efecto negativo sobre la temperatura de transición frágil-dúctil, y la adición de titanio no es tan efectiva como la de niobio; una comparación del efecto en el afino de grano por niobio, vanadio y titanio para un acero de bajo carbono después de ser laminado en caliente se aprecia en la figura 2.2.

El refinamiento de grano también se puede conseguir por la técnica de laminación controlada. Durante la laminación controlada se desea obtener un gran número de granos de austenita y retardar su recristalización, lo cual se consigue a través de la combinación de los mecanismos de generación de sitios de nucleación :

- i) Producción de precipitados en las fase austenítica, y
- ii) Deformación, dando por resultado una ferrita de grano muy fino.

Los precipitados de carburos y carbonitruros de los microaleantes aumentan la velocidad de nucleación y retardan la recristalización impidiendo el crecimiento de nuevos granos. En las figuras 2.3, 2.4 y 2.5 se observan los efectos del niobio en la recristalización de los aceros.

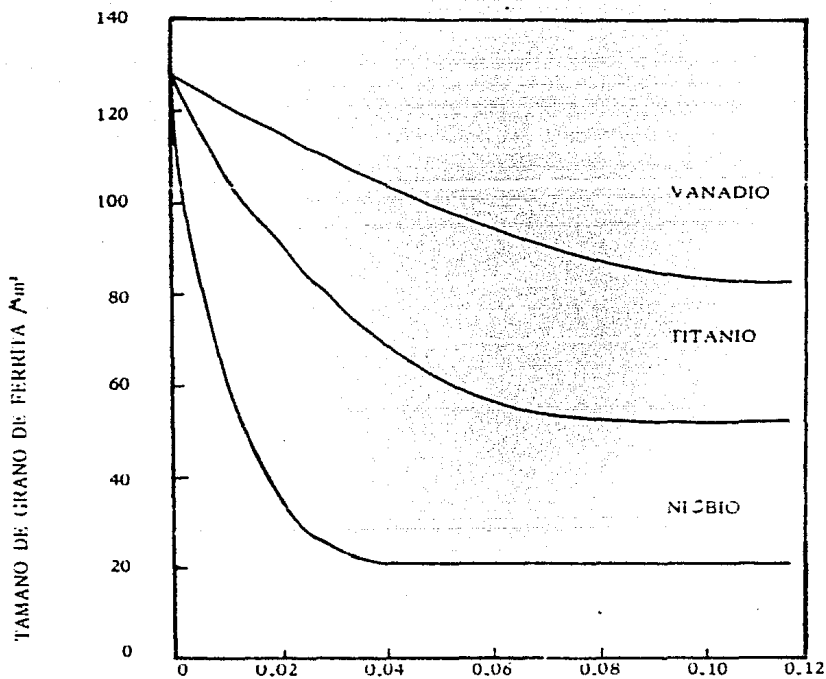


FIG. 2.2 CONTENIDO DEL MICROALEANTE %  
 TAMAÑO DE GRANO DE LA FERRITA  
 DE UNA TIRA DE ACERO AL BAJO --  
 CARBONO LAMINADO EN CALIENTE --  
 EN FUNCIÓN DEL CONTENIDO DE MI-  
 CROALEANTE (Nb, V, Ti)

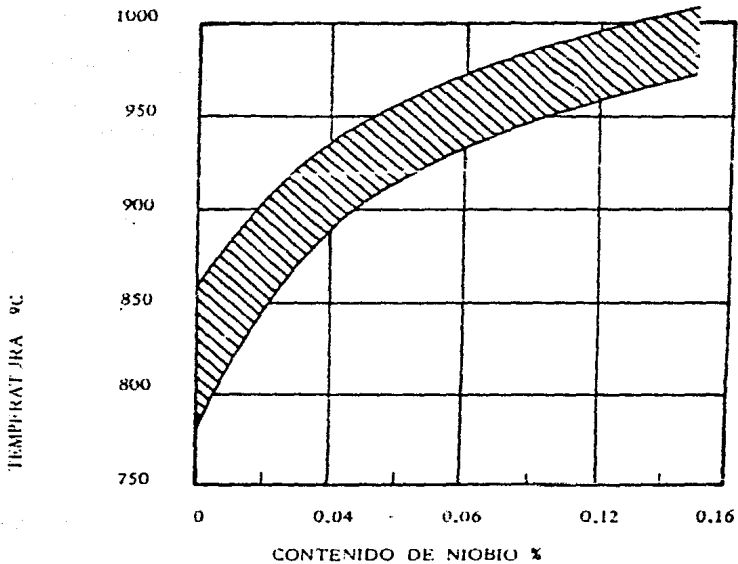


FIG. 2.3 TEMPERATURA PARA UN 50% DE RECRISTALIZACIÓN EN FUNCIÓN DEL CONTENIDO DE NIOBIO.

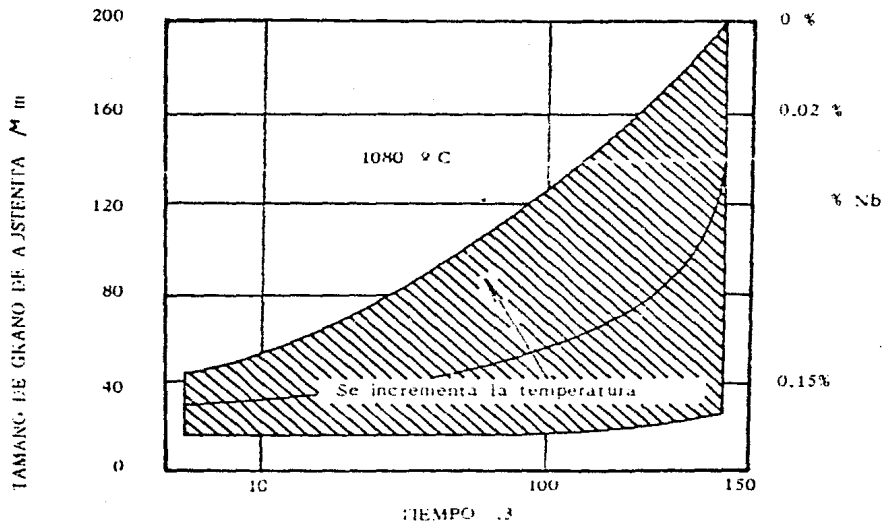


FIG. 2.4 CAMBIO EN EL TAMAÑO DE GRANO DE LA AUSTENITA CON EL TIEMPO (70% DE REDUCCIÓN), PARA -- DIFERENTES CONTENIDOS DE NIOBIO

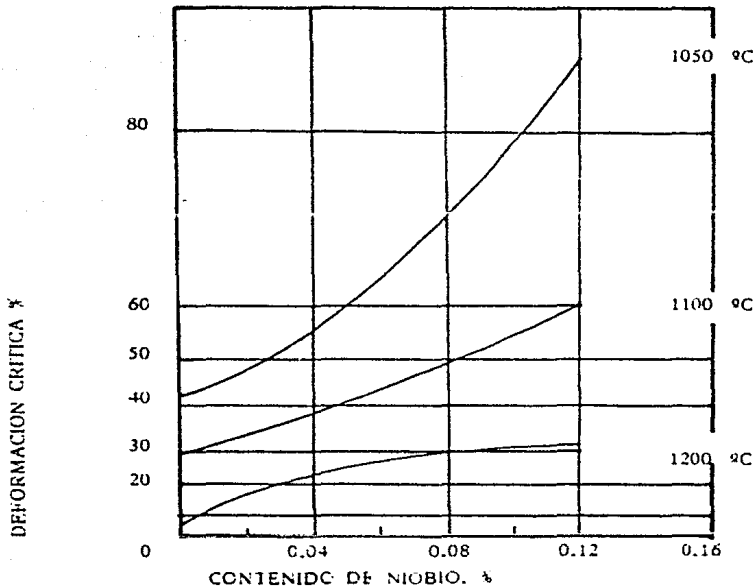


FIG. 2.5 DEFORMACION CRITICA PARA RECRISTALIZACION EN FUNCION DEL CONTENIDO DE NIOBIO. (RECALENTANDO A 1250 °C)

Otro mecanismo para aumentar la resistencia y la dureza de una aleación dada son : trabajo en frío o tratamiento térmico. Generalmente se necesitan dos etapas en un tratamiento térmico para producir endurecimiento por precipitación: tratamiento de solución y envejecimiento. Para explicar el tratamiento de disolución se puede considerar una aleación específica diluida de hierro-carbono, con un contenido de carbono total de 0.008%. Si esta aleación está en equilibrio a temperatura ambiente, casi todo el carbono estará en forma de cementita porque la solubilidad del carbono en la ferrita a 24 °C es sólo de  $2.3 \times 10^{-7}$  %. Si esta aleación es calentada a 600 °C, a esta temperatura la concentración de equilibrio del carbono en la solución es de 0.010%, lo cual es más de la cantidad total del carbono en el metal. La cementita estable a temperatura ambiente ya no es estable a 600 °C y se disuelve cediendo sus átomos de carbono a la solución sólida. Debido a que la concentración de equilibrio es más grande que el contenido de carbono de la aleación, la cementita debe desaparecer por completo si la aleación se mantiene durante un tiempo suficientemente largo a temperatura elevada. La aleación que en un principio contenía dos fases (cementita y ferrita) es convertida así a una fase simple (ferrita).

Si se efectúa un enfriamiento rápido sobre la aleación anterior después de que ha sido transformada en una solución sólida homogénea a 600 °C, se puede obtener un enfriamiento muy rápido de la probeta metálica caliente sumergiéndola en un medio refrigerante líquido, por ejemplo, agua.

Este tipo de operación se conoce, generalmente, como templado. En el presente caso, un templado muy rápido evitará una difusión apreciable de los átomos de carbono, de manera que puede suponerse que la solución sólida que existió a  $600^{\circ}\text{C}$  es llevada a la temperatura ambiente sin cambio esencial. La aleación que estaba ligeramente insaturada en la temperatura más alta estará ahora sobresaturada con exceso.

En el tratamiento de envejecimiento, la precipitación de la cementita desde la ferrita sobresaturada ocurre por un proceso de nucleación y crecimiento. Primero, es necesario formar los orígenes de los cristales de la cementita; por un proceso llamado nucleación, las partículas de cementita crecen en tamaño como resultado de la difusión del carbono desde la ferrita de los alrededores hacia las partículas, esto se denomina crecimiento. No puede producirse precipitación hasta que comienza la nucleación, pero una vez iniciada ésta la solución sólida puede perder su carbono en dos formas, bien por el crecimiento de las partículas ya formadas o en la formación de núcleos adicionales. En otras palabras, la nucleación puede continuar simultáneamente con el crecimiento de las partículas ya formadas. Por lo general, la precipitación no comienza de inmediato, sino que requiere un tiempo determinado antes de ser detectable. Este intervalo de tiempo es llamado período de incubación y representa el tiempo necesario para formar núcleos estables visibles.

Después del tratamiento de solución y el templado, la aleación está en condiciones de sobresaturación, con los á-



átomos del soluto distribuidos al azar dentro de la estructura reticular, figura 2.6a. Durante un período de incubación, los átomos del soluto excedentes tienden a emigrar a ciertos planos cristalográficos, formando racimos o embriones del precipitado. Durante el proceso de envejecimiento, estos racimos forman una estructura intermedia cristalina o red transicional, manteniendo coherencia con la estructura reticular de la matriz. La fase en exceso tendrá diferentes parámetros reticulares que los del solvente y, como resultado del apareamiento o coherencia de los átomos, habrá una considerable distorsión de la matriz, figura 2.6b. La distorsión de la matriz se extiende sobre un volumen mayor de lo que sería en el caso de que la fase en exceso fuera una partícula discreta. Esta distorsión interfiere con el movimiento de las dislocaciones y causa el rápido incremento en la dureza y en la resistencia durante el proceso de envejecimiento. Eventualmente el equilibrio de la fase en exceso se forma con su propia estructura reticular, figura 2.6c.

El endurecimiento subestructural se presenta al laminar los aceros a temperaturas inferiores a  $A_{r3}$  (temperatura a la que la austenita se empieza a transformar en ferrita durante el enfriamiento). En estos casos la resistencia aumenta debido a la formación de subgranos en la ferrita, los cuales son cristales separados por los límites de ángulo bajo, tales como los que se producen en la poligonización; recibe este nombre un cristal flexionado cuando se recoce, ya que el cristal curvado se descompone en cierto número de peque-

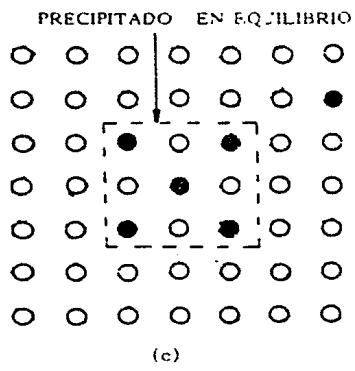
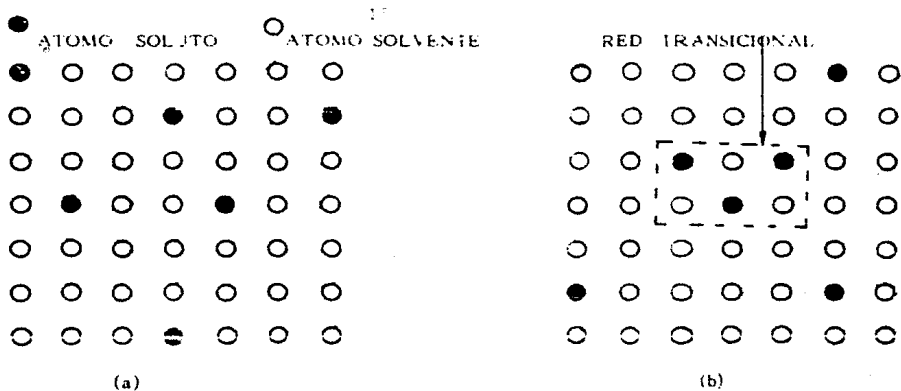


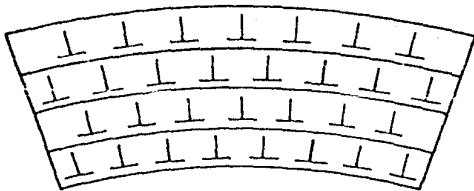
FIG. 2.6 ETAPAS EN LA FORMACION DE UN PRECIPITADO EN EQUILIBRIO. a). SOLUCION SOBRESATURADA -- SOLIDA. b) RED TRANSICIONAL COHERENTE CON LA SOLUCION SOLIDA. c) PRECIPITADO EN EQUILIBRIO ESENCIALMENTE INDEPENDIENTE DE LA SOLUCION SOLIDA. (TOMADA DE LA OBRA DE G. Y. "ELEMENTS OF PHYSICAL METALLURGY". ADDISON WESLEY PUBLISHING COMPANY, INC., READING, MASS., 1959)

Los segmentos cristalinos íntimamente relacionados como se muestra en la figura 2.7.

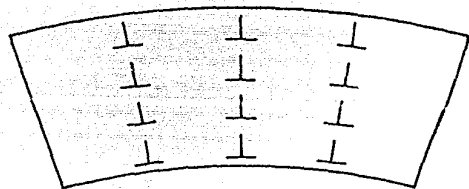
#### DUREZA Y SOLDABILIDAD.

Los bajos contenidos de carbono de estos aceros los catalogan como hipoeutectoides y, por consiguiente, al enfriarlos desde temperaturas mayores a  $A_c$  (temperatura a la que se comienza a formar austenita durante el calentamiento) se puede formar ferrita + perlita, bainita, o una mezcla de ferrita + perlita + bainita. Debido al bajo contenido de carbono los aceros microaleados, han dado por resultado, una disminución en la templeabilidad y por tanto en la dureza, pero de forma inversa, han registrado un notable aumento en la soldabilidad. Esto es una propiedad de gran importancia que es posible por adición de microaleantes tales como niobio, vanadio y titanio. El efecto del niobio y del vanadio es muy importante ya que forman precipitados estables que no favorecen la fragilización durante los ciclos térmicos a los que se ve sometida una pieza al ser soldada. La gran recuperación de los elementos microaleantes durante la soldadura del metal evita imponer restricciones en el contenido de las microaleaciones.

Para comprobar la soldabilidad de los aceros el Instituto Internacional de la Soldadura establece que un valor de



( A )



( B )

**FIG. 2.7. REALIMENTACION DE DISLOCACIONES DE BORDE DURANTE LA POLIGONIZACION .**

**( A ) LAS DISLOCACIONES EN EXCESO QUE PERMANECEN SOBRE PLANOS DE DESLIZAMIENTO ACTIVOS DESPUES DE QUE SE FLEXIONA AL CRISTAL .**

**( B ) MUESTRA LA RECOLOCACION DE LAS DISLOCACIONES DESPUES DE LA POLIGONIZACION .**

carbono equivalente menor o igual a 0.45 es suficiente para asegurar que no se necesitan cuidados especiales al soldar.

La expresión para calcular el carbono equivalente relativo a la composición del acero es :

$$\text{Ceq.} = \text{C} + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Cr} + \text{Mo} + \text{V}}{5} + \frac{\text{Cu} + \text{Ni}}{15}$$

## II. 2 ELEMENTOS MICROALEANTES.

Para la fabricación de aceros microaleados, los elementos más comúnmente empleados son niobio, vanadio y titanio. Lo anterior es debido a las características que presentan dichos elementos como son :

- Formación de nitruros o carburos.
- Afinan el tamaño de grano.
- Evitan el crecimiento de grano durante el calentamiento.

Se les denomina microaleados, porque la adición de las aleaciones se hace en pequeñas cantidades que van del orden de 0.01 a 0.1%, con esto se obtienen notables mejoras en las propiedades y comportamiento de los aceros resultantes. Dado los pequeños porcentajes involucrados se pueden emplear con economía aún cuando el costo de las aleaciones es elevado.

## NIOBIO

Fue descubierto en 1801 por el científico inglés Charles Hatchet, quien lo detectó en una muestra del mineral hoy llamado columbita, encontrado en Nueva Inglaterra. Hatchet llamó al nuevo elemento, columbio, en honor al descubridor de América.

En 1809 el doctor D. H. Wollaston creyó que el tántalo descubierto en 1802 y el columbio eran el mismo elemento, esta idea errónea persistió durante unos 40 años hasta que Henrich Rose estudió exhaustivamente columbitas y tantalitas, concluyendo que eran diferentes.

El columbio, o niobio como se le llama actualmente, está disponible principalmente como concentrados de pirocloro, concentrados de columbite y escorias de estaño.

El tipo de concentrado en mayor uso contiene cerca del 60% de pentóxido de niobio ( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ). El concentrado de pirocloro difiere del concentrado de columbite en contenido del pentóxido de tántalo ( $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ). El pentóxido de niobio es el único óxido de niobio importante. Los principales países productores de niobio son: Brasil, Canadá, Nigeria, URSS, Malasia Y Tailandia. En México no se han encontrado yacimientos de mineral de niobio.

El niobio es de color plateado y similar al cobre en dureza y gravedad específica (8.57 a 20 C). Tiene un alto

punto de fusión de aproximadamente 2480 C<sup>a</sup>, tabla 1, y tiene poca resistencia a la oxidación.

Debido a su alto punto de fusión queda comprendido dentro del grupo de metales llamados refractarios, donde se incluyen el wolframio, molibdeno, tántalo, etc. ; es dúctil en estado puro y tiene alta solubilidad para carbono, oxígeno e hidrógeno.

El uso del niobio en el mundo es principalmente como elemento de aleación en aceros y en superaleaciones y tiene una gran demanda en los países industrializados. Debido a las características del niobio, hace que el metal puro y sus aleaciones tiendan a ser usadas en aplicaciones donde involucren altas temperaturas, como son, componentes de turbinas de gas (hojas, aspas y discos), subensambles de cohetes, contenedores de reactores nucleares, etc.

El descubrimiento de los fuertes efectos de una pequeña cantidad de niobio en la estructura de los aceros al carbono, ha guiado a un extenso crecimiento del uso del niobio en los aceros HSLA. Dos de las más importantes aplicaciones del niobio, son en tuberías de acero para transportar aceite y gas, y en los aceros estructurales.

#### VANADIO

En el mismo año en que se descubrió el niobio, el profesor Andrés Manuel del Río, científico mexicano, analizan-

PROPIEDADES	NIERRO (Fe)	NIOBIO (Nb)	VANADIO (V)	TITANIO (Ti)
NUMERO ATOMICO	26	41	23	22
PESO ATOMICO	56.66	92.91	50.96	47.90
PUNTO DE FUSION (°C)	1535	2468	1710	1668
PUNTO DE EBULLICION (°C)	3000	3300	3000	3280
DENSIDAD (20°C)	7.86	8.4	5.96	4.51
ESTRUCTURA CRISTALINA	BCC	BCC	BCC	HEX8
RADIO ATOMICO	1.26	1.46	1.36	1.47

TABLA 1. PROPIEDADES DEL Fe, Nb, V Y Ti.



do una muestra de plomo de Zimapan, Hidalgo, descubrió un metal similar al uranio y al cromo, que debido a los bellos colores de sus sales, llamo eritronio. Posteriormente un profesor francés H. V. Collet-Descotils, dijo que el metal descubierto por el científico mexicano era en realidad un cromato plumboso impuro, lo que, desafortunadamente fué aceptado por el profesor Del Rio.

En 1831 un químico de la escuela de minas de Estocolmo Niels G. Sefstrom, redescubrió el eritronio en una muestra de mineral de hierro sueco y lo nombró vanadio.

El vanadio se encuentra en la corteza terrestre combinado, constituyendo la vanadita, la carnotita y patronita; el pentóxido de vanadio y algunas sales derivadas del mismo se emplean como catalizadores.

No es común encontrar yacimientos de vanadio, pero a cambio, este se encuentra en muy diversos materiales y es de estos de donde se extrae principalmente en el mundo.

En México se han encontrado pequeños yacimientos de vanadio, pero también se cuentan con otras fuentes alternativas :

- 1.- Menas de uranio vanadíferas.
- 2.- Yacimientos de roca fosfórica.
- 3.- Cenizas y residuos del petróleo de la zona del Caribe.
- 4.- Pizarras y arcillas. .

Los principales países productores de vanadio son : Estados Unidos, Brasil, Venezuela, Finlandia, Noruega, Suecia, URSS, Sudáfrica y Australia.

El mayor productor es Brasil con una capacidad de 900 a 1000 ton/año. Sigue en importancia Argentina con 100 a 150 ton/año. La producción mexicana es del orden de las 100 ton/año.

En la tabla 1 se muestran algunas propiedades del vanadio. Este elemento posee marcada afinidad por el carbono y nitrógeno, formando con ellos carburos, nitruros y carbonitruros, los cuales son poco solubles.

La adición de vanadio a los aceros se realiza para mejorar las propiedades mecánicas, tanto a baja como a alta temperatura y obtener superficies resistentes al desgaste, aprovechando las características de este elemento como: formador de precipitados (carburos, nitruros y carbonitruros), endurecedor de la solución sólida y controlador de grano.

El vanadio fue usado como microaleante hacia principios de la década de los 60's, en la elaboración de aceros HSLA. En la tabla 2 aparecen las utilizaciones habituales del vanadio, con referencias a normas ASTM que las cubren y el tipo de aceros involucrados. La cantidad de vanadio adicionadas es pequeña en la mayoría de los casos, aprovechando sus características de refinador de grano y formador de carburos.

PRODUCTO:	ASTM	CANTIDAD V	OBSERVACIONES
PLANCHAS ESTRUCTURALES	A 814, 872, 588	- 0.1 %	ACEROS Cr - Ni - V, Cr - Ni - Mo - V (RESIST. MAX.) 40 - 70 Kg/mm <sup>2</sup>
PLANCHAS BAJA ALEACION	A 225 y 808	- 0.1 %	ACEROS Mo - V Cr - Ni - Mo - Co
PLANCHAS DE ALTA RESISTENCIA	A 877	0.08 %	ACEROS Cr - Ni - Mo - V
TUBERIA:			
ALEACIONES FERRITICAS SIN COSTURA	A 408	0.15 / 0.25	ACEROS Cr - Mo - V (PARA ALTA TEMP.)
COMPONENTES PARA RECIPIENTES A PRESION ESTRUCTURALES SIN COSTURA	A 338 A 519	0.10 / 0.25 0.20	ACEROS Cr - Ni - Mo - V ACEROS Cr - Mo - V
ACEROS ALEADOS ESTRUCTURALES	A 29, 322, 331	0.10 / 0.20	ACEROS Cr - V
ACEROS PARA RESORTES	A 652	0.10 / 0.20	ACEROS Cr - Ni - V
ACEROS PARA SERVICIO A ALTAS TEMP.	A 619	0.20 / 0.30	ACEROS Cr - Mo - V
ACEROS PARA HERRAMIENTA	A 681	0.25 / 3.25	PRESENTE EN TODO TIPO DE ACEROS

TABLA 2. ALGUNAS APLICACIONES DEL VANADIO

Contemplando lo anteriormente expuesto, es natural tener una posición optimista sobre la eventual utilización del vanadio dentro de la industria metalúrgica, pues existen variadas fuentes de provisión y la posibilidad de un suministro constante, confiable, estratégicamente controlable y a precios razonables, con tendencia futura a la baja por aumento de la oferta.

La elaboración de los aceros HSLA con vanadio, niobio o titanio estará basada en estudios comparativos de la relación costo-propiedad para ciertos consumidores y por esta misma proporción acentuada por la disponibilidad estratégica del elemento.

## TITANIO

El titanio fué descubierto en 1791 por William Gregor en Cornwall, Inglaterra, el cual encontró unos granos de arena negros, que se presentaban en gran abundancia, semejante a la polvora por su apariencia. Gregor concluyó, que los granos estaban compuestos de óxidos, hierro y un nuevo metal. La arena recibió el nombre de "menakanite" y el óxido fué llamado "menakine" por R. Kirman. Este descubrimiento pasó casi inadvertido hasta 1797, cuando M. H. Klaproth identificó el óxido de menakanite con el que había extraído en 1795 del rutilo de Boinik, Hungría. Sin embargo, la prioridad de observación de Gregor no fué considerada y el nombre de titanio fué aplicado por Klaproth.

El titanio es el noveno elemento más abundante de la corteza terrestre y está contenido en varios minerales, pero los más importantes son la ilmenita ( $\text{FeTiO}_2$ ) y el rutilo ( $\text{TiO}_2$ ). La primera normalmente se halla en las arenas de las playas y en depósitos rocosos asociada con el hierro. El rutilo es un mineral más escaso, cuya fuente son básicamente las arenas de algunas playas de Australia.

Los minerales de ilmenita y rutilo se encuentran en Canadá, Costa Rica, Estados Unidos, México, Argentina, Uruguay, Finlandia, Noruega, URSS, Mozambique, Senegal, Sudáfrica, Tanzania, Egipto, Alto Volta, India, Indonesia, Malasia, Australia y Nueva Zelanda.

Los principales productores de ilmenita son : Canadá, Noruega, Australia y la URSS. En tanto los productores de rutilo son básicamente Australia, URSS y Sierra Leona.

En México los minerales de titanio no han sido objeto de investigaciones sistemáticas que permitan conocer las posibilidades comerciales de sus depósitos.

Existen diversas localidades con índices de titanio, las principales son:

- Baja California
- Coahuila

Las reservas probables contenidas en los depósitos de General Cepeda se estiman en 382,230 ton métricas con una ley media de 11.14% de  $\text{TiO}_2$ .

- Colima

Los yacimientos se encuentran en la costa del oceano Pacifico, como arenas titaniferas con una ley de titanio de 8.7%.

- Guerrero

En este estado se localizan dos yacimientos: El Cayacal y Papanoa.

Los yacimientos del Cayacal se extienden en una longitud de más de 2.5 Km y con una anchura de 12 a 15 m. El mineral se encuentra en la playa en forma de ilmenita. Se estima que en el Cayacal existen unas 50,000 ton posibles, conteniendo 5.9% de óxido de titanio.

Los yacimientos de Papanoa se localizan a 130 Km al noreste del puerto de Acapulco. En algunas partes la concentración de magnetita e ilmenita es muy alta y en otras es menor. La ley del mineral es un promedio de 10% de  $TiO_2$ .

- Oaxaca

También en este estado se localizan dos yacimientos: Huitzo y Pluma Hidalgo.

En los yacimientos de Huitzo el mineral aparece en forma de ilmenita-magnetita-apatita. Con un proceso adecuado se pueden lograr concentrados de ilmenita comercializables.

En Pluma Hidalgo las reservas comprobadas son de 90,960.2 ton métricas con una ley promedio de 29.43% de  $TiO_2$ .

- También se tienen los yacimientos de ilmenita localizados en Mazapa de Madero, Chiapas, arenas de titanio zir-

coníferas en Puerto Escondido Oaxaca, arenas pesadas en Paraiso, Tabasco.

En las siguientes propiedades se basan muchas de las aplicaciones del titanio y sus aleaciones.

- Resistencia.

Las aleaciones de titanio son de dos a tres veces más resistentes que las aleaciones de aluminio, cinco veces más resistentes que las de magnesio y tan resistentes como algunas aleaciones de acero.

- Rigidez.

El titanio es ocho veces más rígido que el aluminio y el magnesio. su módulo de elasticidad es aproximadamente la mitad que el del acero y considerablemente más alto que el del aluminio y el magnesio.

- Bajo peso.

El titanio es aproximadamente la mitad de pesado que el acero.

- Relación resistencia-peso.

La combinación de su gran resistencia y bajo peso es probablemente la más importante propiedad del titanio y sus aleaciones.

- Resistencia a la corrosión.

Tiene mayor resistencia a la corrosión que el acero inoxidable, lo cual lo hace de primera consideración en muchas aplicaciones químicas.

Dentro del campo de la metalúrgia en los últimos años, se han hecho aleaciones de titanio con varios metales, las más sobresalientes son ferro-titanio, ferro-carbón-titanio, cupro-titanio y mangano-titanio. Las dos primeras se usan en la fabricación de láminas de acero para galvanización y revestimiento de estaño.

En otros campos de aplicación el titanio es un material muy versátil, pues se emplea también como abrasivo, catalizador, en la fabricación de medicamentos y en la industria aeroespacial. En este último aspecto el titanio tiene un gran uso en la industria militar, ya que se utiliza en la fabricación de máquinas para aviones, en los discos de turbinas, aspas de compresores, fuselaje de aviones, proyectiles balísticos y cohetes dirigidos.

En México el uso del titanio es reducido, ya que se utiliza en la fabricación de tintes y pinturas, las que a su vez son utilizadas en la pigmentación de artículos de hule, plástico, papel, pieles, cerámica y otros materiales.



### II.3 FERROALEACIONES.

Una ferroaleación es una aleación de hierro con elementos tales como silicio, manganeso, cromo, tungsteno y otros metales. Se emplean en la fabricación del acero y se aplican tanto para mejorar sus propiedades en el afino (como desoxidantes), así como de elemento de aleación. El hecho de que se introduzca en el acero un elemento en forma de aleación con hierro y no en estado puro, es debido a que la ferroaleación tiene una temperatura más baja de fusión / además el costo de obtención del elemento principal en aleación con hierro es más bajo en comparación con el de un metal técnicamente puro.

Las ferroaleaciones se obtienen reduciendo los óxidos de los metales respectivos. Para la producción de ferrosilicio, ferromanganeso y ferrocromo se utilizan los minerales directamente, ya que estos tienen un alto contenido de los óxidos del elemento a reducir. Para la fabricación del ferrotungsteno, ferromolibdeno, ferrovanadio, ferrotitanio y otras aleaciones, es necesario someter a enriquecimiento el mineral, debido a la poca cantidad del elemento útil que tienen las fuentes de estos.

Los procesos de reducción se facilitan siempre que se desarrollen en presencia del hierro o sus óxidos. Disolviendo el elemento reducido o formando con el un compuesto químico, el hierro hace disminuir su actividad, lo lleva a la zona de reacción e impide la reacción inversa, o sea, la

oxidación. En varios casos la temperatura de fusión de la aleación con hierro es inferior a la de fusión del elemento que se reduce y, por consiguiente, la reacción puede trascurrir a una temperatura más baja.

Según el tipo de reductor empleado se distinguen tres procedimientos principales de obtención de las ferroaleaciones: el de reducción por carbono, el silicotérmico y el aluminotérmico. El más barato es el de reducción por carbono, el cual se utiliza al fabricar ferromanganeso y ferrocromo de alto carbono, así como todas las aleaciones con silicio. Las reacciones de reducción de los metales a partir de sus óxidos por medio del carbono son endotérmicas, por eso el procedimiento de reducción por carbono exige el suministro de calor.

Por los procedimientos silicotérmico y aluminotérmico se obtienen ferroaleaciones con muy bajo contenido de carbono. Por este procedimiento se obtienen ferromanganeso y ferrocromo con medio y bajo contenido de carbono, ferrocromo sin carbono, cromo y manganeso metálicos, ferroaleaciones y ligas con titanio, vanadio, tungsteno, molibdeno, circonio, boro y otros metales. Cuando la cantidad de calor que se desprende durante las reacciones exotérmicas es suficiente para obtener el metal y la escoria en estado líquido, la fusión se efectúa en hogares aislados, o sea en pozos revestidos. Si la cantidad de calor no es bastante, la fusión se lleva a cabo en hornos de arco semejantes a los que se emplean para la fabricación del acero.

## FERROSILICIO.

El ferrosilicio se emplea para desoxidar y allear el acero y en calidad de reductor al fabricar algunas ferroaleaciones.

Esta ferroaleación se obtiene en hornos eléctricos en composiciones que van del 18 al 50% y de 60 a 90% de silicio. Si la cantidad de silicio contenida en la aleación se halla dentro de los límites de 50 a 60%, entonces, por la presencia del fósforo o el aluminio, las aleaciones se convierten en polvo, desprendiendo compuestos volátiles dañinos. Por esta causa no se produce la aleación de tal composición.

En calidad de componente mineral de la carga se emplean las cuarcitas. Estas se machacan obteniendo pedazos de 25 a 80 mm y se separan por vía húmeda de la arcilla. Para obtener el ferrosilicio al 45% o al 75% se usa como reductor el coque metalúrgico en pedazos de 10 a 25 mm de tamaño. Para obtener la concentración deseada de silicio se introduce en la carga viruta desmenuzada de aceros al carbono. Como ya se mencionó anteriormente, la presencia del hierro facilita la marcha del proceso. Cuanto mayor sea la cantidad de hierro contenido en la carga, tanto más baja será la temperatura a la cual se obtiene el ferrosilicio.

El ferrosilicio contiene menos de 0.1% de carbono, a pesar de que se emplea el reductor de carbono y carbón como revestimiento del horno.

## FERROMANGANESO.

El ferromanganeso se emplea para la desoxidación y como aleante de los aceros. Los aceros para herramientas contienen hasta 0.4% de Mn, los aceros para construcción hasta 0.6 y los aleados con manganeso, de 0.8 a 13% de Mn.

Se producen dos tipos de ferromanganeso: al alto carbono y al bajo carbono. Para obtener el ferromanganeso de alto carbono o al carbono, se utilizan como materias primas minerales de manganeso, coque fino y viruta de acero. El ferromanganeso al carbono se obtiene con o sin fundente. En el segundo caso el proceso se realiza sin añadir la cal y, además del ferromanganeso al carbono se obtiene también la escoria de manganeso pobre en fósforo (cerca de 50% de MnO y - de 0.02 a 0.05% de P). Tal escoria se utiliza en vez del mineral de manganeso para fabricar el silicomanganeso o aleaciones a base de manganeso pobres en fósforo.

Se distinguen ferromanganesos con medio y bajos contenidos de carbono, en los cuales hay de 1 a 4% de C, así como el manganeso metálico que tiene de 0.1 a 0.2% de C. Para la fabricación de estos se emplean diversos procedimientos. Uno de ellos es el siguiente:

En este procedimiento se utilizan como materias primas el silicomanganeso, como reductor el silicio presente en éste, mineral de manganeso y cal como fundente. Para la obtención del silicomanganeso utilizado en éste procedimiento, se emplean minerales de manganeso, cuarcita y mineral de hier-

ra, utilizandose como reductor el carbono contenido en el coque, por lo cual se esperaria un alto contenido en carbono, sin embargo, debido a la capacidad del silicio de disminuir la solubilidad del carbono se obtiene con bajo contenido de éste ( de 1.0 a 2.5% de C). El silicomanganeso obtenido de esta forma se emplea para la producción de un ferromanganeso con medio o bajo contenido de carbono, utilizando-se el silicio presente en aquel para reducir el mineral de manganeso, utilizando cal como fundente.

#### FERROTITANIO.

El ferrotitanio se produce valiendose del proceso aluminotérmico con desprendimiento de calor. En condiciones determinadas la cantidad de calor generado es suficiente para formar el metal y la escoria liquidos. Por eso se utiliza la aluminotermia fuera del horno ( en pozos revestidos ).

El ferrotitanio estandar contiene de 23 a 30 % de Ti, no mas de 0.2% de C, menos del 4% de Cu, 6 a 8% de Al y 4 a 6% de Si. El cobre, aluminio y silicio son impurezas indeseables, pero inevitables.

La carga para la obtención del ferrotitanio se compone de un concentrado de ilmenita, mineral de hierro, aluminio y cal. El concentrado de ilmenita que contiene de 40 a 42% de  $TiO_2$  y 50 a 55% de  $FeO + Fe_2O_3$  se obtiene a partir del mineral titanomagnetita valiendose del método de separación magnética. Para eliminar el azufre el concentrado se somete a

la tostación oxidante.

En calidad de reductor se utiliza el aluminio en forma de polvo cuyos granos son de menos de 2 mm. En la producción de ferrotitanio se usa mineral de hierro en forma de polvo, pobre en fósforo, con alto contenido de óxidos de hierro y bajo contenido de este metal. La cal debe ser recién calcinada y contener más del 70% de CaO.

#### FERROVANADIO

El ferrovandio se emplea principalmente al fabricar los aceros al cromo-vanadio extradúridos y para construcciones, así como aleaciones resistentes a altas temperaturas; hace más resistente al acero para construcciones, incluso al estar presente en pequeñas cantidades ( 0.04 a 0.08% ). El ferrovandio estándar contiene de 35 a 45% de vanadio, cerca de 1% de carbono y de 2 a 3.5% de silicio.

Para obtener el ferrovandio se utiliza como materia prima minerales de hierro que contienen de 0.3 a 0.5% de vanadio en forma de trióxido  $V_2O_3$ . En algunos casos se encuentra mineral de hierro más ricos en vanadio. Primeramente a partir de los minerales se obtiene el pentóxido de vanadio  $V_2O_5$  que luego se reduce en los hornos eléctricos con ayuda del silicio o el aluminio. Si hay minerales con alto contenido de vanadio, se puede, para la obtención del pentóxido de vanadio, emplear directamente el procedimiento hidrometalúrgico, o sea, alear el mineral con adiciones alcalinas y luego lixiviar el sinterizado.

A partir del pentóxido se obtiene el ferrovandio en un horno eléctrico. El proceso se realiza en dos etapas : inicialmente se reduce una parte del pentóxido de vanadio por el exceso de ferrosilicio con adición de aluminio, obteniendo una aleación que contiene de 21 a 23% de silicio y una escoria en que hay menos de 0.35% de vanadio; luego la aleación obtenida se afina eliminando el silicio, por la parte restante del pentóxido de vanadio y se obtienen el ferrovandio ( 45 a 50% de V , cerca de 1.5% de Si ) y la escoria ( 10 a 15% de V O<sub>2</sub> ) que se utiliza en la primera etapa.

#### PRODUCCION DE FERROALEACIONES EN MEXICO

A pesar de que México ya producía acero desde principios de siglo, empezó a producir ferroleaciones hasta la década de los 50's. Actualmente existen tres empresas productoras de ferroleaciones: Compañía Minera Autlán, Ferralver S.A. y Ferroleaciones de México S.A.

La compañía Autlán fué fundada en 1953. Esta empresa produce ferroleaciones en su mayor parte convencionales ( en base en Mn y Si ). Hacia fines de los años 70's Minera Autlán se había transformado en la mayor empresa productora de ferroleaciones de América Latina y la segunda mayor productora de manganeso.

Ferroleaciones de México S.A. ( FERROMEX ) comenzó a operar en 1960. Su producción se centra en el ferromanganeso

de alto y bajo carbono, ferrosilicio al 50%, silicomanganeso ferrovandio, trióxido de molibdeno y ferroniobio. Esta empresa produjo en 1984 16,650 ton de ferromanganeso de alto carbono y 6,145 ton de  $FeSiMn$ , además de 299 ton de  $FeV$ ,  $FeMo$  y  $MoO$ . Para su producción utiliza materias primas extraídas de minerales de Durango y Chihuahua, principalmente. La proporción de integración nacional es de 100% en la fabricación de trióxido de molibdeno y ferromolibdeno y silicomanganeso, del 76% de ferromanganeso y del 50% en el vanadio. Esta empresa alcanzó en 1986 una producción de más de 30,000 ton de ferroaleaciones.

Ferralver S.A. inició sus operaciones a fines de 1967. En 1984 esta empresa produjo 11,415 ton de  $FeMn$  de alto carbono, de  $FeSi$  y de  $FeSiMn$ .

El consumo de ferroaleaciones México asciende anualmente a un poco más de 100,000 ton de las cuales alrededor del 5% son importadas. Estas últimas se refieren generalmente a  $FeCr$ ,  $FeNb$ ,  $FeMo$  y otras ferroaleaciones especiales. La industria mexicana se caracteriza por ser exportadora de ferroaleaciones comunes como  $FeMn$ ,  $FeSiMn$  y  $FeSi$ .

En cuanto al consumo de ferroaleaciones especiales este se abastece principalmente con la producción de  $FeCr$  de alto carbono y otras de Minera Autlán y de  $FeMo$  y  $FeV$  de Ferroaleaciones de México, S.A. el resto es importada.



TABLE 1

TIPOS	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979
Fe No	54333	107276	122059	131324	140182	138933	
A.C.	54333	107276	118040	121544	129271	118414	125409
M.C.	-	-	3988	9780	10911	20539	29086
Fe Si	18020	24806	27004	22682	28884	23892	
48% Si	6881	11883	18788	12217	18184	7186	11407
75% Si	8187	13043	11778	10445	15820	16706	16311
Si No	11736	33738	30814	26894	30484	41338	
12.18% Si							3696
18.20% Si							35908
Fe Cr (A.C.)	-	3998	-	3018	6230	2318	6284
Fe Ni	188	86	27	61	51	28	36
OM.	-	-	234	-	-	-	-
Fe V	28	89	83	109	109	61	284
Fe Nb	-	48	-	-	-	-	-
OTRAS	-	947	-	1983	-	1128	-
TOTAL	81284		170732	180848	184851	205800	227239

PRODUCCION DE FERROALEACIONES EN MEXICO

( TONELADAS )

TABLE 4

**CONSUMO E IMPORTACIONES DE FERROALEACIONES**

( EN TONELADAS )

TIPOS	CONSUMO			IMPORTACIONES		
	1980	1982	1983	1980	1982	1983
Fe Mn	61002	67883	64192	-	-	-
Fe Si	15720	14298	11174	-	-	-
Fe Si Mn	10768	23429	13454	-	-	-
Fe Ni	4	59	104	-	100e	100e
Fe Cr	6637	6118	5244	6000e	2000e	600e
Fe Nb	91	291	226	100e	300e	200e
Fe Mo	91	542	829	100e	400e	500e
Fe V	108	201	144	100e	100e	100e
OTROS	10337	3493	3482	6000e	1902e	31e
TOTAL	108851	110912	95849	11300	4.802	1851

e LA DISTRIBUCION POR PRODUCTOS ES ESTIMADA

## II.4 LAMINACION CONTROLADA

La necesidad de producir un tamaño de grano fino de ferrita, acompañado con algo de endurecimiento por precipitación, llevaron al desarrollo de las técnicas de laminación controlado. El estudio inicial de esta técnica se basa en que para obtener un tamaño de grano fino de ferrita, es necesario tener un tamaño de grano fino de austenita.

La laminación controlada es un proceso que afecta simultáneamente la tenacidad y la ductilidad, y su uso puede mejorar considerablemente la soldabilidad, manteniendo alta resistencia sin necesidad de un tratamiento térmico.

En esta técnica se requieren de deformaciones adecuadas a la temperatura de laminación final. Si al final de una secuencia de laminación se obtienen temperaturas bajas y deformaciones gruesas, se pueden obtener granos finos de ferrita aunque la austenita no haya recristalizado. Esto se debe a la producción de granos de austenita alargados y delgados, los cuales permiten que los granos de ferrita choquen unos con otros durante la transformación, con lo que la ferrita permanece fina. Sin embargo, si la deformación de laminación no es elevada, los granos de austenita no son delgados y se forma, ya sea ferrita burda o bainita, con un consecuente perjuicio en las propiedades; por esto, son esenciales deformaciones gruesas y temperaturas finales bajas. Al continuar las reducciones gruesas a temperaturas muy

bajas ( 500 C ), se puede producir una mejora adicional en resistencia y en la temperatura de transición por impacto, debido al refinamiento adicional de tamaño de grano, la laminación controlada presenta algunas dificultades operacionales, como son :

- La gran energía necesaria para efectuar grandes reducciones a tan bajas temperaturas, y
- El tiempo requerido para enfriar el acero a temperaturas finales bajas.

El primer problema puede solucionarse al reemplazar pocas reducciones gruesas con muchas reducciones ligeras pero a baja velocidad de deformación. El segundo problema puede ser minimizado con un enfriamiento acelerado.

Para conseguir austenita fina, la secuencia de laminado debe ser cuidadosamente controlada. La mayoría de los beneficios de la laminación controlada viene del refinamiento de microestructuras transformadas, tales como el tamaño de grano de ferrita. El refinamiento de grano de ferrita es el resultado de dos mecanismos : los granos formados de austenita recristalizada fina por laminado en caliente a temperaturas intermedias y la deformación de austenita abajo de la temperatura de recristalización, la cual induce la nucleación de los granos de ferrita. Aunque los dos mecanismos a menudo ocurren simultáneamente en la mayoría de los casos, se ha puesto mayor énfasis en la deformación de la austenita.

Los factores importantes que controlan la microestructura austenítica son la recristalización dinámica y la

estática, durante y después de la deformación por el laminado. La primera ocurre por efecto de la temperatura y deformación la segunda solo por temperatura. Estos procesos son influenciados por el tamaño de grano inicial, temperatura, reducción en cada paso, la velocidad de deformación, la secuencia de los pasos de laminación y la presencia de elementos de microaleación ( niobio, vanadio y titanio ).

Las condiciones que favorecen la recristalización dinámica son la laminación a altas temperaturas, grandes reducciones así como baja velocidad de deformación, el refinamiento de grano ocurre de la siguiente forma : partiendo de un cierto tamaño de grano de austenita, cuando se realiza la deformación los granos se alargan y la energía que se le da mediante los rodillos es suficiente para que haya una recristalización, ya que, el grano alargado se divide en varios granos pequeños, esto es posible debido a la baja velocidad de deformación la cual permite que esta energía sea aprovechada por el grano alargado y forme granos de austenita más pequeños.

La recristalización estática tiene lugar por abajo de la temperatura de recristalización. Una vez que ocurre la deformación toma lugar la recristalización estática ya que la energía que se suministra por el laminado, aumenta la temperatura, obteniéndose granos más finos de austenita. Puesto que las estructuras deseables de austenita consisten de granos finos uniformemente y/o granos uniformes considerablemente deformados que pueden ser transformados en es-

estructuras de ferrita fina y uniforme. En la recristalización dinámica el tamaño de grano recristalizado no es influenciado por el tamaño de grano inicial a diferencia de la importancia del tamaño de grano original en la recristalización estática.

### PASOS MULTIPLES

En términos prácticos, las reducciones por paso del laminado normal a temperaturas altas e intermedias, son generalmente menos del 20%. Por lo tanto, no siempre es posible exceder la reducción crítica ( que es aquella donde se tiene una mayor recristalización de granos ) para recristalización en muchos de los pasos. Si la deformación por cada paso es acumulativa como en el laminado en frío, puede ser posible llegar a la reducción crítica para recristalización a través de pasos múltiples.

Una laminación controlada severa de aceros microaleados presenta dificultades prácticas debido a que la reducción crítica para recristalización no puede ser excedida, principalmente por las limitantes de capacidad de los rodillos de laminación, a menos que un muy cuidadoso programa sea seleccionado. Puede ser importante exceder la reducción crítica cuando menos dos veces durante las primeras etapas de laminación. Entonces, la recristalización puede continuar por sí misma en los pasos subsecuentes.

Cuando se tienen altas temperaturas y altas reducciones, el tamaño de grano es determinado, principalmente por

la temperatura de laminación. A temperaturas y reducciones intermedias, se determina por la cantidad de reducción durante el laminado, figura 2.8.

En el laminado de pasos múltiples, el efecto de cualquier paso intermedio depende del tamaño de grano determinado por los pasos precedentes. En la recristalización dinámica un tamaño de grano refinado, logrado por el efecto de los elementos microaleantes, disminuye la reducción crítica necesaria para lograr la recristalización.

Priestner (12), determinó que el tamaño de grano, después de un laminado de pasos múltiples, depende solamente de la temperatura final de laminación. Bajo condiciones donde la recristalización estática predomina, los pasos precedentes tienen una importante influencia. Dados los criterios de temperatura y reducción para recristalización, los granos recristalizados serán más finos cuando la reducción se incrementa y la temperatura se baja.

Es difícil diferenciar entre los factores que influyen la efectividad de la laminación controlada en términos de refinamiento estructural, debido a que la microestructura es una consecuencia de deformaciones sucesivas de austenita a temperaturas decrecientes durante el enfriamiento.

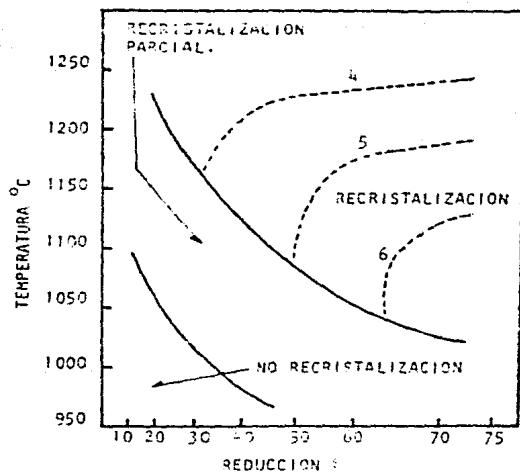


FIG. 2.3 . RECRISTALIZACION DE LA AUSTENITA Y TAMAÑO DE GRANO RESULTANTE COMO UNA FUNCION DE LA TEMPERATURA DE LA LAMINACION Y LA REDUCCION. EL NUMERO EN LA ZONA DE RECRISTALIZACION INDICA EL TAMAÑO DE GRANO .



## CAPITULO III

## FABRICACION DE ACEROS MICROALEADOS

## III. 1 PROCESOS DE FABRICACION DEL ACERO

La obtencion del acero, en general, se realiza por medio de un proceso de dos etapas. En este proceso la primera etapa consiste en la reducci3n selectiva del hierro a partir del mineral del mismo, en la cual se reducen tambi3n el f3sforo y peque1as cantidades de silicio y manganeso. El alto horno es el proceso m3s utilizado para llevar a cabo esta primer etapa; en este proceso el metal se carbura parcialmente y se satura de azufre, dando como resultado el arrabio, o sea, la aleaci3n de hierro con carbono, silicio, manganeso, azufre y f3sforo.

Tambi3n se utiliza el procedimiento de reducci3n directa, del cual se obtiene el hierro esponja.

La segunda etapa consiste en afinar el arrabio o hierro esponja para obtener el acero con la composici3n deseada. El afino consiste en la oxidaci3n selectiva de las impurezas del arrabio, hierro esponja o chatarra, transformandolas en escoria o gases. A medida que disminuye el contenido de impurezas comienza a oxidarse el hierro, saturando el metal de ox3geno, el cual debe eliminarse ya que el acero que contiene ox3geno se agrieta durante la deformaci3n en caliente. La

desoxidación se lleva a cabo introduciendo elementos de mayor afinidad con el oxígeno que el hierro, los cuales forman óxidos insolubles que suben fácilmente a la superficie formando parte de la escoria. Este proceso se lleva a cabo en hornos Siemens-Martin, en convertidores o en hornos eléctricos.

Se puede clasificar el acero en dos tipos : aceros al carbono y aceros aleados. Asimismo, estos se pueden subclasificar de la siguiente forma :

1.- Aceros al carbono.

- a) De bajo carbono ( menos de 0.3% )
- b) De medio carbono ( 0.3 a 0.7% )
- c) De alto carbono ( 0.7 a 1.4% )

2.- Aceros aleados.

- a) De baja aleación ( los elementos especiales de aleación suman menos del 8% )
- b) De alta aleación ( los elementos especiales de aleación suman más del 8% ).

No obstante que todo acero puede tener hasta 2% de carbono, las aplicaciones prácticas limitan tal contenido a 1.4%, siendo los aceros con menos de 0.6% los que ocupan la mayor producción comercial.

Dentro de la producción de aceros aleados, independientemente del tipo de acero por fabricar, la adición de los elementos aleantes se hace a través de ferroaleaciones, que estudiamos en el capítulo anterior. El proceso de acera-

ción se lleva a cabo actualmente en cualquiera de los siguientes hornos, dependiendo del tipo de acero a fabricar y las propiedades que se buscan de estos : hornos de oxígeno básico ( convertidor LD ), horno de hogar abierto ( Siemens-Martin ), horno eléctrico y horno eléctrico de inducción, principalmente.

El procedimiento para fabricar un acero, en términos generales es :

- 1.- Carga del horno con arrabio líquido o sólido, hierro esponja, chatarra o una combinación de estos, dependiendo del equipo utilizado.
- 2.- Fusión de la carga.
- 3.- Período oxidante o de afinado
- 4.- desescoriado.
- 5.- Período desoxidante.
- 6.- Período de dosificación ( adición de los elementos aleantes )
- 7.- Colada del acero.

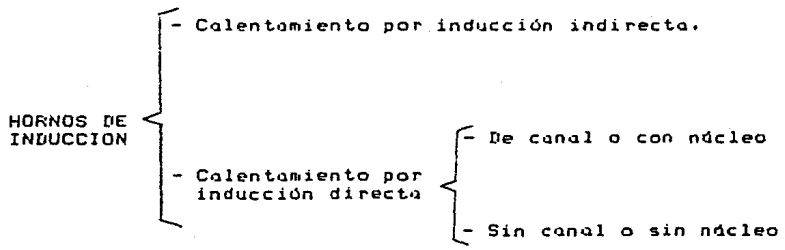
Para fabricar los aceros aleados y de alta calidad se utilizan los hornos eléctricos de arco y de inducción abiertos o al vacío. Estos aceros es difícil obtenerlos en los convertidores y hornos de hogar abierto ( Siemens-Martin ). La mayor cantidad del acero producido en hornos eléctricos se elabora en los hornos de arco, siendo la producción del acero fabricado en hornos de inducción menos importante. Sin embargo, los hornos de inducción son los que se utilizan más ampliamente a nivel experimental.

En este trabajo nos enfocaremos específicamente a los hornos de inducción debido a que nuestro trabajo experimental se llevó a cabo en uno de estos.

### III.2 HORNO DE INDUCCION ( ASPECTOS ELECTRICOS )

El horno de inducción se puede considerar como un transformador, en el cual el primario lo constituye la bobina y el secundario lo constituye el metal a fundir. El calor necesario para la fusión de la carga, será generado por la resistencia que la carga presenta al paso de la corriente inducida, es decir, debido al efecto Joule.

Los hornos de inducción se pueden clasificar de la siguiente forma :



Los hornos de inducción de calentamiento por inducción indirecta, se utilizan para fundir materiales que son buenos conductores eléctricos, en los cuales el calor generado por el efecto Joule no es suficiente para fundir el material. Se tiene como ejemplos al cobre y al aluminio.

En los hornos de inducción directa el material es fundido por el efecto Joule mencionado anteriormente. Las diferencias entre los hornos de inducción con núcleo y sin núcleo consiste en que el núcleo se utiliza para mejorar el acoplamiento magnético entre la bobina primaria y el canal, el cual necesita tener metal fundido para que el horno pueda funcionar, debiendo hacerlo en forma continua.

Los hornos de inducción son de dos tipos :

- 1.- Hornos alimentados con corriente de alta frecuencia y
- 2.- Hornos alimentados con corriente de frecuencia de red -  
( 50 a 60 Hz.).

En los hornos del primer grupo la frecuencia de la corriente de alimentación suele disminuir a medida que crece la capacidad del crisol y su diámetro. Pequeños hornos ( de algunos kilogramos y menos ) son alimentados con una corriente cuya frecuencia varía de 50 a 1000 KHz, medios y grandes hornos ( hasta algunas decenas de toneladas ), con corrientes de 500 a 10,000 Hz.

La figura 3.1 muestra el esquema eléctrico simplificado de un horno de inducción de alta frecuencia. La corriente alterna de alta frecuencia procede de la fuente de alimentación 1, que se suministra a través del interruptor 2 al inductor 3 que lleva conectados en paralelo grupos de capacitores 5 y 6. La fuente de alimentación bien puede ser un motorogenerador o se puede utilizar un convertidor de frecuencia con tiristores. Los capacitores sirven para compensar la

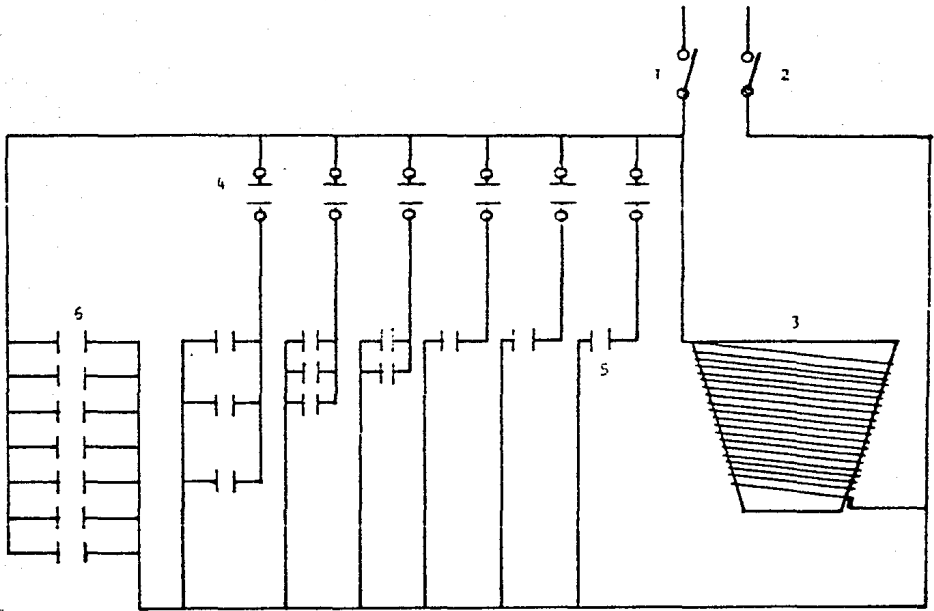


FIG. 3.1 ESQUEMA ELECTRICO SIMPLICADO DE UN HORNO DE INDUCCION DE ALTA FRECUENCIA.

inductancia del embobinado ( inductor ). El circuito lleva intercalados dos grupos de capacitores: los capacitores 6 (figura 3.1), del primer grupo están conectados permanentemente, mientras que los capacitores del segundo grupo se conectan en caso de necesidad.

En el proceso de fusión, a medida que van calentándose los materiales de carga, varía la resistividad y permeabilidad magnética de los mismos, debido a lo cual cambia la inductancia de la instalación. Conectando o desconectando los capacitores adicionales se logra la igualdad de inductancia y capacitancia, o sea,  $\cos \phi$  de la instalación llega a ser próximo a la unidad. En los hornos de frecuencia de red el revestimiento y el inductor son los mismos que en los de alta frecuencia. Debido a la ausencia del convertidor de frecuencia para estos hornos es característico un menor consumo específico de energía eléctrica y más alto factor de potencia.

La particularidad importante de los hornos de inducción consiste en una intensa circulación del metal líquido. Esta circulación se origina por la interacción de los campos electromagnéticos excitados, por un lado por las corrientes que pasan por el inductor y, por otro lado, por las corrientes inducidas en el metal. El aspecto positivo de éste fenómeno radica en que debido a la agitación, se acelera la fusión del metal y la igualación de su composición y su temperatura. La intensidad de agitación es, aproximadamente, pro-

porcional al cuadrado de Amper-Espira (  $In$  )<sup>2</sup> e inversamente proporcional a la frecuencia de la corriente de alimentación. Debido a esto, la intensidad de agitación electrodinámica es considerablemente más alta en los hornos de frecuencia de red; en consecuencia estos hornos se calculan para -- una menor potencia específica.

### III.2 TECNICA DE FUSION

En los hornos de inducción las pérdidas de los elementos que componen el acero son mínimas. Debido a esto, en el horno se puede fabricar el acero a partir de los desechos de aleación, que consiste en una simple refusión. También se puede fabricar acero aleado a partir del hierro de primera fusión, chatarra y agregando ferroaleaciones.

En general, para la obtención del acero de composición prefijada en el horno de inducción, se necesita conocer la composición química y la masa de la carga, efectuándose la fusión suponiendo que no hay pérdida de componentes, agregando a la carga las ferroaleaciones necesarias para obtener la composición deseada. Debido a esto y al poco tiempo en que se lleva a cabo la fusión en estos hornos, es poco usual la comprobación de la composición en base a análisis previos a la colada. Por otra parte, es necesario que el contenido de carbono, azufre y fósforo no rebase los límites admisibles en el acero deseado, de otra forma tendrían que eliminarse en parte; en el caso del carbono no hay mayor dificultad



tad procediendo a oxidar y desoxidar la carga, pero debido a 'escorias frias' la desfosforación y desulfuración son difíciles.

La carga se compone de pedazos de material colocandolo apretadamente para asegurar el contacto y abreviar la duración de la fusión. Al empezar a lograr la temperatura de fusión se controla que los pedazos cargados no se suelden obstaculizando el hundimiento de los tramos en fusión; para esto, periodicamente los materiales de carga se hacen precipitar con ayuda de una pequeña barra. Una vez aparecido el metal liquido se introduce una mezcla escorificante compuesta de cal, espatoflúor y magnesita en relación 3:1:1 para un refractario basico, agregandose pedazos de vidrio, de chomota y cal para un refractario ácido. La finalidad de la escoria formada consiste en disminuir la saturación del metal por los gases procedentes de la atmósfera y la oxidación de los elementos de aleación.

Después de fundidos los materiales de carga, se toma una muestra de metal para el análisis y se evalua la escoria de fusión para evitar que a partir de ella se reduzca el fósforo, despues de lo cual se forma una escoria nueva. Una vez obtenido el análisis del metal, se procede a su desoxidación y la corrección de su composición, o bien a su aleación, introduciendo en el crisol las ferroaleaciones respectivas, después de lo cual el metal se sangra del crisol a la cuchara.

En el horno de crisol básico la ferroaleaciones se agregan en el orden siguiente : el ferrocromo, ferrotungsteno y ferromolibdeno se introducen junto con los materiales de carga; el ferromanganeso, ferrosilicio y ferrovandio, de 7 a 10 minutos antes de la sangría y el aluminio directamente antes de la sangría. Las pérdidas por ignición constituyen para el tungsteno cerca del 2%, para el cromo, manganeso y vanadio de 5 a 10%, para el silicio de 10 a 15% y para el titanio de 25 a 35%. En el horno con revestimiento ácido la pérdida por ignición del manganeso es de 10%, la del tungsteno y molibdeno cerca del 2%, la del cromo 5% y el silicio no se pierde prácticamente.

El consumo de energía eléctrica, al fabricar el acero en los hornos de inducción, varía entre 500 y 700 KWh/ton.

### III.3 HORNO DE INDUCCIÓN DE LA FACULTAD DE INGENIERIA

El horno de inducción de la facultad de ingeniería es un horno sin núcleo, de alta frecuencia y se encuentra instalado en el área de fundición de los laboratorios de ingeniería mecánica. Sus características y componentes son los siguientes : marca Ajax Magnethermic, de 30 KW de capacidad de generación nominal, con 400 volts en las terminales de salida que proporciona una frecuencia 4200 Hz.

El horno consiste de una unidad motogeneradora de energía eléctrica de alta frecuencia y dos crisoles además

del conjunto de elementos de protección y acoplamiento. El motor es de inducción de 50 HP trifásico, diseñado para operar de 50/60 Hz. Tiene dos polos con una velocidad de operación de 3550 RPM en sistema de 220 volts nominales entre fases y con un factor de potencia ( f.p. ) de 0.85. Este motor impulsa el motor del generador que produce la energía especificada anteriormente. El sistema de enfriamiento del horno de inducción suministra de agua a la unidad motogeneradora, capacitores, transformador de alta frecuencia y crisoles uno y dos. Es un circuito abierto, es decir el agua está en contacto con el aire, y las partes de las que esta compuesto son las siguientes :

- 1.- Una torre de enfriamiento por evaporación y aereación.
- 2.- Dos tanques de almacenamiento de agua.
- 3.- Dos bombas centrifugas, una bomba esta accionada por un motor trifásico de 5 HP, 1715 RPM con lubricación por goteo natural. La otra bomba es accionada por un motor monofásico de 1/2 HP.
- 4.- Un manómetro, el cual nos indica la presión de entrada del agua de enfriamiento al horno. La presión mínima del aguas requerida es de  $2.2 \text{ Kg/cm}^2$  y la presión media de  $3.16 \text{ Kg/cm}^2$ .

El sistema cuenta con un par de crisoles del tipo denominado " prefabricado " . Cada crisol cuenta con una cubeta construida de material refractario primario lo suficientemente resistente para servir por un lado de apoyo del material refractario definitivo y por otra para contener las uniones a fin de que el conjunto pueda apoyarse sobre las

bases de un sistema de volteo. Alrededor de esta cubeta por la parte externa se fija la bobina, sobre unas anclas que se encuentran incrustadas en la misma. El material con que está construida es un mezcla especial de sílice-cuarzo con amalgama de materiales ferrosos. Existen diversidad de tipos de refractarios que pueden ser aplicados al interior de la cubeta, cuya selección depende del tipo de trabajo a realizar y del metal que será fundido en ella.

## CAPITULO IV

PRODUCCION EXPERIMENTAL DE  
ACEROS MICROALEADOS

## IV.1 DESARROLLO EXPERIMENTAL

Debido a la escasa información y producción de aceros microaleados en México, es necesario la producción de estos aceros en apoyo a las incipientes investigaciones realizadas en este campo, por medio de un programa experimental cuyo objetivo es la obtención de dichos aceros.

El desarrollo experimental se realizó en el horno de inducción descrito anteriormente. Para lo cual se llevaron a cabo una serie de trabajos que consistieron en :

- Verificación del funcionamiento del horno de inducción e instalaciones auxiliares como son : la unidad motogeneradora, sistema de enfriamiento el cual incluye bombas, tanques de almacenamiento, tubería y torre de enfriamiento.
- Inspección del revestimiento del crisol.
- Construcción de la boca del crisol, con una mezcla de arcilla, arena, cemento refractario y agua. Dándole la forma de canal para el vaciado del acero.
- Preparación de lingoteras y cucharas. Las lingoteras están formadas en dos partes, de perfil "L", fabricadas de

hierro gris, para facilitar el desmoldeo, las cuales son sujetados por prensas en 'C'.

Para lograr lingotes de buena calidad, se decidió alimentar las lingoteras por la parte inferior, ayudado por un canal vertical, el cual se hizo por el proceso de moldeo al CO.

2

Para el caso de la cuchara, se le dió la forma de cono truncado para facilitar el vaciado, además las dimensiones se dieron en base al mineral con que se cuenta, las cuales se indican a continuación :

Altura = 35 cm.

Diámetro mayor = 25 cm

Diámetro menor = 15 cm.

Para su construcción se utilizó lámina calibre 22 y se recubrió internamente con una mezcla de arcilla refractoria posteriormente fué secada en un horno de foso.

- La chatarra que se utilizó fué barra de 1/2" de diámetro con la siguiente composición química :

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
0.22	0.44	0.3	0.016	0.022	0.20	0.10	0.02

La barra se cortó en trozos de 10 cm y se le quitó la capa de óxido, esto es para facilitar el contacto cuando se encuentre dentro del crisol.

- Cálculo de la carga.

Las ferroaleaciones que se utilizaron fueron las sigui-

entes :

- a) Ferromanganeso con 72% de Mn
- b) Ferrosilicio con 75% de Si.
- c) Ferrovandio con 70% de V.
- d) Ferratitanio con 30% de Ti.
- e) Oxido de hierro para eliminar el C, Mn, Si.
- f) Cal como fundente.

La composición del acero que se desea obtener es la siguiente :

C	Mn	Si	P	S	V
0.10	1.3	0.30	0.016	0.022	0.04

Debido a que la capacidad de cada lingotera es de 5 Kg., el peso de la chatarra será de 25 Kg. para 4 lingoteras y el canal vertical; en base a esto se hacen los cálculos para la adición de las ferroaleaciones.

$$\text{Ferrosilicio : } \text{Peso del FeSi} = \frac{PC(0.3 \times 10^{-2})}{0.75(0.8)}$$

Donde : PC = Peso de la chatarra = 25 Kg.

$$0.3 \times 10^{-2} = \text{Z de Si a obtener.}$$

$$0.75 = \text{Z de Si en la ferroaleación.}$$

$$0.8 = \text{recuperación del Si en la mezcla}$$

$$\text{Peso del FeSi} = \frac{25(0.3 \times 10^{-2})}{0.75(0.8)} = 0.125 \text{ Kg.}$$

Ferromanganeso :  $10^{-2}$

$$\text{Peso del FeMn} = \frac{25(1.3 \times 10^{-2})}{0.72(0.8)} = 0.564 \text{ Kg}$$

Donde :  $1.3 \times 10^{-2} = X$  de Mn a obtener

0.72 = % de Mn en la ferroaleación

0.8 = recuperación del Mn en la mezcla

Ferrovanadio :  $10^{-2}$

$$\text{Peso del FeV} = \frac{25(0.04 \times 10^{-2})}{0.7(0.95)} = 0.0150 \text{ Kg}$$

Donde :  $0.04 \times 10^{-2} = X$  de V a obtener

0.7 = % de V en la ferroaleación

0.95 = recuperación del V en la mezcla

Ferrotitanio :  $10^{-2}$

$$\text{Peso del FeTi} = \frac{25(0.04 \times 10^{-2})}{0.3(0.8)} = 0.0416 \text{ Kg}$$

Donde :  $0.04 \times 10^{-2} = X$  de Ti a obtener

0.3 = % de Ti en la ferroaleación

0.8 = recuperación del Ti en la mezcla

Una vez que todo estuvo listo, se procedió a la fusión de la chatarra, siguiendo los principales fases para la obtención del acero.

- 1.- Pre calentamiento del crisol.
- 2.- Carga de la chatarra.
- 3.- Fusión de la carga.
- 4.- Período oxidante o de afino.
- 5.- Desescoriado.
- 6.- Período desoxidante.
- 7.- Período de dosificación.



## 8.- Colada del acero.

A continuación se describe cada una de las fases :

### 1.- Precalentamiento del crisol.

Esto se hizo para eliminar la humedad que hay en el revestimiento del horno, además de la contenida en la mezcla preparada para la boca. Para esto se utilizó un quemador de gas durante 1 Hr.

### 2.- Carga de la chatarra.

Se colocaron cuidadosamente los trozos de chatarra para que tuvieran un buen contacto entre si, facilitando la fusión de la carga.

### 3.- Fusión de la carga.

Cuando toda la carga quedó lista, se puso en marcha el horno ajustandose a 200 volts y 5 KW. A medida que se incrementaba la temperatura, se aumentaba el voltaje y la potencia, cuidando el factor de potencia y el sistema de enfriamiento. También se tomó en cuenta que la corriente no excediera de 75 Amp., debido a las especificaciones del horno de inducción. Así, después de un determinado tiempo, se llegó a la fusión de la carga con una potencia de 27 KW y 400 V.

### 4.- Periodo oxidante o de afino.

Una vez que se logró fundir el acero, éste empezó a ser oxidado por la acción del oxígeno del aire, se añadió un poco de cal para cubrir el baño metálico y después se agregó óxido de hierro para acentuar la oxidación del metal fundido. Se formó una pequeña cantidad de escoria

compuesta por sílice y óxido de hierro, esta escoria que cubre el baño metálico es en realidad la que sirve como vehículo al óxido de hierro para la oxidación del acero. En el baño metálico se oxida primero el hierro, por ser el elemento más abundante, después el silicio, manganeso y el carbono.

#### 5.- Desescoriado.

Cuando terminó el período de afino, se retiró la escoria que cubría el baño metálico el cual quedó muy oxidado.

#### 6.- Período desoxidante.

En esta parte se añadió ferrosilicio al baño metálico, esto es para reducir el contenido de oxígeno.

#### 7.- Período de dosificación.

Se agregaron las cantidades calculadas de ferrosilicio, ferromanganeso y ferrovanadio.

#### 8.- Colada del acero.

Antes de la colada se precalentaron las lingoteras con un quemador de gas, y la cuchara en un horno de foso, a estos se les dió un recubrimiento con plomajina para evitar que el acero se adhiera a las paredes de estas. Una vez que todo estuvo preparado, se vació el acero en la cuchara, posteriormente, en las lingoteras. Después se enfriaron y se desmontaron los lingotes, y se procedió de nuevo, a hacer las preparaciones necesarias (horno, lingoteras y cuchara), para obtener el acero microaleado con titanio. Se siguieron los mismos pasos, incluso las cantidades de FeSi, FeMn y de chatarra fueron las mismas, solo que ahora se agregó el FeTi en la cantidad calculado anteriormente.

Ya que se tenían los dos tipos de acero, uno con V y otro con Ti, se procedió a dar un recocido a los lingotes en un horno eléctrico de resistencias a una temperatura de 950 °C, esta temperatura se seleccionó ya que se esperaba un acero con bajo contenido de carbono (0.10%). Posteriormente se realizó un análisis químico a cada muestra obteniéndose los siguientes resultados :

Muestra 1 ( con vanadio )

C	Mn	Si	P	S	V
0.20	0.85	0.08	0.034	0.020	0.031

Esta muestra presentó mucho poro.

Muestra 2 ( con titanio )

C	Mn	Si	P	S	Ti
0.39	2.4	0.65	0.024	0.027	0.021

Cabe mencionar que todos los análisis químicos se realizaron en Fundidora de Aceros Tepeyac, S.A. de C.V.

De estos resultados podemos hacer los siguientes comentarios :

- El contenido de C en ambas muestras es alto comparado con el especificado.
- La muestra 2 presenta una gran cantidad de Mn.
- La muestra 1 tiene muy poco silicio, dando como resultado un acero efervescente, a esto se debe que la muestra presentó mucho poro, ya que no hubo una buena desoxidación.

La explicación de estas fallas se debe a :

- 1.- No se tomó en cuenta que el FeMn era de alto carbono.
- 2.- No se calculó el carbono a eliminar, por lo tanto, no se agregó la cantidad adecuada de óxido de hierro. Es por esto que no se eliminó totalmente el carbono durante el período de oxidación y al agregar el FeMn, elevó el contenido de carbono en ambas muestras.

En base a lo anterior, se decidió efectuar otra fundición pero con las siguientes modificaciones para corregir algunas fallas :

- Se empleará FeMn de medio carbono (80% de Mn; 1.5% de C).
- Se usará una lanza para inyectar oxígeno y oxidar por completo el baño metálico. El equipo para este proceso, consiste en : un tanque de oxígeno, manguera flexible, tubo de acero galvanizado y una válvula para controlar el flujo y presión del oxígeno.
- En la parte superior del crisol, se colocará un tiro o chimenea desmontable para protección, debido a la presión del oxígeno y además porque la oxidación es muy brusca.
- En este caso fué necesario la reparación del revestimiento del crisol, debido a que presentaba algunas grietas.

La reparación del crisol consistió en lo siguiente :

El referactario que se empleó fué magneharth 15s, el cual se fabrica utilizando magnesita calcinada como materia prima, es necesario mezclarla con pequeñas cantidades de agua para activar los elementos ligantes y de esta manera aglomerar y endurecer el refractario.

Las paredes del crisol se construyeron de la siguiente

forma : se colocó un molde de lámina calibre 22 (mandril), con un diámetro de 20 cm y 30 cm de altura. El refractario preparado se agrega entre las espiras y el molde de lámina, para apisonar uniformemente se utilizaron unos pisones de solera los cuales tienen una forma semicircular en su base. La compactación del refractario se hizo por capas, hasta formar las paredes, cuidando de que el espesor quedara de 2 cm.

Después se construyó la boca del horno como se mencionó anteriormente. También se hizo una base en la parte superior del crisol para colocar el tiro o chimenea. Luego se procedió al secado del refractario con la ayuda del quemador de gas, durante 4 Hr.

Para esta ocasión se utilizaron dos cucharas, ya que se obtendrán los dos tipos de aceros, en la misma fusión.

Se prepararon dos lingoteras y un canal vertical para una colada, por lo tanto el peso de la carga fué de 15 Kg. ( ya que el canal vertical tiene una capacidad de 5 Kg. ), y el peso total para las dos coladas fué de 30 Kg.

Todos los preparativos se realizaron en forma similar a la primer fundición. Cuando todo quedó listo se procedió a la fusión de la chatarra.

Para este caso no es necesario describir todas las fases del proceso de obtención del acero, solo mencionaremos las más importantes, que es a partir del periodo de oxidación :

- Periodo de oxidación.

Cuando se observó que toda la carga se encontraba en estado líquido, se preparó la lanza para inyectar oxígeno

no a una presión de  $2 \text{ Kg/cm}^2$ , y se colocó dentro del baño metálico, observándose que se desprendían abundantes humos de color rojizo, no se observó llamas ya que la chatarra tiene poco carbono; la oxidación se realizó por espacio de 3 minutos, en los cuales al introducir la lanza al baño metálico esta también se fundía, quedando la lanza en la superficie un determinado tiempo, luego se introducía una vez más y así hasta completar los 3 minutos, procurando que la lanza se mantuviera siempre dentro del baño metálico.

- Desescoriado.

Se produjo muy poca escoria, por lo que no se realizó el desescoriado en el crisol, sino que se hizo en la cuchara.

- Desoxidación.

Solo se agregó 100 gr. de ferrosilicio para calmar el baño metálico.

- Periodo de dosificación.

Se calculó el ferromanganeso para 30 Kg. y se agregó a la carga.

$$\text{Peso del FeMn} = \frac{30(1.3 \times 10^{-3})}{0.80(0.8)} = 0.61 \text{ Kg.}$$

Donde : 30 = Peso de la chatarra (Kg.)

$$1.3 \times 10^{-3} = X \text{ de Mn a obtener.}$$

0.8 = X de Mn en la ferroaleación .

0.8 = recuperación de Mn en la mezcla.

El cálculo del FeSi se hizo para 15 Kg., ya que esta es la capacidad de cada cuchara, el cual se agrega durante el vaciado del crisol a la cuchara.

## - Ferrosilicio

$$\text{Peso del FeSi} = \frac{15(0.3 \times 10^{-2})}{0.75(0.8)} = 0.075 \text{ Kg}$$

Donde : 15 = Peso de la chatarra (Kg)

$0.3 \times 10^{-2}$  = % de Si a obtener

0.75 = % de Si en la ferroaleación

0.8 = recuperación del Si en la mezcla

## - Vanadio

$$\text{Peso del FeV} = \frac{15(0.04 \times 10^{-2})}{0.7(0.95)} = 0.009 \text{ Kg}$$

Donde :  $0.04 \times 10^{-2}$  = % de V a obtener

0.7 = % de V en la ferroaleación

0.95 = recuperación del V en la mezcla

## - Titanio

$$\text{Peso del FeTi} = \frac{15(0.04 \times 10^{-2})}{0.3(0.8)} = 0.025 \text{ Kg.}$$

Donde :  $0.04 \times 10^{-2}$  = % de Ti a obtener

0.3 = % de Ti en la ferroaleación

0.8 = recuperación del Ti en la mezcla

## - Colada

Después de agregar el FeMn, se esperó alrededor de 5 min. para permitir que se homogeneizara el baño metálico. Luego se vacio en la cuchara, cuando se tenia un cierto nivel se agregó el FeSi calculado anteriormente, antes de terminar de vaciar se adicionó el FeV, posteriormente se vacio a las lingoteras. Después se tomó la otra cuchara y se procedió en la misma forma para obtener el acero con titanio. Cuando los lingotes se desmoldearon, se les dió un recocido a una temperatura de 950 C, posteriormente se realizó el análisis químico de cada acero, obteniéndose los sigui-

entes resultados :

Muestra 3 con vanadio

C	Mn	Si	P	S	V
0.033	0.106	0.436	0.021	0.017	0

Muestra 4 con Titanio

C	Mn	Si	P	S	Ti
0.065	0.359	0.707	0.018	0.017	0.044

En base a estos resultados podemos decir lo siguiente:

- a) El contenido de C es muy bajo, esto se debe a que el tiempo de oxidación fué demasiado con respecto a la carga. Otra de las razones es que la cantidad de FeMn no fué suficiente para recarburar el baño metálico, ya que fueron agregados 0.61 Kg., por lo tanto, en 610 gr. de FeMn, con 1.5% de C, se tiene 9.15 gr de C que se agregó en la dosificación, pero lo que realmente se necesitaba era :

$$\text{Peso del C} = \frac{30 \times (0.1 \times 10^{-2})}{0.7} = 42.8 \text{ gr.}$$

Donde 30 = Peso de la chatarra (Kg)

$$0.1 \times 10^{-2} = X \text{ del C a obtener}$$

0.7 = recuperación del carbono en la mezcla.

- b) El contenido de Si es alto, debido a que en el periodo de desoxidación se agregó una cantidad mayor, aparte de la calculada con el fin de calmar el baño metálico.

Considerando que el acero no es apto para seguir nuestros estudios, se decidió hacer una última fundición para tratar de obtener un acero con una composición química semejante a la especificada inicialmente.



La fundición se realizó en forma semejante a la última descrita, corrigiendo algunas fallas:

- La oxidación hizo por espacio de 1.5 min.
- Se utilizó el FeMn de alto carbono ( 75% de Mn, 7% de C ), ya que al final de la oxidación el baño metálico queda con bajo porcentaje de carbono. por lo tanto, el peso de éste para 30 Kg., fué de :

$$\text{Peso de FeMn} = \frac{30(1.3 \times 10^{-2})}{0.75(0.8)} = 0.650 \text{ Kg}$$

Por lo tanto la cantidad de C en el FeMn es de :

$$\text{peso del C} = 0.650 \times 0.07 = 0.0455 \text{ Kg}$$

Esta cantidad es un poco mayor que 0.0428 Kg., calculada anteriormente, pero es adecuada para recarburar.

Una vez listo el horno, lingoteras, cucharas y chata-rra, se procede a la fusión de la misma.

Dentro de las fases para la obtención del acero, solo se mencionaran las más importantes.

- Período de oxidación.

Se llevó a cabo por espacio de 1.5 min., desprendien-dose humos de color rojizo, tampoco se observaron llamas.

- Período de desoxidación.

Se agregaron 50 gr. de FeSi y de FeMn de bajo carbono al baño metálico, para disminuir el contenido de oxígeno.

- Período de dosificación.

Sólo se agregaron 650 gr de FeMn, luego el baño metá-lico empezó a agitarse con mayor intensidad, lanzando gotas de acero líquido fuera del crisol, incrementándose

continuamente, hasta lanzar grandes gotas a gran distancia con lo que se perdió cierta cantidad de material. Esto se debe a que el FeMn era de alto carbono y al estar en contacto con el baño metálico que estaba muy oxidado, se produjo CO, el cual, debido a la agitación, escapa al medio ambiente formando burbujas dentro del baño metálico y haciendo que el acero líquido saltara fuera del crisol. En esta parte hubo un descuido ya que no se colocó la tapa del horno.

- Colada.

Durante la colada se terminó de desoxidar el baño metálico, ya que cuando se estaba vaciando a la cuchara se adicionó el FeSi calculado para 15 Kg., antes de terminar de vaciar se agregó el elemento microaleante, en este caso el FeV.

Para obtener el acero con titanio, se observó que había poco acero en el horno, por lo que se cargaron en el horno 3.5 Kg. más de chatarra y se calculó el FeMn y FeSi para esta cantidad, además del FeSi que se tenía calculado para 15 Kg.

Cuando quedó fundida esta última carga, se vació en la otra cuchara agregando todas las ferroaleaciones, el FeTi se agregó al final, posteriormente se vació en las lingoteras.

Antes de determinar la composición química de estos aceros se les dió un recocido de homogeneización; los resultados obtenidos fueron los siguientes :

**Muestra 5 con vanadio**

C	Mn	Si	P	S	V
0.06	0.66	0.36	0.019	0.021	0.034

**Muestra 6 con titanio**

C	Mn	Si	P	S	Ti
0.04	0.68	0.49	0.015	0.021	0.068

Aunque los porcentajes de C y Mn son bajos, en comparación con los esperados, estos aceros serán utilizados para realizar pruebas posteriores, así como a otra muestra de acero que contiene niobio, la cual fue obtenida en un trabajo experimental desarrollado anteriormente. La composición química de este acero es la siguiente :

**Muestra 7 con niobio**

C	Mn	Si	P	S	Nb
0.10	0.17	0.37	0.014	0.027	0.02

## CAPITULO V

PROPIEDADES MECANICAS DE LOS  
ACEROS MICROALEADOS.

En esta sección se realizaron diferentes ensayos para determinar las propiedades mecánicas de los aceros con niobio, vanadio y titanio. Observando la composición química de cada uno, se puede decir, que se encuentran dentro de un rango aceptable, si se comparan con la especificada inicialmente.

Los ensayos se realizaron de la siguiente forma :

Primero se hizo un análisis metalográfico para determinar el tipo de microestructura, así como el tamaño de grano inicial.

Posteriormente se llevo a cabo el programa de laminación controlada para modificar la microestructura y mejorar así las propiedades de estos aceros.

Después de laminados los aceros, se sometieron a diversas pruebas, como son : dureza, análisis metalográfico, impacto, embutido y tracción.

## V.1 ENSAYOS ANTES DEL PROGRAMA DE LAMINACION

### ANALISIS METALOGRAFICO.

Para el análisis metalográfico, se cortaron muestras de cada uno de los aceros. El desbaste burdo y fino así como el pulido se realizaron en forma convencional, para el ataque químico se utilizó nital al 5%. Luego se observaron al microscopio.

Las fotografías 1, 2 y 3 muestran la microestructura obtenida, en las cuales se aprecia que el tamaño de grano es grande. También se puede observar que existe una base o matriz ferrítica en cada una de las muestras.

El tamaño de grano que se encontró, según la norma - ASTM E112-63, en la cual la imagen de la microestructura proyectada a una amplificación de 100X, se compara con una serie de patrones estándar clasificados que cubren los diversos tamaños de grano. Mediante el método de prueba y - error se encuentra un patrón que coincide con la muestra en estudio y entonces se designa el tamaño de grano de la muestra por el número correspondiente al número índice del patrón coincidente.

El tamaño de grano que se determinó fue el siguiente :

TABLA 5.1

ACERO AL	TAMAÑO DE GRANO
NIOBIO	5
VANADIO	5
TITANIO	4

## DUREZA

La dureza se puede definir como la resistencia a la penetración, esta no es una propiedad fundamental de los materiales, sino que está relacionada con las propiedades elásticas y plásticas. El valor de dureza obtenido en una prueba determinada sirve sólo como comparación entre materiales y tratamientos.

Existen diversos métodos para determinar la dureza de un material, de los cuales se debe seleccionar el más adecuado dependiendo de las características del material.

En nuestro caso se utilizó el ensayo de dureza Rockwell en la escala B ( HRB ), en el cual se utiliza una carga de 100 Kg y una esfera de acero de 1/16 plg. de diámetro.

Los resultados obtenidos se pueden observar en la tabla 5.4.

## V.2 PROGRAMA DE LAMINACION CONTROLADA.

Para lograr las propiedades óptimas de éstos aceros se utilizó un plan de laminación. El equipo en el que se efectuó el plan de laminación tiene las siguientes características:

Laminadora marca Hille-25.

- Tipo: ddo reversible.

- Carga máxima de laminado: 30 ton

- Par máx. de laminado: 0.165 ton-m a 0.508 m/s.
- Par mín. de laminado: 0.055 ton-m a 1.524 m/s.
- Potencia del motor: 18.64 Kw.
- Abertura máx. de los rodillos: 0.04 m.
- Diámetro de los rodillos: 0.1143 m.
- Ancho de la tabla del rodillo: 0.152 m.

La laminadora está equipada con rodillos para trabajar en frío y en caliente.

Debido a las limitantes del equipo, el programa de laminación consistió de bajas reducciones y muchos pasos con recalentamiento, en lugar de grandes reducciones y pocas pasadas. Con esto trataremos de verificar si con muchos pasos de laminación obtenemos tamaños de grano fino.

Las muestras se llevaron hasta una temperatura de 1200 °C durante 30 minutos. El programa de laminación es el que se muestra en la tabla 5.2, el cual consistió de dos etapas, la primera fué laminar cada uno de los lingotes hasta un espesor de 5 mm., estos es para obtener probetas de impacto. La segunda parte se realizó hasta alcanzar un espesor de 1 mm, después de esto se dió dos tipos de enfriamiento a las probetas, unas se enfriaron al aire y otras en agua, con el fin de verificar si tiene alguna influencia la energía residual que tienen las probetas al término del programa de laminación, sobre el tamaño de grano obtenido.

En la tabla 5.3 se indica el número de muestra, el elemento de aleación y el tipo de enfriamiento de los diferentes aceros.

TABLA 5.2 . PROGRAMA DE LAMINACION.

NO. DE PASADA	H <sub>0</sub> mm	H <sub>f</sub> mm	H = H <sub>0</sub> -H <sub>f</sub> mm	H al pulg.	TEMP. °C
1	26	25	1	40	1200
2	25	24	1	40	
3	24	23	1	40	
4	23	22	1	40	
5	22	21	1	40	
6	21	20	1	40	
7	20	19	1	40	
8	19	18	1	40	760
9	18	17	1	40	1100
10	17	16	1	40	
11	16	15	1	40	
12	15	14	1	40	
13	14	13	1	40	
14	13	12	1	40	
15	12	11	1	40	
16	11	10	1	40	760
17	10	9	1	40	1100
18	9	8	1	40	
19	8	7	1	40	
20	7	6	1	40	
21	6	5	1	40	
22	5	4	1	40	760
23	4	3	1	40	1100
24	3	2	1	40	
25	2	1	1	40	



TABLA 5.3 . PROBETAS OBTENIDAS DESPUES PROGRAMA DE LAMINACION.

No. DE MUESTRA	ELEMENTO MICROALEANTE	ENFRIAMIENTO
1	NIOBIO	AIRE
2	NIOBIO	AGUA
3	VANADIO	AIRE
4	VANADIO	AGUA
5	TITANIO	AIRE
6	TITANIO	AGUA

TABLA 5.4 . COMPARACION DE DUREZA ENTRE LAS MUESTRAS ANTES Y DESPUES DEL PROGRAMA DE LAMINACION.

TIPO DE MUESTRA	No. DE MUESTRA	DUREZA HRS
ANTES DE LAMINAR	ACERO CON Nb	67.4
	ACERO CON V	58
	ACERO CON Ti	52
DESPUES DE LAMINAR	1	92.6
	2	90.8
	3	69.3
	4	101
	5	80.1
	6	92.5
COMERCIAL	7	55

### 9.3 PROPIEDADES

#### - DUREZA

El siguiente paso consistió en cortar algunas probetas de las muestras que fueron laminadas, para los diferentes ensayos que se efectuaron.

El primero que se realizó fué, tomar la dureza para cada una de las muestras; los resultados se observan en la tabla 5.4, teniendose también la dureza antes de la laminación. Para cada muestra se realizaron 5 ensayos, pero solo aparece el promedio de estos. Se puede observar que mediante la laminación, la dureza se incrementó en forma considerable esto es de esperarse ya que hay un refinamiento de grano.

#### - ANALISIS METALOGRAFICO

Posteriormente se hizo un estudio metalográfico, para lo cual se cortaron probetas de 1.5 cm. de largo por 1 cm. de ancho ( 1 mm de espesor ), las cuales fueron montadas en resina epóxica para poder manejarlas facilmente.

Una vez que se tuvo la superficie preparada se realizó el ataque químico con nital al 5%. Enseguida se observó la microestructura de cada muestra, como se aprecia en las fotografías.

De este mismo estudio se determinó el tamaño de grano de cada material, cuyos resultados se muestran en la tabla 5.5. En esta podemos comparar el tamaño de grano de cada acero con la muestra 7, la cual es un acero comercial 1008 en forma de lámina.

TABLA 5.5

No. DE MUESTRA	TAMAÑO DE GRANO
1	< 8
2	8
3	< 8
4	< 8
5	7
6	5
7	7

## -IMPACTO

Para este caso se efectuó un ensayo de impacto Charpy. En la fig. 5.1, se muestra la forma y dimensiones de la probeta utilizada, puede verse que es una barra la cual tiene una muesca en forma de 'V' en una de sus caras. Al hacer la prueba, se soporta la probeta en sus dos extremos en forma de una viga simple. Entonces se hace que un péndulo golpee el lado opuesto y directamente detras de la muesca. Debido a que este cae siempre desde una misma altura, contiene una determinada cantidad de energía cuando golpea a la probeta. La fractura de la probeta, quita energía del péndulo la cual se mide sobre la máquina de ensayos por la altura a la cual se eleva el péndulo después de haber roto la probeta. La energía gastada en fracturar la probeta de ensayo de Charpy es la cantidad medida en el ensayo. Si la fractura es com-

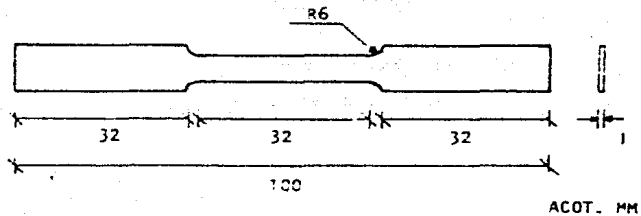


FIGURA 5.1 . DIMENSIONES DE LA PROBETA PARA ENSAYOS DE TRACCION

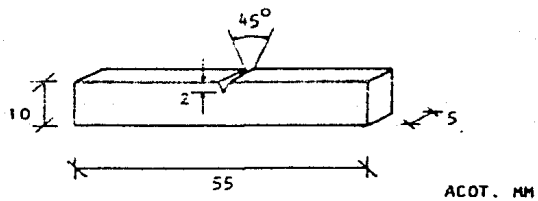


FIGURA 5.2 . DIMENSIONES DE LA PROBETA PARA ENSAYOS DE IMPACTO.

pletamente dúctil, la energía gastada será alta; cuando es frágil por completo, la energía gastada será baja.

Las dimensiones de la probeta no son las especificadas para este tipo de ensayo, ya que el espesor debería ser de 1 cm., sin embargo puede ser útil como un punto de comparación entre los tipos de acero que se han laminado. Los resultados se muestran en la tabla 5.6. de aquí podemos observar que la muestra que tiene una mayor ductilidad es la número 5, mientras que para la muestra 1 es menor. Estos valores los podemos relacionar con el tamaño de grano fino que se obtuvo, así como la dureza de estas muestras, cumpliéndose que a menor tamaño de grano mayor dureza y por consiguiente menor ductilidad.

En base a estos resultados podemos seleccionar a la muestra 5 como la que presenta mayor ductilidad entre estos aceros.

#### -ENBUTIDO.

El ensayo de enbutido consiste en deformar un material con una bola de acero, con un diámetro de 1 pulg., hasta llegar a la ruptura. Sólo se mide la profundidad de penetración, al cual se le llama índice de enbutición, que nos dice si se tiene cierta ductilidad en la pieza. Los resultados se muestran en la tabla 5.7.

En este ensayo la muestra que presentó un mayor índice de embutición fué la muestra 3, lo cual quiere decir que este material se puede deformar más que los otros antes de

TABLA 5.6 . RESULTADOS DE LA  
PRUEBA DE IMPACTO.

NO. DE MUESTRA	ENERGIA ABSORBIDA (Joule)
1	27.7
2	36.7
3	33.2
4	32.7
5	37.2
6	29.7

TABLA 5.7. RESULTADOS DE LA PRUEBA  
DE EMBUTIDO.

NO. DE MUESTRA	INDICE DE EMBUTICION ( mm )
1	7.11
2	4.82
3	8.89
4	5.59
5	4.95
6	5.33
7	11

llegar a la ruptura. La muestra 7 es un acero comercial 1008 el cual sólo se utilizó como referencia de comparación con las seis muestras restantes, en el que se puede observar que su índice de embutición es mayor.

#### -TRACCION.

Para realizar esta prueba se prepara una probeta, como se muestra en la figura 2, basado en la norma E8-ASIn, y se coloca en las cabezas de la máquina de prueba sometiendola a una carga axial por medio de un sistema hidraulico. La fuerza se lee directamente, si se conoce el área transversal original de la muestra puede calcularse el esfuerzo desarrollado a cualquier carga. La deformación o alargamiento se mide en una longitud establecida después de la prueba. La deformación unitaria puede determinarse dividiendo el alargamiento medido entre la longitud original marcada en la probeta.

En el ensayo de tracción los parámetros más importantes a medir son : esfuerzo de fluencia, esfuerzo máximo y deformación.

Los resultados de este ensayo se indican en la tabla 5.8. No siempre se desea que un acero presente máxima dureza y resistencia, ya que a medida que la dureza aumenta la ductilidad disminuye. Una combinación de alta resistencia a la fluencia con una buena ductilidad o con buen porcentaje de deformación es una característica que siempre se busca en los aceros HSLA.

Comparando los resultados podemos decir que la muestra 5 presenta una buena combinación de esfuerzo a la fluencia y deformación, mientras que los demás aunque tienen un mayor esfuerzo de fluencia su deformación es baja.

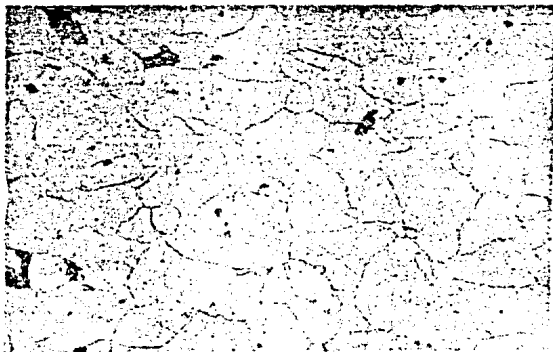


TABLA 5.8 . RESULTADOS DE LA PRUEBA DE TRACCION

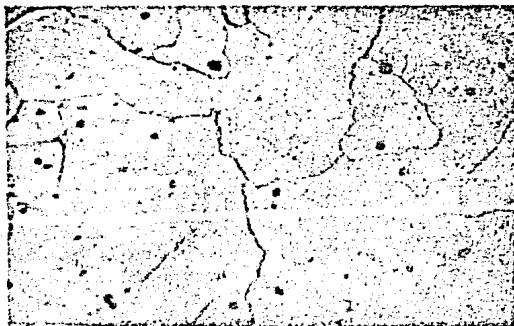
No. DE MUESTRA	ESFUERZO DE FLUENCIA ( MPa )	ESFUERZO MAXIMO ( MPa )	DEFORMACION $\epsilon$ ( % )
1	947.4	947.4	7.63
2	1013.4	1044.2	6.52
3	492.5	591.8	11.24
4	--	1242.4	7.82
5	776.0	853.6	12.13
6	694.6	732.0	7.82
7	372.7	501.7	29.95



Fotografía 1. Acero con Nb, después del recocido de homogeneización. Tamaño de grano 5 a 100X y estructura ferrítica. HRB 67,4, ataque con nital al 5%.



Fotografía 2. Acero con V, después del recocido de homogeneización. Tamaño de grano 5 a 100X, estructura ferrítica. HRB 58, ataque con nital al 5%.



Fotografía 3. Acero con Ti, después del recocido de homogeneización. Tamaño de grano 4 a 100X, matriz ferrítica. HRB 57, ataque con nital al 5%.



Fotografía 4. Acero con Nb enfriado al aire. Tamaño de grano menor que 8 a 100X, HRB 92.6, ataque con nital al 5%.



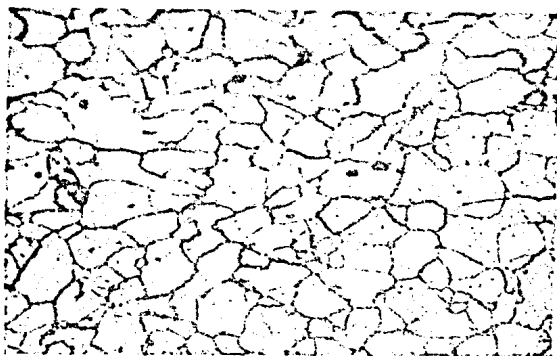
Fotografía 5. Acero con Nb enfriado en agua. Tamaño de grano 8 a 100X, HRB 90.8, ataque con nital al 5%.



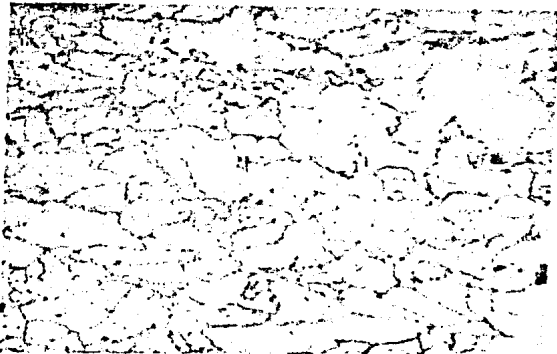
Fotografía 6. Acero con V enfriado al aire. Tamaño de grano menor que 8 a 100X, HRB 69.34, ataque con nital al 5%. Zonas de crecimiento de grano por efecto del recalentamiento.



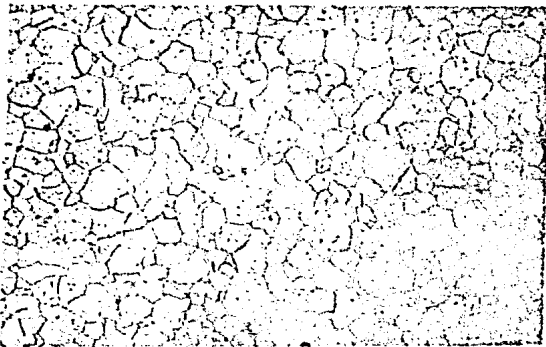
Fotografía 7. Acero con V enfriado en agua. Tamaño de grano menor que 8 a 100X, HRB 101, ataque con nital al 5%. Zonas de crecimiento de grano por efecto del recalentamiento.



Fotografía 8. Acero con Ti enfriado al aire. Tamaño de grano 7 a 100X, HRB 80.1 ataque con nital al 5%.



Fotografía 9. Acero con Ti enfriado en agua. Tamaño de grano 5 a 100X, HRB 92.5, ataque con nital al 5%.



Fotografía 10. Acero comercial 1008. Tamaño de grano 7 a 100X, HRB 55, ataque con nital al 5%.

## C O N C L U S I O N E S .

- a) Después de la cuarta fundición, se logró obtener el acero con una composición química aceptable, superando así fallas que se tuvieron porque no se tomaron en cuenta algunos factores. Algo que es importante mencionar es la falta de equipo para el análisis de cualquier tipo de acero, ya que no se cuenta con aparatos para determinar la composición química cuando se tiene el acero aún en estado líquido, ya que de esta forma se podrían agregar las ferroaleaciones correspondientes para hacer los ajustes necesarios.
- bb) Durante el proceso de laminación controlada, se comprobó que influyó el recalentamiento en algunas de las piezas. En las fotografías 6 y 7 se muestra el efecto de zonas de crecimiento de grano debido al recalentamiento.
- c) El gran número de pasadas que se le dió a cada muestra resultó con un tamaño de grano fino, influenciado también por los elementos microaleantes.
- d) De la prueba de tracción la muestra 5 presenta resistencia a la fluencia y resistencia máxima adecuadas, así como un buen índice de deformación. Este acero contiene titanio y fué enfriado al aire.

- e) En las fotografías se aprecia que la microestructura presenta una gran cantidad de inclusiones, las cuales afectan los resultados obtenidos, estos se pueden mejorar al disminuir la presencia de las mismas. Para trabajos posteriores recomendamos tener cuidado durante el periodo de desoxidación y en el vaciado.
- f) Debido a los grandes yacimientos de niobio que se han encontrado en Brasil y algunos otros países, los aceros microaleados con este elemento son los que más se producen, en México este elemento no se ha encontrado, por lo que la producción de estos resulta costosa. De los resultados obtenidos podemos decir que el acero con titanio presentó una mejor combinación de propiedades, aunque se requiere una mayor cantidad del aleante. Debido a esto se deben realizar más investigaciones sobre este tipo de acero a fin de aprovechar sus propiedades mecánicas, produciendo-los con elementos que se puedan encontrar en México.



## A P E N D I C E

## PRODUCCION A NIVEL NACIONAL.

Parte de este trabajo consistió en investigar la producción de aceros microaleados en México; para esto se recabó información de diferentes empresas, tales como SICARTSA, Siderúrgica Nacional ( SIENA ), Altos Hornos de México - ( AHMSA ), Fundidora de Aceros Tepeyac S.A. ( FATSA ), Tubos de Acero de México S.A. ( TAMSA ) y algunas otras. De esta investigación se encontró que sólo TAMSA y AHMSA producen este tipo de aceros.

TAMSA produce tubos sin costura, utilizando como microaleantes niobio o vanadio, o combinación de ambos dependiendo de la aplicación. Dentro de la línea de producción de TAMSA se encuentran los tubos de acero con vanadio que son utilizados en PEMEX para la conducción de fluidos a gran presión; por otro lado, los tubos de acero con niobio se emplean en la perforación de yacimientos.

La producción de TAMSA en 1986 fue la siguiente :

PRODUCCION (TON)	ELEMENTO MICROALEANTE	DIAMETRO DE TUBERIA (PULG.)
17,200	VANADIO	4 1/2 - 10 3/4
6,000	NIOBIO	4 - 6

Por otra parte, AHMSA produce varilla corrugada para la construcción, con la siguiente composición química :

C	Mn	Si	P	S	Nb
0.35/0.40	1.35/1.50	0.15/0.25	0.05 max	0.05 max	0.01

De lo anterior se observa que por el porcentaje de niobio se puede considerar como acero microaleado, pero no así en el sentido riguroso, debido a que el acero que producen contiene más carbono ( 0.35/0.4 ) en comparación con los aceros microaleados, los cuales tienen un máximo de 0.2% de carbono.

La producción de varilla corrugada en AHMSA durante 1986, fué la siguiente :

PRODUCCION (TON)	ELEMENTO MICROALEANTE	DIAMETRO DE VARILLA (PULG.)
21,211	NIOBIO	5/16
41,731	NIOBIO	3/8

AHMSA empezó su producción de acero microaleado con Nb desde 1970.

Cabe mencionar que estas dos empresas importan tanto el niobio como el vanadio.

Las demás empresas antes mencionadas no producen aceros microaleados pero si utilizan niobio o vanadio en cantidades mayores al 0.08%, el cual lo destinan en la fabricación de aceros especiales o para herramienta.

Algunos problemas que presentan ciertas empresas se refieren al cuidado que se debe tener al producir estos aceros, porque es difícil controlar el porcentaje de los elementos microaleantes.

Otro inconveniente es que debido a la baja demanda de estos aceros, no es rentable la producción si se cuenta con hornos de gran capacidad, como es el caso de SICARTSA, donde cuentan con instalaciones para 200 ton, y si se produjera en estas condiciones el precio se elevaría mucho. Por otra parte, viendo este problema, sería fácil decir que la producción de aceros microaleados se realice en pequeñas o medianas fundidoras, pero se tiene el problema de que no se cuenta con el equipo adecuado, ya que se debe tener un acero muy limpio, controlar los porcentajes de cada elemento y evitar las inclusiones, requiriéndose también de un equipo moderno de laminación para mejorar las características mecánicas del acero.

Además se debe tener un programa de laminación adecuado, controlando temperaturas de inicio y finalización, reducciones, velocidad de deformación, tamaño de grano inicial lo cual redundaría en la imperiosa necesidad de un equipo de laminación en el que se puedan controlar estos parámetros.

Es difícil que la producción existente de aceros microaleados se incremente, ya que ésta depende de la utilización y del conocimiento que se tenga de este tipo de acero en cuanto a sus características, ya que son sustituidos por

aceros de medio carbono o aleados, de los cuales ya se tienen una serie de especificaciones y son ampliamente conocidos, lo que representa una desventaja para los aceros microaleados.

Es por esto que se tiene la necesidad de difundir las características de los aceros microaleados y una manera de hacerlo es continuar con las investigaciones sobre estos aceros. Esperemos que este trabajo no sea el último y que se efectuen nuevos experimentos, porque así se tendrá una buena cantidad de información respecto a la producción y experimentación que se ha hecho en México y su utilización se incrementa. Este incremento sería el resultado de un cambio de ideas de utilizar aceros de bajo carbono y pequeñas cantidades de elementos aleantes, dando como resultado una mejora en sus propiedades mecánicas y menor costo respecto a los otros.

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

- 1.- Richard A. Flinn, Paul K. Trojan.  
Materiales de Ingeniería y sus Aplicaciones.  
Ed. Mc Graw-Hill.  
1979.
- 2.- Avner Sidney.  
Introducción a la Metalurgia Física.  
Ed. Mc Graw-Hill  
1981.
- 3.- Dieter E. George.  
Mechanical Metallurgy.  
Ed. Mc Graw-Hill.  
1970.
- 4.- Olvera Jiménez Radl.  
Puesta en Marcha del Horno de Inducción de la  
Facultad de Ingeniería.  
1979.
- 5.- Robert E. Reed-Hill  
Principios de Metalurgia Física.  
Ed. CECSA  
1979

- 6.- Ortiz Prado Armando.  
Fabricacion de Aceros con Alto Contenido de  
Manganeso.  
Tesis, Fac. de Ingenieria.  
1980.
- 7.- Barrera Godínez José Antonio  
Hernández Morales José Bernardo.  
El Niobio y el Vanadio en la Industria Metalúrgica  
Mexicana.  
Tesis, Fac. de Químico.  
1983.
- 8.- Producción de Ferroaleaciones, México y Chile.  
Ilafa, No. 313  
1983
- 9.- Estructura de la Industria y Mercado de Ferroaleaciones  
en América Latina.  
Ilafa, No. 302  
1985.
- 10.- Ferroaleaciones de México.  
Ilafa, No. 321  
1987.
- 11.- Alfonso Pryor-Varela  
Posibilidades del Vanadio en la Siderurgia de AL.  
Ilafa, No. 299  
1985.

- 12.- Izao Kozasu, Chiaki Ouchi, Tetsuya Sampei and  
Tomoyashi Okita.  
Hot Rolling as a High-Temperature Thermo-Mechanical  
Process.  
Nippon Kokan K.K., Kawasaki, Japan  
1975.
- 13.- Calzada Guerrero Martín, Nava Ruiz J. Antonio,  
Romero Carrea J. Carlos.  
Fabricación de Aceros Microaleados.  
Tesis, Fac de Ingeniería.  
1986.
- 14.- A. J. Deardo.  
Hot Deformation of Microalloyed Steels, presented at  
Instituto Mexicano del Hierro y del Acero, México.  
1979.
- 15.- Comisión de Fomento Minero.  
Perfil del Mercado de Titanio.  
1986.
- 16.- Larry D. Cunningham.  
Columbium a Chapter Mineral Facts and Problems.  
Bureau of Mines.  
Preprint From Bulletin 675.  
1985.
- 17.- Jorge Koleff Pérez, Raúl Pérez Galindo.  
Aceros Microaleados.  
Tesis, Fac. de Ingeniería.  
1980.

## 18.- Olga Arce León

Titania, Recopilación y Análisis de Estudios de los  
Yacimientos Mexicanos y de los Procesos de  
Aprovechamiento.

Tesis, Química.

1979.

## 19.- Robert D. Stout.

Weldability of Microalloyed Steels.

Dean of the Graduate School Lehigh University;  
Bethlehem, Pennsylvania, USA.

## 20.- Colás Ortiz Rafaél.

Aceros Microaleados.

Conferencia.

1985.

## 21.- V.G. Voskoboinikov.

Metallúrgia General.

Ed. Mir, Moscú.

1982.

## 22.- Myron L. Begeman.

Procesos de Manufactura, Versión SI.

Ed. CECSA

1984.