

19 201



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE ACEROS AL CARBONO Y MICROALEADOS DURANTE PRUEBAS DE DOBLEZ

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO QUIMICO METALURGICO  
P R E S E N T A :  
RAUL LIMA BALDERAS

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

MEXICO, D. F.

1990



## **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.

## INDICE

INTRODUCCION.....	2
CAPITULO I.....	6
- MATERIALES Y METODOS.....	7
I.I FABRICACION DE ACEROS POR ALTO HORNO Y CONVERTIDOR BASICO AL OXIGENO.....	7
- MATERIAS PRIMAS.....	7
- ALTO HORNO.....	8
- PROCESO DE ACERACION.....	9
- METALURGIA EN LA OLLA.....	12
I.II FABRICACION DE ACEROS POR REDUCCION DIRECTA Y HORNO DE ARCO ELECTRICO.....	13
- REDUCCION DIRECTA.....	13
- PROCESO HyL-II.....	14
- HORNO DE ARCO ELECTRICO.....	15
- METALURGIA EN LA OLLA.....	17
I.III PROCESOS COMUNES.....	17
- PROCESO DE COLADA CONTINUA.....	17
-LAMINACION EN CALIENTE.....	19
I.IV ANALISIS QUIMICO.....	20
- COMBUSTION A ALTA TEMPERATURA.....	20
- ESPECTROMETRIA DE ENERGIA DISPERSIVA DE RAYOS X.....	21

I.V METALOGRAFIA.....	23
- PREPARACION METALOGRAFICA.....	23
- MICROSCOPIO OPTICO.....	24
- MICROSCOPIO ELECTRONICO DE BARRIDO.....	25
I.VI FRACTOGRAFIA.....	26
I.VII PRUEBA DE DOBLEZ.....	26
I.VIII ENSAYO DE ENVEJECIMIENTO.....	27
CAPITULO II.....	32
- RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS.....	33
II.I ANALISIS QUIMICO.....	34
II.II PRUEBA DE DOBLEZ.....	34
II.III METALOGRAFIA.....	36
II.IV FRACTOGRAFIA.....	39
II.V ENVEJECIMIENTO.....	40
CONCLUSIONES.....	44
APENDICE DE FIGURAS.....	47
APENDICE DE MICROGRAFIAS.....	61
REFERENCIAS.....	76

## INTRODUCCION

## INTRODUCCION

La industria del acero en México ha tenido modificaciones de acuerdo a las necesidades del país, tal es el caso de los aceros con los que se fabrican barras de refuerzo para construcción [15-21]. Antes de los años sesenta las barras de refuerzo se fabricaban de acero grado estructural con un límite elástico mínimo de 28 Kgf/mm<sup>2</sup>. Posteriormente hubo un cambio hacia el acero llamado de alta resistencia con un límite elástico de 42 Kgf/mm<sup>2</sup> [21]. Este incremento del 50% en el límite elástico representó una ventaja económica obvia, debido a que no se afectó significativamente el costo de producción [25-27], y se logró un ahorro significativo del material. Para satisfacer la especificación de alta resistencia, los fabricantes cambiaron sus rutinas de producción. La mayoría de los fabricantes modificaron la aleación y emplearon acero con alrededor de 1.2% en peso de manganeso, 0.5% de silicio y de 0.4 a 0.5% de carbono. De hecho en las normas existentes desde antes de 1985, como la B-6, el fósforo es el único elemento limitado, con un máximo de 0.05% que es sumamente holgado. Bajo la norma B-6, de grado 42 Kgf/mm<sup>2</sup>, se fabrican ahora la mayoría de las barras de refuerzo que se consumen en México [28]. Los principales procesos de producción de las plantas integradas mexicanas son el alto horno en combinación con el convertidor básico al oxígeno o la reducción

directa y el horno de arco eléctrico [4]. Muchas acerías tienen máquinas de colada continua donde se producen las palanquillas, que posteriormente se laminan en caliente para transformarse en barras de refuerzo.

El doblado del acero es muy importante debido a que se practica en las obras al ensamblar el refuerzo de las estructuras. Todas las normas mexicanas de aceros de refuerzo tienen una sección donde se establecen las condiciones bajo las cuales el acero debe ser doblado sin romperse. En general se especifica el radio de curvatura en la prueba de dobléz a  $18^{\circ}$ . Sin embargo, no se dice nada de las propiedades mecánicas que debería tener el acero posteriores al proceso de doblado.

Algunas especificaciones como la B-4449 de Inglaterra incluyen pruebas de dobléz muy estrictas con el objeto de asegurar la calidad mecánica de un acero doblado despues de un periodo de envejecimiento, es decir, simulando la condición del acero doblado despues de una o dos decadas de instalado. Las varillas se doblan con un mandril a un angulo de  $45^{\circ}$ . Luego son envejecidas aceleradamente por inmersión en agua hirviente durante media hora. Posteriormente se intenta enderezarlas. Si una barra no se fractura quiere decir que esta barra tendrá propiedades mecánicas aceptables aún despues de ser doblada. Puede ocurrir que la varilla se haya fragilizado y se fracture, en cuyo caso no pasa la prueba.

Es muy probable que el carbono y el azufre influyan en la

capacidad de doblar de los aceros, debido a que durante el doblar la estructura del acero se somete a severas deformaciones y los componentes del acero que son ferrita y perlita tienen muy distintas ductilidades. Mientras que los granos de ferrita tienen una ductilidad muy alta y podrán sufrir grandes deformaciones antes de fracturarse, los granos de perlita se desgarrarán y se agrietarán por la presencia de la cementita que se encuentra como fase en la perlita. Un alto contenido de azufre provocará que se formen sulfuros precipitados en la matriz del acero que pueden influir en la propiedades mecánicas endureciendo el material.

Durante la refinación del acero este es agitado por medio de un jet de nitrógeno, una parte de este nitrógeno se disuelve en el acero aumentando la posibilidad de sufrir un proceso de envejecimiento en la ferrita.

Debido al proceso de envejecimiento sufrido en la ferrita el acero puede presentar manifestaciones frágiles [4,5] y con la combinación de este con el agrietamiento interno sufrido en la perlita, producido por el doblar, se podrá ocasionar la falla del acero en la prueba de desdoblamiento.

En el presente trabajo se reporta la investigación sobre el efecto del carbono y el azufre en el comportamiento del acero en la prueba de desdoblamiento.

## CAPITULO I

## CAPITULO I

### M A T E R I A L E S   Y   M E T O D O S

En este estudio se consideran barras de refuerzo fabricadas con aceros obtenidos a partir de dos distintos procesos. Por un lado se consideran aceros microaleados producidos con un proceso de alto horno, convertidor básico al oxígeno y metalurgia en la olla. Por otro se consideran de medio carbono por reducción directa y horno de arco eléctrico. A continuación se describen estos dos procesos.

#### I.1 FABRICACION DE ACEROS POR ALTO HORNO-CONVERTIDOR BASICO AL OXIGENO

##### MATERIAS PRIMAS

El mineral de hierro que se usa en los altos hornos, es extraído de las minas y se lleva a ellas ya sea por ferrocarril, por barco o por ferroaductos. Por cada tonelada de arrabio producido en un alto horno, se consumen de 1500 - 1700 Kg [1,5,13]. de mineral de hierro.

El coque es otra de las materias primas esenciales en la producción de arrabio. Las plantas integradas cuentan con una

coquizadora donde el mineral de carbon se transforma en coque mediante un proceso de desgasificación a alta temperatura.

El coque se obtiene de la destilación seca del carbon de piedra a temperaturas entre 1000 y 1100°C [5,13]. El coque de buena calidad tiene un color gris claro un tanto plateado, es bastante poroso y tiene grietas en la superficie. El contenido aproximado es de 85 a 87% de carbono, de 1.5 a 2% de azufre, de 5 a 9% de humedad y de 10 a 13% de ceniza y su resistencia a la compresión alcanza los 140 Kg/cm<sup>2</sup> [5].

Otras materias primas necesarias para la elaboración del arrabio son la caliza y la dolomita las cuales son de origen mineral que se incorporan en el alto horno con el objeto de recolectar la ganga del mineral y las cenizas del coque y producir escorias fácilmente fusibles. Además si los minerales contienen arenas y arcillas, la dolomita se encarga de formar escorias acidas con estos compuestos. En la elaboración de una tonelada de arrabio se consumen 300 Kg de caliza y dolomita, aproximadamente [5].

#### ALTO HORNO

En el alto horno los minerales de hierro, el coque, la caliza y la dolomita se transforman en arrabio y escoria.

De acuerdo con la figura 1 [6], por la boca de carga o "tragante" se introduce al horno el mineral de hierro, el coque y la caliza; estos materiales empiezan a reaccionar entre si y con los gases presentes. La temperatura se va elevando por el calor

desprendido en las reacciones exotérmicas a medida que la carga desciende por el cuerpo del horno llamado "cuba". En la mitad superior de horno, el gas del coque que se quema remueve una gran cantidad del oxígeno del mineral de hierro. En la zona correspondiente a la mitad inferior, la caliza empieza a reaccionar con las impurezas del mineral y del coque, formandose la escoria, que absorbe las cenizas del coque. Parte de la sílice del mineral se reduce a silicio, el que se disuelve en el hierro, lo mismo sucede con una parte del carbón que tiene el coque. En la parte inferior del horno, llamada "crisol", donde la temperatura se eleva hasta los 1,650°C [5,6,13], la escoria fundida flota en un baño de arrabio líquido, cuya profundidad es de 1.20 a 1.50 m [5,6,13]. Dado que la escoria flota sobre el hierro fundido, es posible extraerla a travez de la piqueta de escoria del horno. El arrabio líquido se sangra desde el crisol del horno por el orificio de colada llamado "piqueta". La sangría del arrabio y de la escoria son los factores de continuidad que permite seguir cargando material por el tragante del horno.

#### PROCESO DE ACERACION

La transformación del arrabio en acero se realiza en un convertidor básico al oxígeno (conocido como BOF por sus iniciales en inglés). El horno o convertidor básico al oxígeno es un recipiente metálico revestido con materiales refractarios básicos; el cuerpo del horno es cilíndrico, con el fondo

ligeramente abombado y la parte superior tiene forma de un cono truncado, con la parte basal descansando sobre el cilindro y una abertura en la parte angosta, como se muestra en la figura 2 [5]. Por esta abertura se cargan las materias primas, se introduce el chorro de oxígeno y se expelen los gases de desecho del proceso. Todo el horno está soportado sobre muñones con cojinetes sobre un eje horizontal, de modo que puede girar. El arrabio líquido es la materia prima principal y puede recibir hasta 20% de chatarra. La cal ( $\text{CaO}$ ), más que la caliza ( $\text{CaCO}_3$ ), es el compuesto que se usa como fundente. El calor para el proceso es proporcionado por los procesos de combustión que se activan con el soplado de oxígeno. El primer paso para producir acero en un convertidor básico al oxígeno consiste en inclinar el horno para cargarlo con chatarra. Se gira el horno sobre sus muñones, siguiendo un arco de tal modo que su abertura pueda ser alcanzada por un equipo cargador que corre sobre rieles. La caja del equipo cargador se llena con chatarra de acero y se coloca en posición en que pueda vaciar su contenido dentro del horno, lo que se logra por acción de pistones y brazos articulados que voltean la caja sobre la boca del horno, deslizándose en el horno precalentado. El horno con un movimiento rotatorio distribuye la chatarra en el fondo. En seguida se actúa un puente grúa que trae una olla con arrabio líquido, que representa una proporción de 65 a 80% de la carga del horno, y ésta se vacía también en la boca del horno inclinado. En seguida se coloca al convertidor en posición vertical y se inicia

insuflado de oxígeno, mediante una lanza enfriada por agua que se coloca a poca distancia de la superficie del metal. En un tiempo muy corto la ignición del metal en contacto con el chorro de oxígeno produce un aumento considerable en la temperatura, con lo que se obtienen las condiciones adecuadas para agregar cal a la carga. A partir de este momento no se interrumpe el proceso de soplado; el oxígeno se combina con el carbono y otros elementos no deseables, eliminando estas impurezas de la carga fundida, para convertirla en acero. La cal ayuda a eliminar impurezas mediante una capa flotante de escoria sobre el metal, que, en ese momento, se encuentra totalmente fundido. En este proceso el consumo de cal es del orden de 70 Kg por tonelada de acero producido.

Cuando el acero ha terminado su transformación se corta el flujo de oxígeno, se sueltan las abrazaderas de la lanza y ésta se retira hacia la campana de los gases. El horno se rota entonces hacia atrás en dirección del piso de carga, hasta que la escoria que flota en la parte superior del metal está a nivel con el borde de la zona superior del horno. Entonces se determina la temperatura del baño metálico, la que debe ser de unos 1,650°C para los tipos más comunes de aceros y se determina la composición química. En estas condiciones el horno se rota, apartándolo de la plataforma de carga y pasada la posición vertical hacia el lado opuesto, se apunta el agujero de colada, situado en la zona cónica, a una cuchara que recibe el acero

fundido. La escoria que flota sobre el metal, es forzada a permanecer por sobre el agujero de colada por el volteo progresivo del horno.

#### METALURGIA EN LA OLLA

En este proceso se hace el ajuste final de la composición química del acero. Los elementos de aleación que se requieren se agregan en la cuchara con acero proporcionándole una agitación adecuada por medio de un chorro de nitrógeno o de argón.

La cuchara en que se recibe el acero líquido del horno está usualmente montada en un carro de ferrocarril, que se lleva a donde puede retirarse la cuchara mediante un puente-grúa. El mismo la toma y la lleva, con el metal líquido hasta una máquina de colada continua para su solidificación. Entretanto la escoria fundida que permaneció en el horno se vacía en un recipiente, que luego se retira para eliminarla.

## I.II FABRICACION DE ACEROS POR REDUCCION DIRECTA-HORNO DE ARCO ELECTRICO

### REDUCCION DIRECTA

Este es un proceso empleado en la reducción de los minerales de hierro, que aunque su explotación industrial es reciente, sus principios han sido conocidos desde los albores de la industria del hierro. La definición del proceso ha sido intentada basándose en las características de los equipos empleados o en el aspecto del producto obtenido. Aquí se define la reducción directa como "un proceso en el cual, el mineral de hierro se transforma en un material metalizado llamado hierro esponja". La diferencia fundamental con el proceso clásico de reducción para obtener arrabio líquido estiba en que el material obtenido nunca pasa al estado líquido porque todas las reacciones suceden en el estado sólido.

El principio del proceso se basa en la captura del oxígeno presente en los óxidos de hierro por elementos reductores, fundamentalmente el monóxido de carbono y el hidrógeno procedentes del gas natural reformado.

### Reacciones de reducción

Las reacciones más conocidas de reducción directa son las siguientes:



Como se dijo anteriormente, el producto de la reducción directa se llama "hierro esponja", nombre que se debe a su aspecto poroso, originado por la pérdida del volumen de oxígeno del óxido de hierro.

### PROCESO HyL-II

Este proceso nació en México y fue desarrollado y explotado por la empresa Hojalata y Lámina, S.A. (HYLSA). Es sin duda el mayor aporte tecnológico latinoamericano al desarrollo de la industria siderúrgica.

En su versión II, el proceso se efectúa en un reactor de cuba intermitente de lecho fijo instalado en serie con otros 3 reactores, uno de reducción secundaria, otro de enfriamiento y otro de descarga. Emplea como reductor una mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno, procedentes de la reformación termocatalítica del gas natural combinado con vapor de agua. El mineral oxidado de hierro es cargado en forma de pélet. El producto obtenido es el hierro esponja, con un grado de

metalización oscilante entre 82 y 95%. En la Tabla 1 se sintetiza la tecnología de este proceso [5].

**TABLA 1**

<b>REACTOR</b>	Cuba intermitente de lecho fijo
<b>MINERAL DE HIERRO</b>	Pélets
<b>TIPO DE REDUCTOR</b>	Gas natural, derivados de petróleo, nafta, etc., reformados.
<b>COMPOSICION APROXIMADA DEL GAS REFORMADO</b>	H <sub>2</sub> =75%, CO=16%, CO <sub>2</sub> =8% y CH <sub>4</sub> =3%
<b>GRADO DE METALIZACION</b>	82-95%
<b>REDUCTOR</b>	380 m <sup>3</sup> N/ton
<b>ENERGIA ELECTRICA</b>	0-20kWh/ton
<b>CONSUMO DE AGUA</b>	1.8 m <sup>3</sup> /ton

La figura 3 muestra la distribución y etapa en la que se encuentra cada uno de los reactores del proceso HyL-II [5].

#### HORNO DE ARCO ELECTRICO

El proceso de horno de arco eléctrico sirve para producir aceros aleados, aceros inoxidables, aceros para herramientas y otros aceros especiales. Además sirve para fabricar aceros al carbono en gran escala.

Un horno de arco eléctrico es un recipiente de acero de fondo poco profundo, revestido con ladrillo refractario como se muestra

en la figura 4 [7]. En la primera mitad de este siglo, la mayor parte de los hornos de arco eléctrico se cargaban con chatarra de hierro y de acero a través de una puerta situada a un costado del cilindro; actualmente el techo de estos hornos está montado en vigas de acero en voladizo, de tal modo que pueda ser levantado y desplazado hacia un lado. Entonces el horno puede cargarse mediante baldes y otros recipientes transportados por grúa-puente. El techo está perforado de tal forma que penetran en el horno tres electrodos de grafito, pudiendo bajarse o subirse a voluntad. Cuando está en operación se forma un arco eléctrico entre los electrodos a través de la carga generándose un calor intenso. En el lado opuesto de la puerta se encuentra el canal de colada, a través del cual se extrae el acero hacia la cuchara. El horno completo está montado sobre balancines de modo que pueda inclinarse para su operación. La carga de un horno de arco eléctrico es completamente sólida, está constituida principalmente por chatarra de acero, la que es cuidadosamente seleccionada para evitar la presencia de elementos no deseados, cuando se prepara un acero de aleación especial. También se carga arrabio en lingotes y hierro esponja, que puede contener hasta 98% de Fe, y que se maneja como fuente metálica primaria [1,5].

## METALURGIA EN LA OLLA

La metalurgia en la olla después de la aceración en el horno de arco eléctrico es similar a la que sigue al BOF, es decir, se ajusta la composición adicionando ferroaleaciones y se agita también con nitrógeno o argón.

### **I.III PROCESOS COMUNES**

Para los dos procesos de fabricación de acero mencionados anteriormente es común el empleo de una máquina de colada continua para producir palanquillas y un tren de laminación en caliente que transforma las palanquillas en barras de refuerzo.

### PROCESO DE COLADA CONTINUA

Hay varias clases de máquinas de colada continua, pero el principio básico que les permite operar es el mismo para todas ellas y se esquematiza en la figura 5 [5]. El acero líquido es transportado en la olla hasta la parte superior de la máquina de colada continua. Para hacer caer el acero, se levanta el tapón del fondo de la olla, y el líquido fluye hacia un distribuidor revestido de material refractario. El traspaso del acero líquido desde la olla hasta el distribuidor es una de las operaciones más importantes del proceso de colada continua, puesto que el distribuidor actúa como un regulador del flujo de metal líquido con el cual se alimentan los moldes. El distribuidor permite,

también, que se reemplace la olla vacía por otra llena con acero líquido y no se interrumpa la alimentación de metal líquido a los moldes de la máquina. Desde el distribuidor el acero pasa con un flujo controlado a la sección del molde de la máquina, El molde está refrigerado con agua, de modo que el acero se enfría rápidamente al hacer contacto y se forma una capa sólida en la parte exterior del metal. Esta capa o pared va engrosando a medida que la columna de acero va descendiendo a través del sistema de enfriamiento. Tal como en el caso de lingotes, el acero se enfría desde el exterior hacia el interior y está completamente solidificada al salir por el extremo final de la máquina en posición horizontal. Posteriormente se cortan tramos de palanquilla con las dimensiones deseadas. El corte se hace empleando sopletes de oxígeno montados en un marco que se mueve a la misma velocidad que la columna de acero y que luego vuelve a su posición original cuando termina el corte.

La velocidad de producción de los equipos de colada continua puede alcanzar hasta unos 4.5 m/min para algunos tipos de palanquilla [1,5,6,13].

### LAMINACION EN CALIENTE

Este es un proceso mediante el cual las palanquillas son laminadas por medio de rodillos de matriz circular. La sección cuadrada de la palanquilla, se transforma en circular de un diámetro considerablemente menor y en los últimos pasos las barras se corrugan. El proceso se inicia recalentando el material a una temperatura al rededor de 1150°C para que se aumente la ductilidad y se reduzca la resistencia a la deformación plástica. Una vez en los trenes de laminación se procede a reducir sucesivamente el área transversal por medio de rodillos. Generalmente para conformar cualquier producto laminado este debe pasar a travez de cuando menos dos trenes de laminación, el primer tren se llama tren de laminación desbastador, mediante el cual la reducción se hace de forma severa. La segunda etapa es llamada tren de laminación de acabado en el cual se les da la forma y especificaciones al producto terminado, en este caso barras de refuerzo.

#### I.IV ANALISIS QUIMICO

La fabricación de aceros requiere de un servicio de análisis químico preciso y expedito, por lo cual se utilizan los métodos que se describen a continuación.

##### COMBUSTION A ALTA TEMPERATURA

La combustión a alta temperatura es usada principalmente para determinar los contenidos de carbono y azufre en una gran variedad de materiales. El contenido total de carbono y azufre tienen que ser debidamente monitoreados, es decir, se debe controlar perfectamente su salida hacia el sistema de detección para poder tener así un análisis cuantitativo confiable. Estos elementos son extraídos por inyección de oxígeno, el cual causa que el exceso de carbono y azufre puedan separarse como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) en forma de gas. De esta forma se usan para determinar el contenido total de carbono y azufre. La muestra ya pesada y los catalizadores requeridos son colocados en un crisol cerámico, el cual se introduce en un horno de alta temperatura, que puede ser de inducción de alta frecuencia o de resistencia. Los sistemas de detección usados son la conductividad térmica o la absorción de infrarrojos. Las muestras pueden ser de 1 g o menos, dependiendo del tipo de material, el cual puede estar en forma de sólido, rebaba o polvo [8]. Al cortar las muestras a los tamaños requeridos para la determinación, se debe cuidar que por ninguna fuente sean

contaminados con carbono o azufre. El tiempo estimado para el análisis es de 2-3 min para la preparación y de 40s-2min para el análisis [6].

#### ESPECTROMETRIA DE ENERGIA DISPERSIVA DE RAYOS X

Esta técnica es usada en las microsondas para detectar el tipo de elementos que se encuentran en las fases de la microestructura de una muestra. Para lo cual el uso de un goniometro en los espectrometros de energia dispersiva de rayos X es basada en la necesidad de resolucion de los componentes emitidos por rayos X de varios elementos en la muestra. El uso de mecanismos de dispersion es comun para muchos tipos de espectrometros que cumplen esta tarea, es necesario tener instrumentos sin componentes mecanicos que alcancen un poder de resolucion adecuado. El desarrollo de detectores de Litio-Silicio y de sus aplicaciones en la deteccion de rayos X en la decada de los 60's se dirigió hacia el campo del análisis espectroscópico de energia dispersiva de rayos X (EDX). Inicialmente estos instrumentos eran toscos e inflexibles. Para su buen funcionamiento con un sistema de computo, si se dispone de una pequeña microcomputadora poco costosa se puede cubrir la necesidad de adquisicion de datos y análisis por EDX, a este respecto se han desarrollado gran cantidad de "software" para el análisis de datos y se siguen desarrollando nuevos detectores electronicos. La espectrometria de energia dispersiva de rayos X es posiblemente la herramienta más

usada para el análisis cualitativo de elementos dentro de una muestra. La técnica permite identificar cualitativamente elementos con número atómico de 11 o mayor dentro de la tabla periódica. La base primaria de la detección de elementos en una muestra es la energía y la intensidad relativa de las bandas espectrales K, L o M. Muchas veces los elementos pueden ser identificados por el simple uso de las "marcas KLM" desplegadas en la pantalla. Se requiere de una calibración precisa de la energía en el espectrómetro y la intensidad relativa de las líneas deberán estar bien calibradas con las desplegadas por las marcas, esto es porque se puede dar el caso de que coincida una línea Ka de un elemento de número atómico Z con la línea Kb de otro elemento de Z-1 para una energía de 3-9 KeV. Debido a que de 1 a 5 KeV, las líneas espectrales L y M de elementos de número atómico alto coinciden con las líneas K de los elementos de número atómico bajo [8]. El sistema de datos indica el símbolo del elemento al que le corresponde la línea espectral K, L o M mostrándolo en la pantalla.

#### I.V METALOGRAFIA

Las técnicas metalográficas son necesarias para la identificación de la microestructura presente en las aleaciones.

##### PREPARACION METALOGRAFICA

La primera etapa para la realización de una metalografía consiste en desbastar la superficie de la muestra de manera secuencial con papeles abrasivos de diferente rugosidad, utilizando agua como lubricante para evitar el daño superficial. Generalmente se emplean lijas de carburo de silicio de calibres 80, 120, 240, 360, 400, 500 y 600 donde la numeración indica el número de partículas de abrasivo que hay por pulgada cuadrada. Durante esta etapa de preparación se hace un lavado de la muestra cada vez que se cambia de lija, para evitar arrastrar partículas del abrasivo de la lija anterior. La última etapa del desbaste termina con la lija 600 y luego se procede a la siguiente etapa de la preparación de las muestras que consiste en el pulido. En este caso se emplean abrasivos de alúmina de tres distintos tamaños (1,0.3 y 0.05  $\mu\text{m}$ ) y como lubricante se emplea agua destilada. En esta etapa es necesario lavar perfectamente la muestra después de cambiar de alúmina para evitar que se rayen las probetas. Una vez concluido lo anterior la muestra se debe llevar al microscopio óptico para hacer un reconocimiento, mediante el cual se puede determinar si la superficie tiene la calidad suficiente para el análisis microestructural. Además las

muestras se analizan en este estado para determinar la cantidad y tipo de inclusiones (impurezas).

El proceso de preparación termina con el ataque químico efectuado a cada una de las muestras, este depende del tipo de acero del que esté fabricada cada pieza y del instrumento de análisis a utilizar.

Generalmente la caracterización metalográfica se realiza en un microscopio óptico y/o en un microscopio electrónico de barrido.

#### MICROSCOPIO OPTICO

El tipo de microscopio utilizado para la observación de muestras metalograficas es muy parecido al utilizado para la observación de muestras biológicas, con la diferencia de que el sistema de iluminación es directamente sobre la muestra debido a que éstas son opacas, es decir, no permiten el paso de luz atravez de ellas, por lo tanto es necesario que la luz se refleje directamente de la muestra hacia el sistema de detección, lo cual se logra haciendo incidir un haz de luz desde el interior del microscopio como se ilustra en la figura 6 [9]. Un poco de esta luz reflejada desde la superficie de la muestra se amplificará al pasar a través del sistema inferior de lentes, el objetivo, y continuara hacia arriba a través del reflector de vidrio plano; luego, una vez más lo amplificará el sistema superior de lentes, el ocular.

## MICROSCOPIO ELECTRONICO DE BARRIDO

El microscopio electrónico de barrido (MEB) funciona de una forma muy similar a la televisión comercial. Se hace que un haz de diámetro pequeño de electrones haga un barrido sobre una región cuadrada de la superficie de la muestra. Al mismo tiempo, se traza un patrón de rastreo en sincronía sobre un tubo de rayos catódicos (TRC). Los electrones de baja energía son expulsados desde la superficie de la muestra por el haz de electrones, siendo la intensidad una función del ángulo entre el haz y la superficie local de la muestra. La intensidad del haz sobre el TRC se varía electrónicamente en proporción al número de electrones de baja energía lanzados desde la muestra. Esto provoca la formación de una imagen topográfica de la superficie sobre el TRC conforme se traza el patrón de rastreo; esta imagen puede ser vista y fotografiada. El poder de resolución del MEB se determina por medio del tamaño del haz de electrones sobre la superficie del espécimen y por el voltaje. La distancia resoluble mínima es casi igual al tamaño del haz en la superficie. Por lo cual se desea que el haz presente el tamaño más pequeño posible. El cañón de electrones actúa como una lente electrostática, formando una imagen del filamento de casi  $60 \mu\text{m}$  de diámetro [10]. Esta imagen actúa como el objeto de la primera lente condensadora, y las tres lentes en el MEB tienen la función de reducir el tamaño de haz. También es función de la tercera lente,  $L_3$ , enfocar el haz sobre la superficie del espécimen, y en este

punto, el diámetro de haz ha sido disminuido a tamaños tan pequeños como 10 nm. (100 Å<sup>o</sup>) La figura 7 [10], muestra un esquema de funcionamiento del MEB.

#### I.VI FRACTOGRAFIA

Se encarga del estudio de las fracturas, tanto de su aspecto como de las causas que las originan. Una fractura es la separación de un cuerpo sujeto a esfuerzos, en dos o más partes. Las fracturas se clasifican en frágiles y dúctiles. La fractura frágil generalmente comprende la rápida propagación de una grieta, con el mínimo de absorción de energía y de deformación plástica. En los materiales policristalinos, la fractura frágil muestra una apariencia granular debido a los cambios de orientación de planos de clivaje de un grano a otro, mientras que la fractura dúctil ocurre después de una considerable deformación plástica previa a la falla, la cual se presenta en la mayoría de los materiales policristalinos en forma de copa y cono.

#### I.VII PRUEBA DE DOBLEZ

El doblado del acero es muy importante porque se practica en las obras al ensamblar el refuerzo de las estructuras. La norma B-4449 de Inglaterra incluye la prueba de desdoblez para asegurar la calidad mecánica de un acero doblado después de un proceso de envejecimiento, es decir, simulando la condición del acero doblado una o dos decenas de años después de instalado. La prueba

de desdoblez consiste en lo siguiente: Una barra de acero de refuerzo recta se dobla hasta un ángulo de  $45^{\circ}$  con un mandril de una curvatura de 3 veces el diámetro de la barra, (la figura 8 muestra un esquema de la disposición de una máquina para efectuar pruebas de doblez). La zona doblada se sumerge en agua hirviendo durante media hora para simular el envejecimiento del acero de una década o más. Luego se trata de enderezar (desdoblar) en una máquina apropiada. Si no se rompe la barra pasa la prueba.

#### 1.VIII ENSAYO DE ENVEJECIMIENTO

El proceso de envejecimiento se debe a la precipitación de partículas submicroscópicas a partir de una solución sólida sobresaturada con alta densidad de dislocaciones, que generalmente son de borde. Las dislocaciones de borde pueden visualizarse muy fácilmente como un medio plano extra de átomos en una retícula. Esto se muestra en dos dimensiones en la figura 9a y en tres dimensiones en la figura 9b [10]. A la dislocación se le llama defecto lineal debido a que la localización de los puntos defectuosos producidos en la retícula por la dislocación se halla a lo largo de una línea. Esta línea corre a lo largo de la parte baja del medio plano extra mostrado en la figura 9b. Si se aplica un esfuerzo cortante a un cristal que contiene una dislocación, como se muestra en la figura 9a, el medio plano extra de átomos es empujado hacia la derecha hasta que por último emerge sobre la superficie formando el principio de una línea de

deslizamiento. La precipitación está controlada, principalmente por la temperatura y el tiempo. Se dice que un proceso de envejecimiento es natural cuando la precipitación tiene lugar a temperatura ambiente, de modo que se obtiene la resistencia total después de 4 o 5 días de estar a temperatura ambiente, en tanto que aquellas aleaciones que requieren de un calentamiento para alcanzar su máxima resistencia se conocen como aleaciones de envejecimiento artificial, sin embargo, estas aleaciones también envejecen en forma limitada a temperatura ambiente.

La resistencia de un metal se controla por la generación y movilidad de dislocaciones. El incremento de resistencia de una aleación endurecida por envejecimiento se debe a la interacción de la fase precipitada dispersa con las dislocaciones. Por consiguiente, la precipitación de una fase coherente ofrece el mecanismo de refuerzo quizá más versátil de que pueda disponerse. Para comprender la naturaleza de este mecanismo de refuerzo se debe examinar la interacción de las dislocaciones con una segunda fase dispersa.

La interacción de las dislocaciones deslizantes con las partículas dispersas incrementará el esfuerzo cortante crítico resuelto por una cantidad que se denominará  $\sigma$ . Las teorías intentan determinar  $\sigma$  como una función de los parámetros que caracterizan la interacción dislocación-partícula. Se pueden dividir las interacciones dislocación-partícula en tres grupos, dependiendo de la manera por medio de la cual las dislocaciones

penetran las partículas dispersas. Las dislocaciones pueden 1) enlazar partículas, 2) cortar las partículas o 3) deslizarse transversalmente al rededor de las partículas [10].

#### 1) ENLAZAMIENTO DE PARTICULAS

La idea básica del enlazamiento de partículas puede comprenderse haciendo referencia a la figura 10 [10]. Esta figura muestra cómo se arqueará una dislocación cuando se frena con los puntos en donde encuentra partículas de precipitado. A medida que se incrementa el esfuerzo cortante aplicado, la dislocación se dobla tanto que empieza a encontrarse en puntos tales como A y B en el tiempo  $t_2$  de la figura 10. Nótese que el sentido de la dislocación en el punto A será opuesto al que tiene en el punto B. En consecuencia, al encontrarse estos segmentos de dislocación se aniquilarán, haciendo que la dislocación principal se separe de la región enlazada, como se muestra en el tiempo  $t_3$  de la figura 10. Cada vez que una dislocación pasa por una partícula de precipitado por este mecanismo de enlazamiento, deja una lazo alrededor de cada precipitado tal como se muestra en  $t_4$  de la figura 10. A este mecanismo se le conoce como mecanismo de Orowan. El esfuerzo cortante que debe aplicarse para forzar la dislocación a pasar las partículas puede escribirse como

$$\sigma = \frac{T}{b R_{\min}} \quad [10]$$

en donde  $R_{\min}$  es el radio mínimo promedio de curvatura que poseerá la dislocación al pasar através de las diferente

configuraciones mostradas en la figura 10.

T es la tensión lineal de la dislocación.

b es el vector de Burgers de la dislocación.

## 2)CORTE DE PARTICULAS

Es posible que la dislocación se pudiera deslizar a través de la partícula de precipitado. Esto provocaría que la partícula cediera a través del plano de deslizamiento por un vector b, como se muestra en la figura 11 [10]. Por lo tanto, en cierto sentido, la partícula es cortada por la dislocación.

Los ensayos de envejecimiento se realizaron empleando probetas cilíndricas de 12.7mm de diámetro y 15mm de longitud. Las probetas fueron deformadas por compresiones del 10% y del 50% en una máquina para ensayos mecánico INSTRON modelo 4206, antes y después de la compresión se tomaron medidas de dureza en las escalas Rockwell-B y Rockwell-C con un durometro LECO RT-120A. El siguiente paso fue introducir las probetas en agua hirviendo durante treinta minutos tal como especifica la norma B-4449 de Inglaterra, una vez que las muestras han permanecido el tiempo especificado en agua hirviendo se retiran, se enfrían en agua a temperatura ambiente y se mide la dureza final de las probetas. La escala Rockwell-B sirve para ensayar materiales con mediana dureza como son aceros de medio carbono en condiciones de recocido. El rango de trabajo en esta escala es de 0 a 100. El indentador usado es una bola de acero de 1/16 de pulgada con una

carga de 100 Kg [11].

La escala Rockwell-C es comunmente usada para materiales que tiene una dureza por encima de 100 en la escala Rockwell-B. Esta escala tiene un rango de trabajo de 20 a 70. Utiliza un penetrador cónico de diamante de aproximadamente 0.22mm de diámetro en la base.

Las siguientes expresiones muestran la forma en que se definen los números de las escalas Rockwell B y C [11].

$$\text{Número Rockwell-B} = 130 - \frac{\text{profundidad de penetración (mm)}}{0.002}$$

$$\text{Número Rockwell-C} = 100 - \frac{\text{profundidad de penetración (mm)}}{0.002}$$

## CAPITULO II

## CAPITULO II

### RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

Las barras que se estudiaron en el presente trabajo fueron escogidas de un gran número de barras fabricadas con acero HSLA sometidas a la prueba de desdoble así como otras que sólo fueron sometidas a una prueba de doblez fabricadas de acero al carbono. Al realizar las pruebas de desdoble necesarias para un buen control de calidad hay barras que sufren fractura y otras barras que no, de todas ellas se tomaron dos que sufrieron fractura y dos que resultaron sanas despues de la prueba de desdoble con el objeto de realizarles un estudio para determinar cuales son las variables del proceso que ocasionan que algunas varillas se fracturen y otras no. A continuación se describen los resultados obtenidos en dicho estudio.

## II.1 ANALISIS QUIMICO

La tabla 2 muestra los análisis químicos de los aceros que conforman las varillas 1,2,3,4, 5 y 6.

TABLA 2

VARILLA	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Nb	%Al	%Cb
1	0.524	1.38	0.19	0.002	0.030	0.011	0.004	0.045
2	0.470	1.32	0.21	0.014	0.027	0.032	0.004	0.046
3	0.32	1.41	0.36	0.010	0.012	0.046	0.003	0.046
4	0.31	1.61	0.34	0.022	0.010	0.046	0.003	0.044
5	0.51	1.34	0.25	----	0.030	----	----	----
6	0.51	1.34	0.25	----	0.030	----	----	----

## II.II PRUEBAS DE DOBLEZ

Las pruebas de desdoblez para las varillas 1,2,3 y 4 se realizaron con un mandril que tiene un diámetro de 3 veces el diámetro de la barra y por otro lado el dobléz hecho a las varillas 5 y 6 fue practicado en la forma que se practica en las obras al ensamblar las varillas . La tabla 3 muestra los resultados de estas pruebas.

TABLA 3

VARILLA	RESULTADOS EN LA PRUEBA DE DESDOBLEZ
1	FRACTURADA EN EL DESDOBLEZ
2	SANA DESPUES DEL DESDOBLEZ
3	SANA DESPUES DEL DESDOBLEZ
4	FRACTURADA EN EL DESDOBLEZ
5	SOLO PRUEBA DE DOBLEZ
6*	PRUEBA DE DOBLEZ EN "U"

\* A ésta varilla no se le practicó la prueba de desdoblez, sino se le practicó una prueba de doblez en "U", para verificar la severidad del doblez sobre esta varilla.

Además de las pruebas de desdoblez realizadas a las varillas 1 y 2 se les realizó la misma prueba variando el diámetro de la varilla mediante un torno de 35mm. a 6.5mm. obteniéndose como resultado que las varillas reducidas a este diámetro no sufren falla en el desdoblez. Antes de realizar estas pruebas a las varillas de diámetro reducido se encontró que las fracturas ocurrían con mayor frecuencia en varillas de diámetro relativamente grande (35mm.), por lo que se decidió realizar estas pruebas reduciendo el diámetro para verificar la influencia de este sobre la incidencia de la fractura, obteniéndose que en diámetros pequeños es poco probable que ocurra fractura y que en diámetros de mayores dimensiones es más probable de encontrarla

aún cuando se trate de varillas del mismo material. Otro parámetro importante en el índice de falla de las varillas en la prueba de desdoble es el grado de envejecimiento sufrido por la varilla, más adelante se describirán los resultados obtenidos en los ensayos de envejecimiento efectuados a las muestras de varilla de acero HSLA.

### II.III METALOGRAFIA

Las metalografías hechas a las probetas de las varillas fueron las que mayor información arrojaron, se comenzará por describir las mediciones de tamaño de grano de cada muestra. Estas mediciones se realizaron por el método de intersección lineal, el cual consiste en trazar una línea sobre una fotografía de aumentos conocidos, contabilizar las intersecciones con los límites de grano y dividir la longitud de la línea trazada entre el número de intersecciones encontradas, para varias líneas trazadas en la misma fotografía, así el promedio será el tamaño de grano que tenga la muestra. La tabla 4 muestra el tamaño de grano encontrado para cada muestra. El tamaño de grano en el caso de los aceros microaleados es un parámetro muy importante por tomar en cuenta debido a que la resistencia mecánica del acero depende en gran parte del grado de refinación de la perlita, no así en los aceros al carbono, en los cuales depende del tipo de tratamiento térmico que se les aporte, las micrografías 1, 2, 3,

4, 5 y 6 muestran la perlita en las diferentes muestras de varilla.

Además de las mediciones de tamaño de grano se tomaron medidas del espaciamiento interláminar en la perlita, con el objeto de predecir la influencia de éste en el índice de fractura sufrida durante la prueba de doblez, encontrándose que el espaciamiento interláminar en la perlita es un parametro muy importante a ser tomado en cuenta dado a que si éste es muy pequeño la perlita tendrá mayor fragilidad pudiendo así sufrir agrietamiento y propagar la fractura, mientras que si la perlita presenta un espaciamiento interláminar grande, esta tendrá bandas de ferrita más gruesas, las cuales podrán amortiguar la deformación dándole mayor tenacidad.

En cuanto al agrietamiento de la perlita se observó en el microscopio electrónico de barrido que esta tiende a formar microgrietas o desgarramientos, tal como se ilustra en las microfotografías 7 y 8, estas microgrietas se presentan con el simple hecho de doblar las varillas y son un centro de nucleación de grietas que posteriormente se convierten en fracturas con el desdoble y se agravan con el fenómeno de envejecimiento.

TABLA 4

VARILLA	TAMAÑO DE GRANO EN MICRAS
1	11.16 $\pm$ 2.56
2	21.79 $\pm$ 2.89
3	13.26 $\pm$ 2.62
4	12.98 $\pm$ 1.86
5	28.99 $\pm$ 8.96
6	32.48 $\pm$ 7.29

La observación al microscopio de las diversas varillas permitió verificar que las muestras de acero microaleado, se encontraban con una gran cantidad de partículas precipitadas, a las cuales se les realizó microanálisis en una microsonda auxiliados por un sistema de detección de energía dispersiva de rayos X para verificar su origen así como su composición. Estas partículas se muestran en las micrografías 9, 10 y 11 adjuntas a los patrones de EDX encontrados para cada una, generalmente este tipo de partículas se presentan en las cuatro muestras de acero microaleado en diferentes proporciones, siendo estas mayores en las muestras 1 y 2, aún cuando en las varillas 3 y 4 se presentan en menor cantidad.

Para la varilla 6 se muestra la micrografía 12, en la cual se observa que en la parte que sufre deformaciones compresivas con el doblez es aquella en la cual se comenzará la fractura, esto quiere decir que la cantidad de doblez es crítica, en cuanto a que después de una cierta deformación se nuclea una fractura transgranular, sin embargo, no se producen grietas en la perlita para este acero y en particular en los aceros al carbono, los cuales no sufren agrietamiento en la perlita por efecto del doblez.

#### II.IV FRACTOGRAFIA

La inspección de las varillas que sufrieron fractura se realizó directamente sobre la misma, por medio de microscopio electrónico de barrido Joel JMS-200 y sobre un corte perpendicular a la superficie de fractura. La micrografía 13 muestra la superficie de la fractura tomada en el modo de electrones retrodispersados, determinándose que la fractura es del tipo frágil transgranular con planos de clivaje y se observan partículas de precipitado ocluidas en la superficie de fractura. La observación de la fractura en el corte perpendicular se muestra en la micrografía 14 en la cual aparece la fractura que se propaga en forma transgranular, es decir, a lo largo de los granos. Este tipo de fractura nos indica que la misma se comienza a propagar desde el interior de alguno de los granos, ya sea uno de perlita o uno de ferrita envejecida. Cuando el acero de las barras contiene

alrededor de 0.4% de carbono y 0.022% de azufre, la varilla presenta un índice de falla de aproximadamente el 30% de la producción total, sin embargo, al disminuir el contenido de carbono a menos de 0.33% y de azufre a menos de 0.012%, se logró disminuir el índice de falla a 2% de la producción, lo cual está dentro de un nivel aceptable de índice de falla.

#### II.V ENVEJECIMIENTO

Las pruebas de envejecimiento se realizaron de la forma descrita anteriormente a las varillas de acero microaleado y la varilla 5 con 10% de deformación, los resultados se muestran en la tabla 5.

TABLA 5

VARILLA	DUREZA ROCWELL-B		
	LLEGADA	DEFORMACION 10%	ENVEJECIMIENTO
1	92.92	95.16	99.04
2	93.14	99.02	99.62
3	93.50	97.00	98.5
4	93.02	95.32	98.92
5	98.12	98.32	97.33

El grado de envejecimiento por efecto de la temperatura en las varillas 1 y 4 es más notorio que las varillas 2 y 3, mientras

que en la varilla 5 no se presenta envejecimiento, sino que se observa un cierto reblandecimiento que se puede deber a que en este tipo de aceros (aceros al carbono) no exista una fase sobresaturada de soluto que cumpla con las condiciones necesarias para que se presente el fenómeno de envejecimiento, mientras que en las varillas de acero microaleado si existe una fase sobresaturada de nitrógeno, que precipita en forma de nitruros o carbonitruros que impiden el movimiento libre de las dislocaciones endureciendo y aportando mayor resistencia al material.

Cuando esta prueba se realiza en barras con un 50% de deformación previa las durezas reportadas entran en un rango poco confiable para la escala de dureza Rockwell-B que tiene como valor máximo confiable de 100 y corresponde a un valor de 22.8 en la escala de dureza Rockwell-C la cual tiene como valor mínimo confiable de 20. Por esta razón es necesario cambiar de escala de dureza para no perder confiabilidad, aunque esto representa graves problemas debido a que se están acumulando errores sistematicos diferentes en la medición.

La grafica de la figura 12 muestra los datos de correlación de las escalas de dureza Rockwell-B y Rockwell-C, la zona que se encuentra entre las líneas paralelas es la zona de validez para las dos escalas, es decir, en esta zona comienza a tener validez la escala Rockwell-C en un valor de 20 que corresponde a una dureza de aproximadamente 97 en la escala de Rockwell-B, la cual

deja de tener validez en el valor de 100, que corresponde a un valor de aproximadamente 24 en la escala de dureza Rockwell-C. Para esta grafica se utilizaron datos de correlación reportados en la literatura [12], los datos no reportan una linea recta bien definida que es lo que se esperaria, por esta razón se optó por ajustarlos por mínimos cuadrados y así tener la recta a la que tienden.

La tabla 6 muestra las medidas de dureza encontradas en dos varillas de acero microaleado antes de la deformacion, despues de esta y posteriores al envejecimiento.

TABLA 6

VARILLA	HRB			HRC		
	LL	DEF	ENV	LL	DEF	ENV
3	94.12	101.3	97.92	14.68	19.9	23.8
4	92.38	95.82	98.96	9.18	14.7	22.16

NOTA. En esta tabla LL significa que se trata de una varilla de llegada, es decir que se le tomó lectura de dureza tal como se cortaron las muestras, las letras DEF significan que a estas muestras se les tomó dureza despues de deformadas y las letras ENV significan que a estas muestras se les tomó dureza despues de envejecidas.

Los datos de la tabla 6 se encuentran graficados en la figura 13 en la cual se puede observar que los puntos marcados con cruces corresponden a las medidas de dureza obtenidos para la varilla 3 y los círculos para la varilla 4. En los puntos marcados con

cruces se nota claramente que las medidas de dureza correspondientes a la cruz situada en la parte superior de las líneas horizontales muestra un comportamiento poco lógico con respecto a la cruz situada al lado derecho de la líneas verticales debido a que presenta un endurecimiento en la escala Rockwell-C y una disminución de la dureza en la escala Rockwell-B, siendo que lo lógico sería que presentara un aumento de dureza en ambas escalas, esto se debe principalmente a que para valores más altos de 100 en la escala Rockwell-B la escala no es confiable y por lo tanto reporta un error, sin embargo, las medidas de dureza en la escala Rockwell-C para ambas se encuentra dentro de rango de validez.

En los puntos marcados con círculos se observa una tendencia dentro de lo lógico, es decir, hay un incremento en dureza en ambas escalas.

No obstante a todo lo anterior sólo una pareja de medidas de dureza entran dentro del rango de validez y corresponde a las medidas de dureza de la varilla 4 con envejecimiento, por esta razón es conveniente cambiar de técnica de medición para poder así tener menos error en las mediciones y poder cuantificar confiablemente el grado de envejecimiento sufrido por el acero en la prueba de desdoble.

## CONCLUSIONES

## CONCLUSIONES

Hicimos una revisión de los procesos de fabricación que se emplean para la elaboración de la mayoría de las barras de refuerzo del país. Se analizaron algunos de los procedimientos de prueba de las barras de refuerzo en el plano internacional entre las que destaca la prueba de desdoblez.

Durante el doblado la estructura interna del acero se somete a severas deformaciones y las ductilidades de los componentes ferrita y perlita son muy distintas. Mientras que los granos de ferrita tienen una ductilidad alta, los granos de perlita suelen desgarrarse y agrietarse. Lo anterior aunado a la precipitación de nitruros y/o carbonitruros de niobio en las dislocaciones del interior de la ferrita durante el proceso de envejecimiento, traen como consecuencia la fractura transgranular del acero.

En aceros microaleados con contenidos de carbono de 0.4% o superior y con un nivel de azufre alrededor de 0.022%, se observó una frecuencia de falla del 30% en la prueba de desdoblez. Reduciendo el contenido de carbono a menos de 0.33% y el azufre a un máximo de 0.012%, se logra reducir la frecuencia de falla a menos del 2%, principalmente debido a que hay un aumento notorio en el campo de la ferrita, que es capaz de absorber la mayor parte de la deformación plástica aportada al material durante la prueba de desdoblez.

El tipo de fractura que se presenta en estos aceros en la prueba

de desdoble es transgranular frágil, que se debe en cierta forma al envejecimiento de la ferrita, así como, al aumento gradual de la dureza ocurrido por efecto de la deformación.

La disminución del contenido de azufre es notoria en la microestructura, la cual presenta un aspecto limpio, es decir, con una cantidad mínima de sulfuros de manganeso precipitados durante la solidificación.

Al practicar una prueba de desdoble sobre una varilla existen zonas que llegan a tener alrededor de 50% de deformación y es necesario realizar pruebas de envejecimiento con estas cantidades de deformación en las probetas, sin embargo, los valores de dureza de las probetas con esta cantidad de deformación y envejecidas se salen del rango válido para la escala de dureza Rockwell-B y se tendría que cambiar a la escala Rockwell-C lo cual trae como consecuencia la acumulación de errores sistemáticos en las medidas de dureza y por lo tanto una disminución en la confiabilidad de los experimentos. Por esta razón es necesario utilizar una técnica de medición que nos asegure que los valores de dureza que se obtengan estarán dentro de su escala, una técnica de este tipo es la dureza Brinell o la microdureza Vickers.

## APENDICE DE FIGURAS

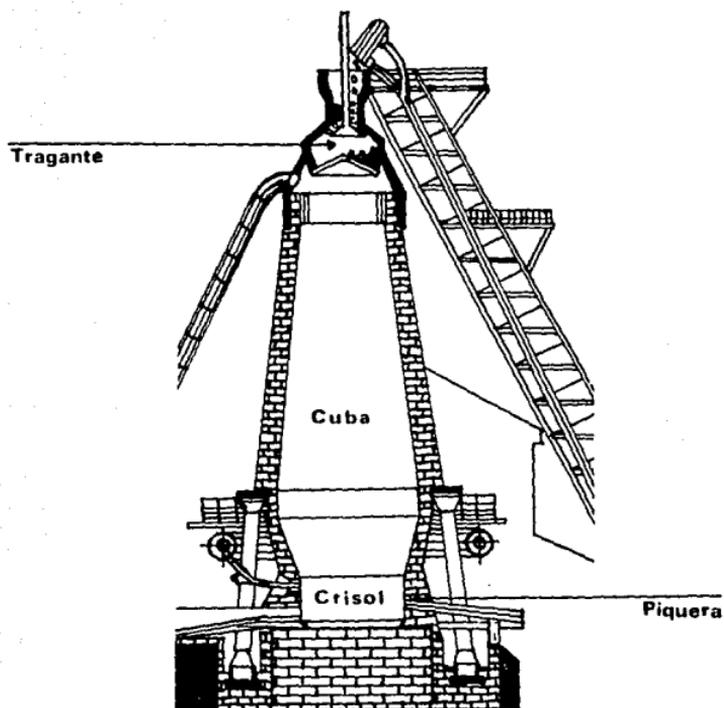


FIGURA 1

La figura muestra la disposición de un alto horno con sus partes [6].

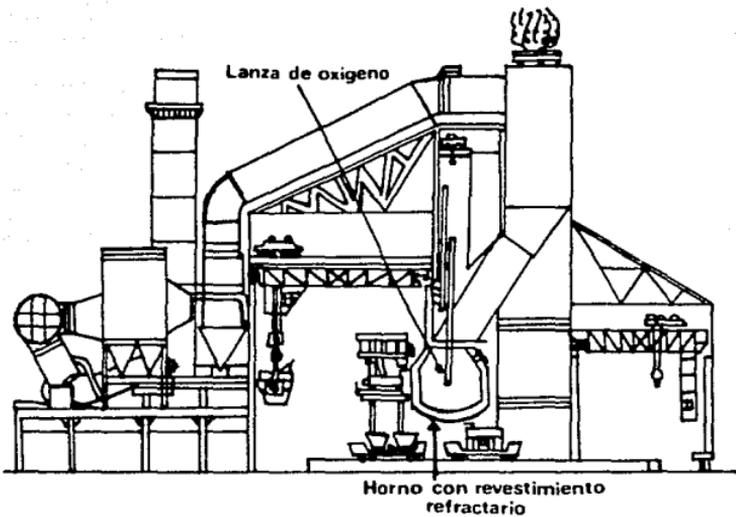


FIGURA 2

Disposición de una planta de aceración por el proceso BOF [5].

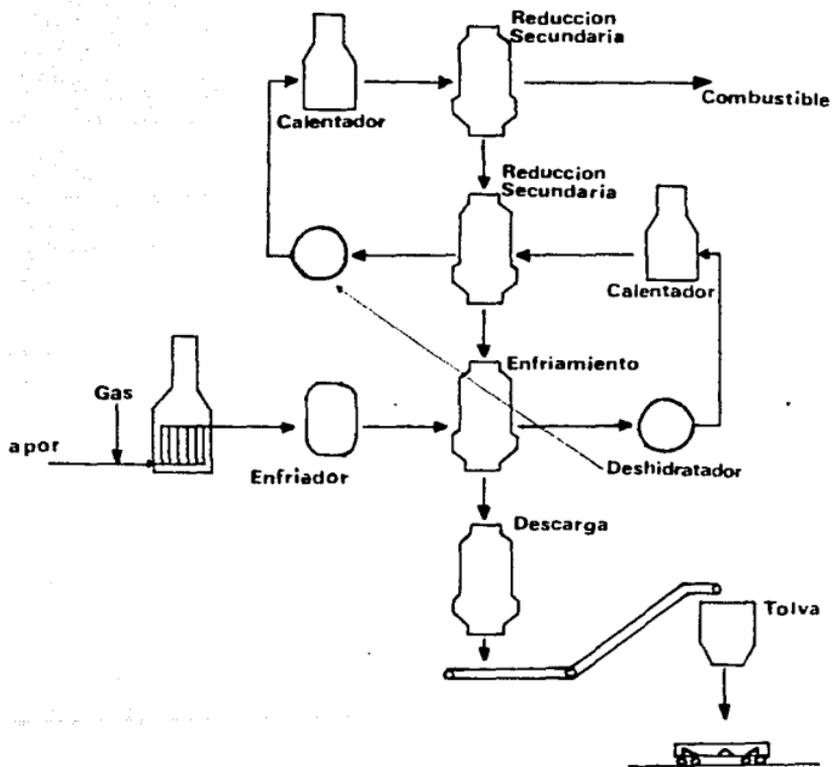


FIGURA 3

Esquema de la distribución y etapas en las que se encuentra cada uno de los reactores del proceso HyL-II [5].

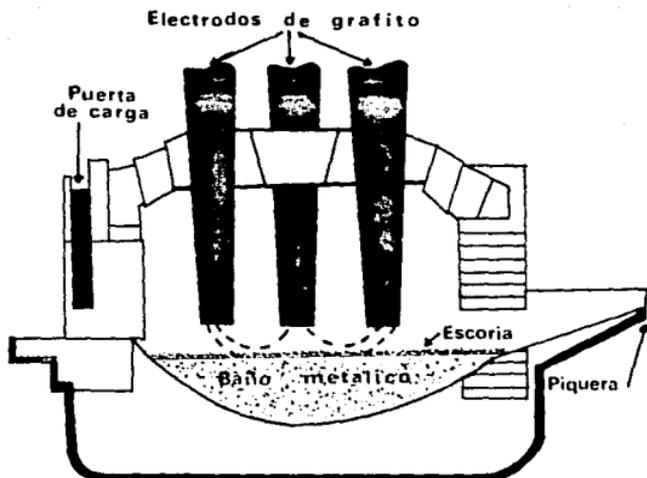


FIGURA 4

Esquema de las partes que conforman un horno de arco eléctrico [7].

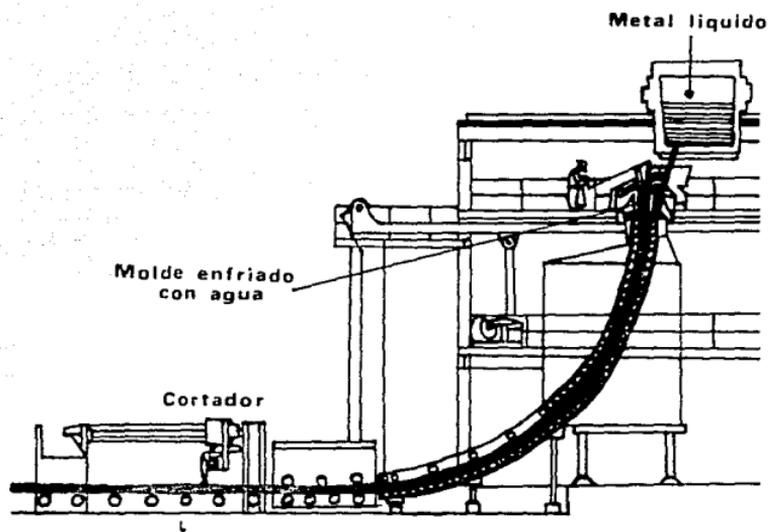


FIGURA 5

Esquema de una máquina de colada continua [5].

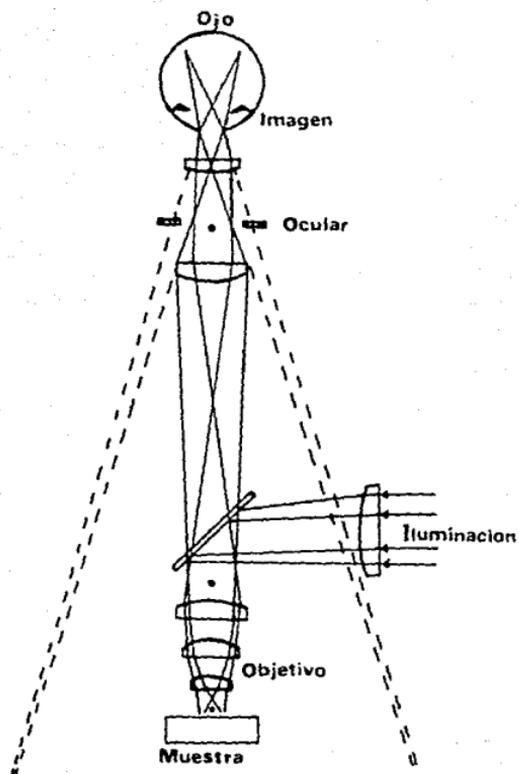


FIGURA 6

Esquema del funcionamiento de un microscopio optico [9].

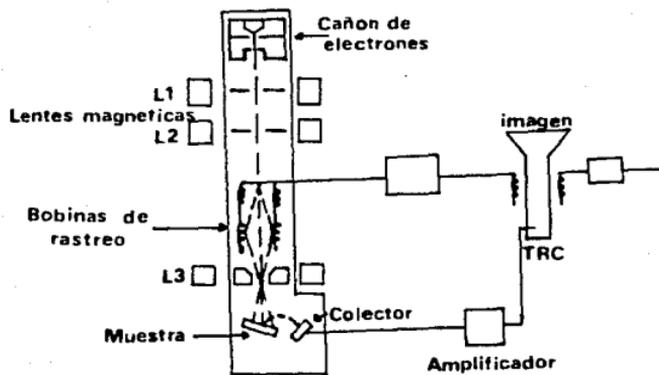


FIGURA 7

Esquema del funcionamiento de un microscopio electronico de barrido [10].

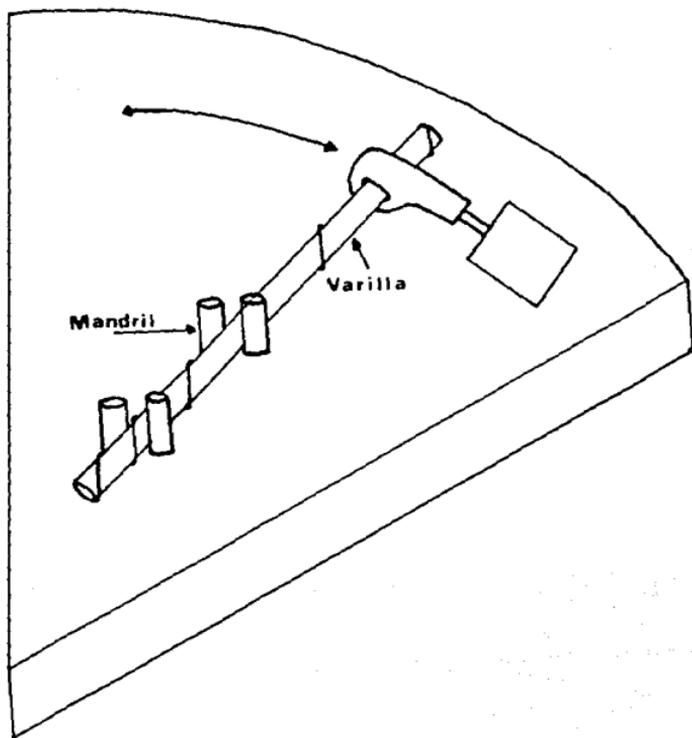
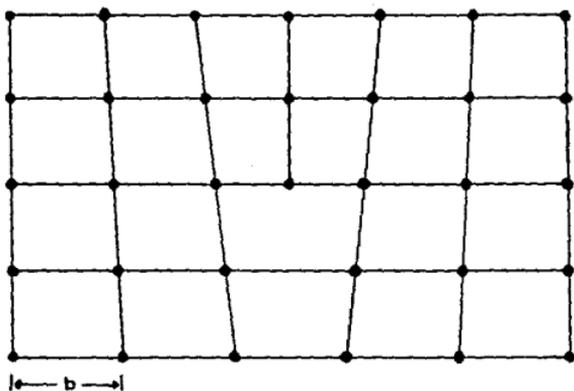
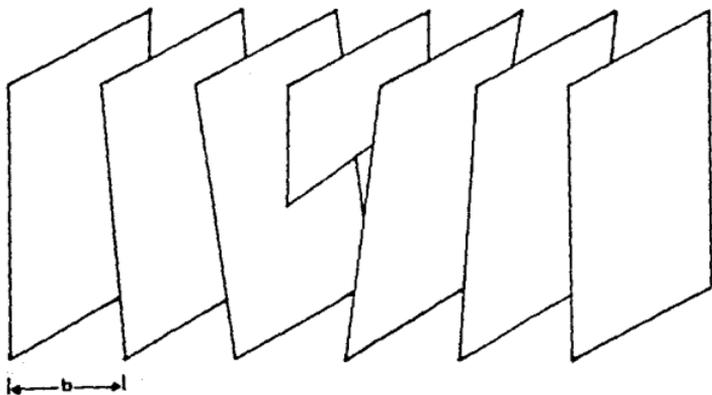


FIGURA 8  
Disposición de una máquina para realizar pruebas de desdoble.



(a)



(b)

FIGURA 9

Representación gráfica de una dislocación de borde. A) en dos dimensiones, B) en tercera dimensión [10].

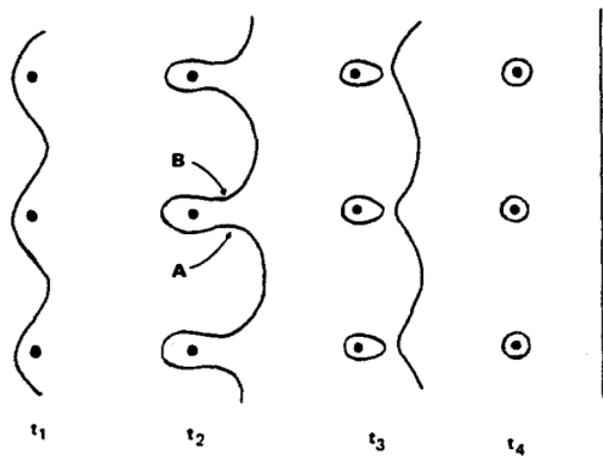


FIGURA 10

Esquematzación del enlazamiento de partículas producido por el movimiento de una dislocación [10].

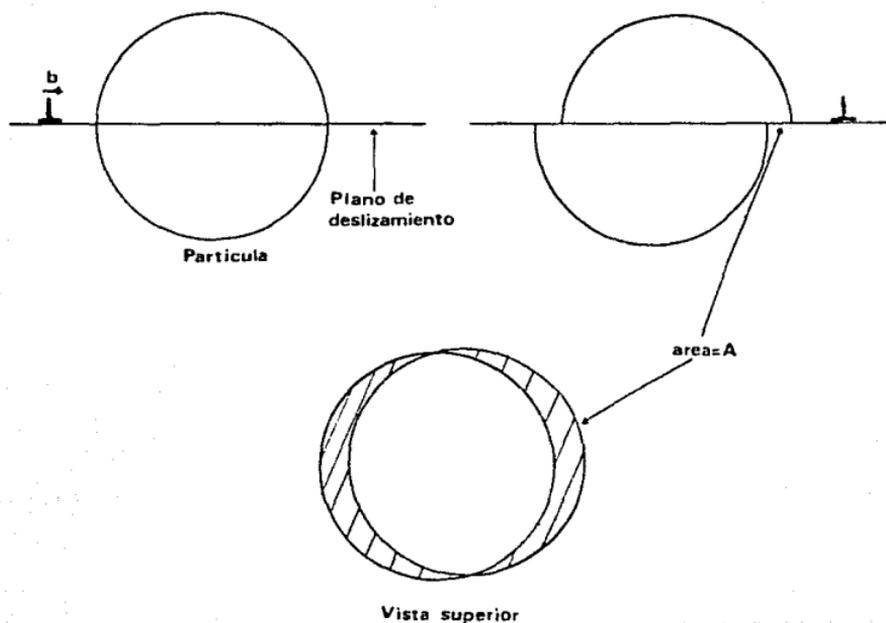


FIGURA 11

El corte de una partícula por el movimiento de deslizamiento de una dislocación [10].

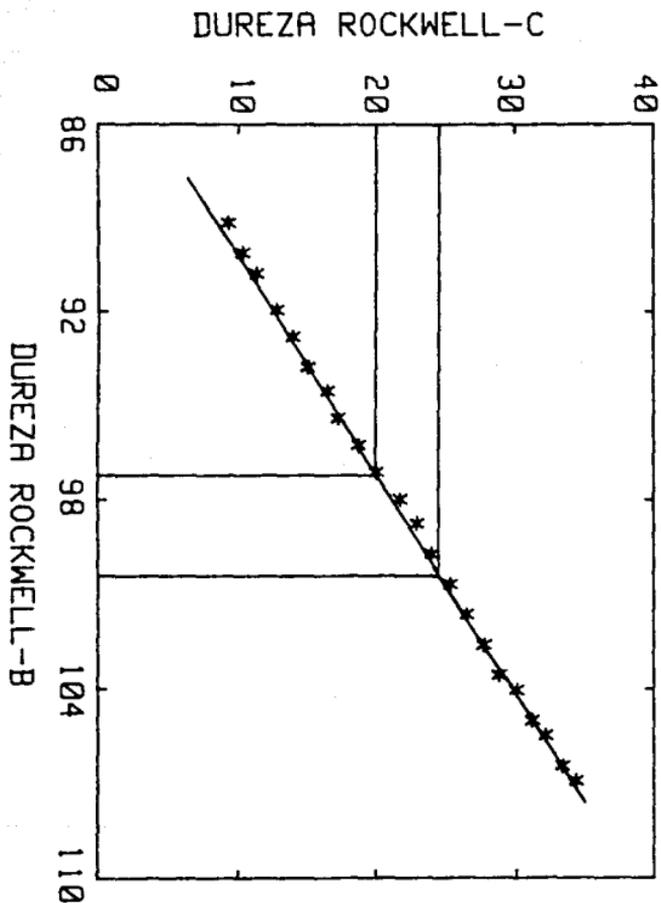


FIGURA 12

En esta gráfica se muestran los datos de correlación entre dureza Rockwell-B y dureza Rockwell-C, los cuales fueron aproximados a una recta por el metodo de los minimos cuadrados.

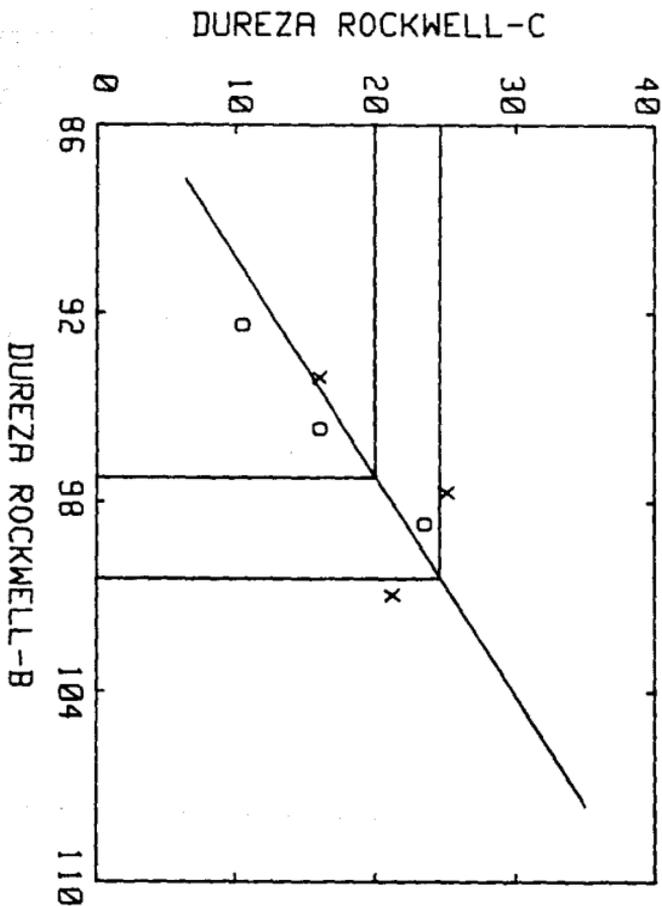
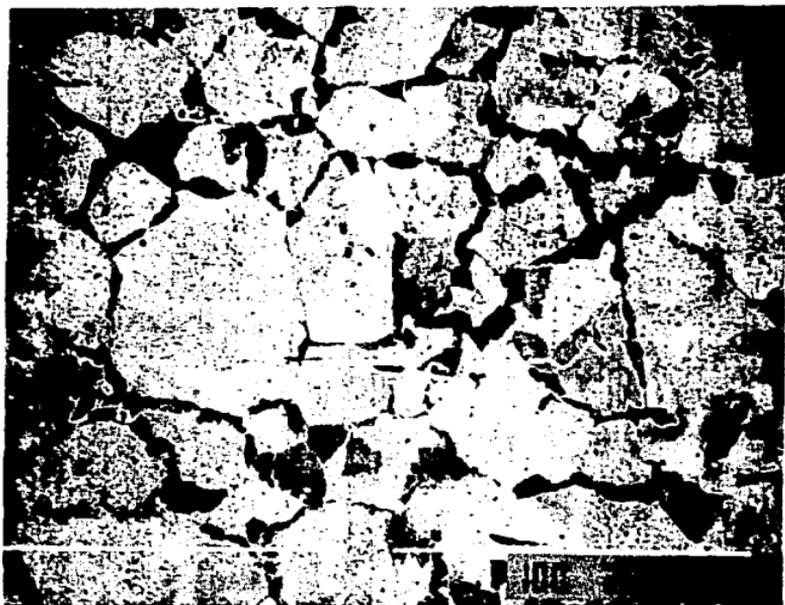


FIGURA 13

La gráfica muestra los datos de dureza experimentales de la tabla 6, los puntos marcados con cruces corresponden a los datos de la varilla 3, mientras que los puntos marcados con círculos corresponden a la varilla 4.

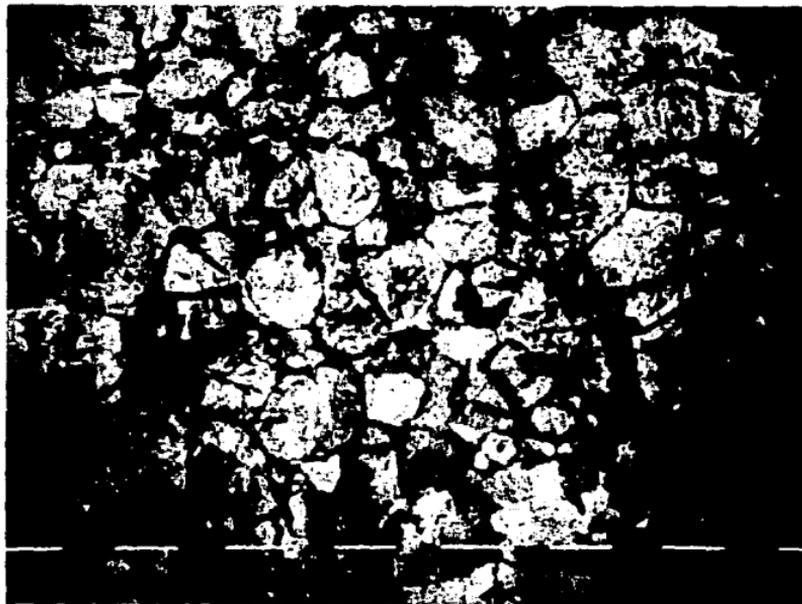
## APENDICE DE MICROGRAFIAS



NITAL 2

MICROGRAFIA 1

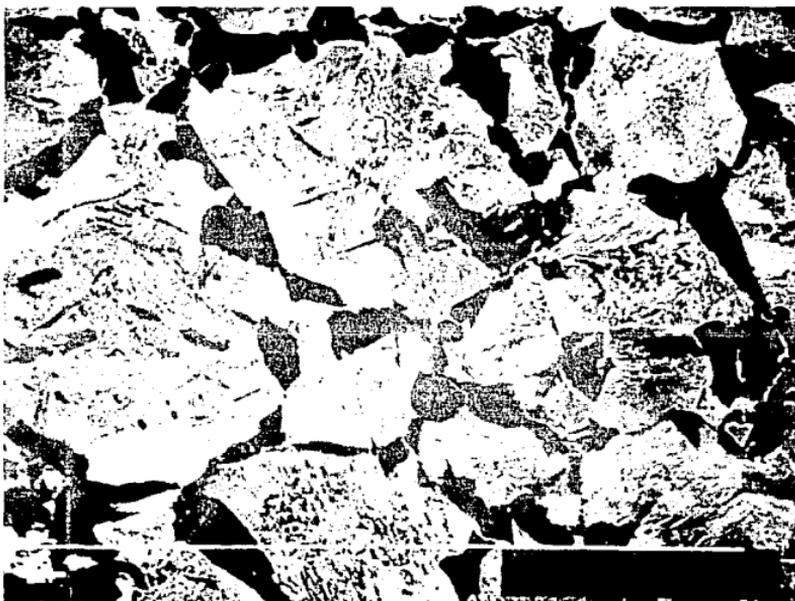
Muestra de la microestructura de la varilla 1 con tamaño de grano de  $11.16 \mu\text{m}$ .



NITAL 2

MICROGRAFIA 2

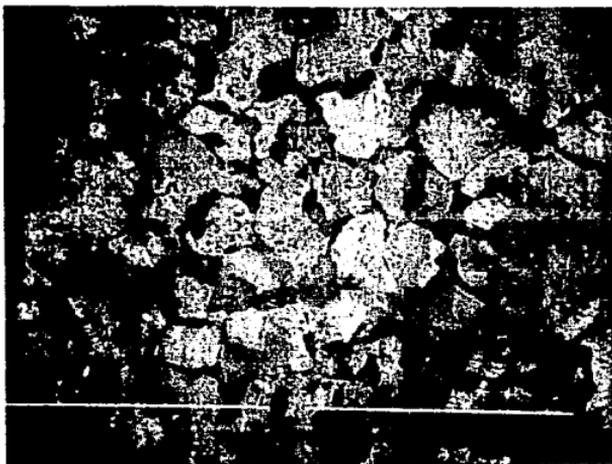
Muestra de la microestructura de la varilla 2 con tamaño de grano de 21.79  $\mu\text{m}$ .



NITAL 2

MICROGRAFIA 3

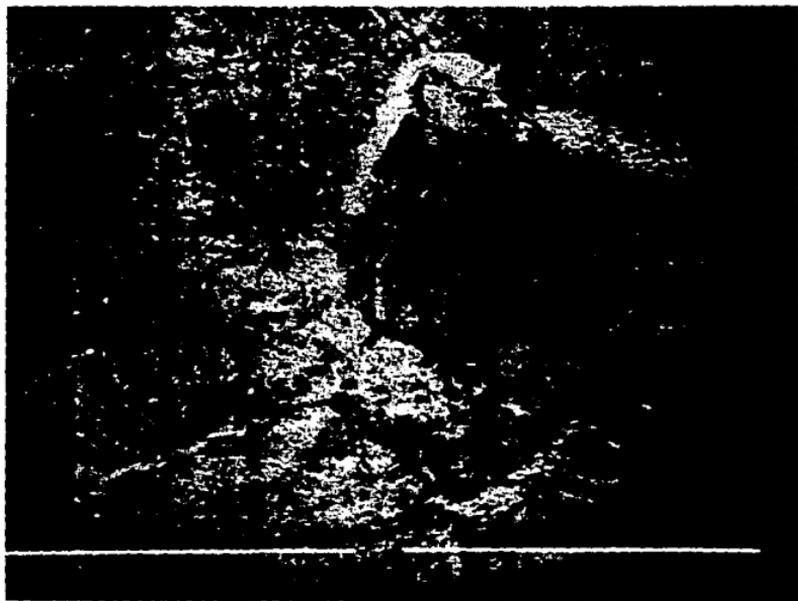
Muestra de la microestructura de la varilla 3 con tamaño de grano de  $13.26 \mu\text{m}$ .



NITAL 2

MICROGRAFIA 4

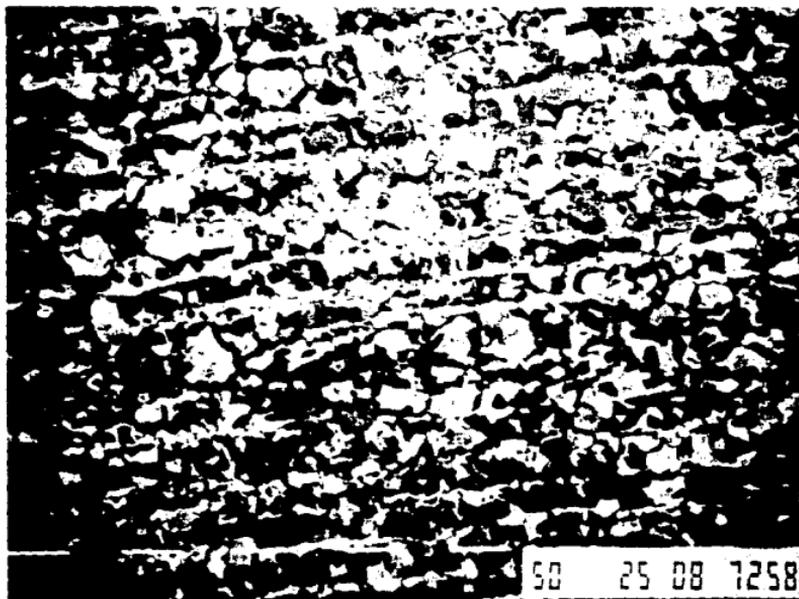
Muestra de la microestructura de la varilla 4 con tamaño de grano de 12.98  $\mu\text{m}$ .



NITAL 2

MICROGRAFIA 5

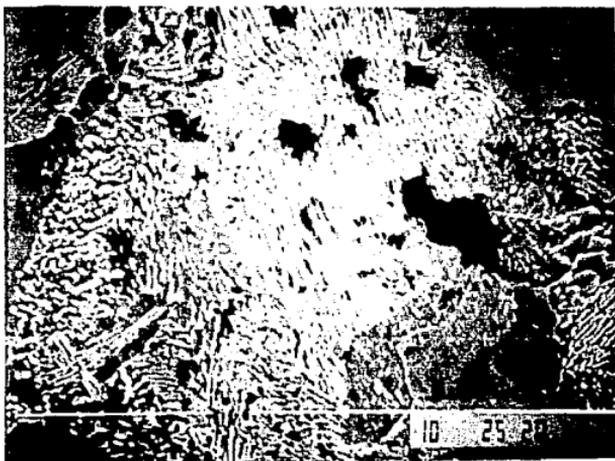
uestra de la microestructura de la varilla 5 con tamaño de grano  
e 28.99  $\mu\text{m}$ .



NITAL 2

MICROGRAFIA 6

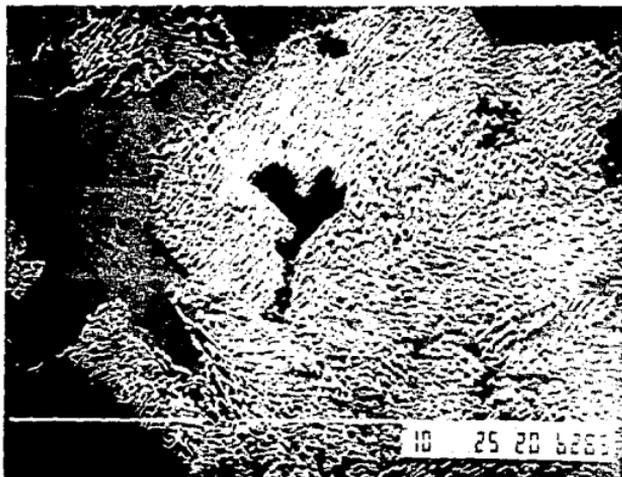
Muestra de la microestructura de la varilla 6 con tamaño de grano de  $32.48 \mu\text{m}$ .



NITAL 2

MICROGRAFIA 7

Las manchas negras presentes en la micrografia dentro de la perlita son desgarramientos sufridos en el interior de esta fase por efecto del dobléz.



NITAL 2

MICROGRAFIA 8

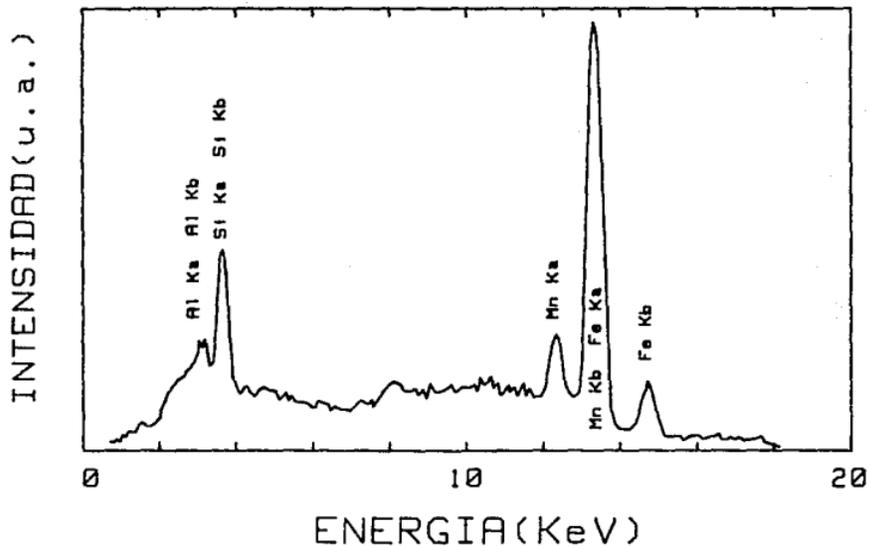
Esta micrografia nos permite comprobar que las manchas negras que se observan en la micrografia anterior son desgarramientos.



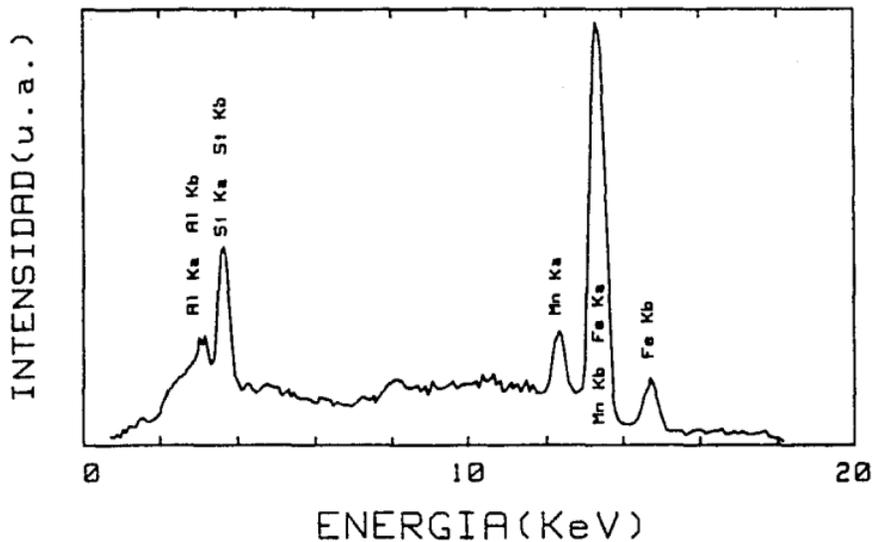
NITAL 2

MICROGRAFIA 9

La micrografía muestra una de las formas en que presipitan los nitruros y/o carbonitruros de niobio dentro de la microestructura, esta disposición es un tipo de segregación sufrida en el proceso de solidificación.



La figura muestra el patrón de EDX encontrado para una partícula precipitada de aluminosilicato mostrada en la micrografía 11. Con la representación de picos de aluminio, silicio y manganeso, los picos de hierro son interferencias de la matriz.



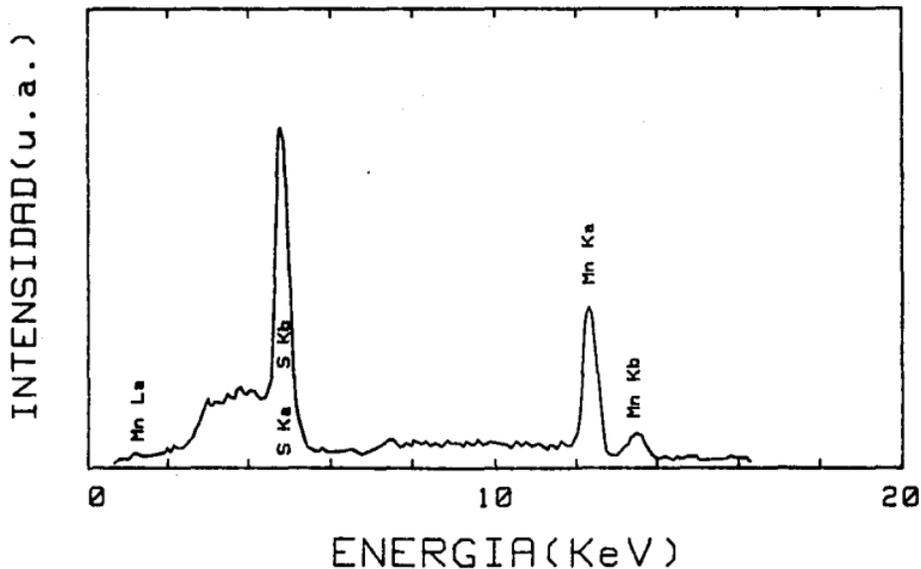
La figura muestra el patrón de EDX encontrado para una partícula precipitada de aluminosilicato mostrada en la micrografía 11. Con la representación de picos de aluminio, silicio y manganeso, los picos de fierro son interferencias de la matriz.



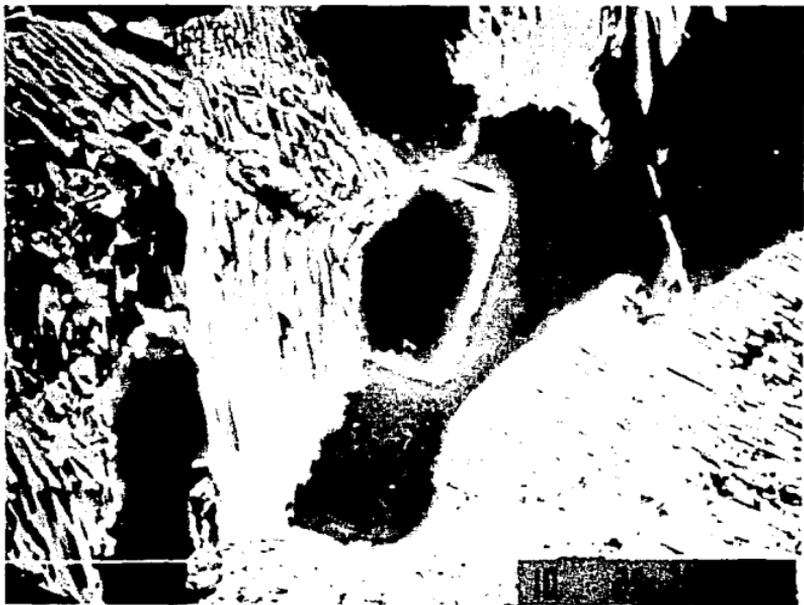
NITAL 2

MICROGRAFIA 10

Este tipo de precipitados es muy común encontrarlos en los aceros que contenga azufre debido a que esto es un sulfuro de manganeso.



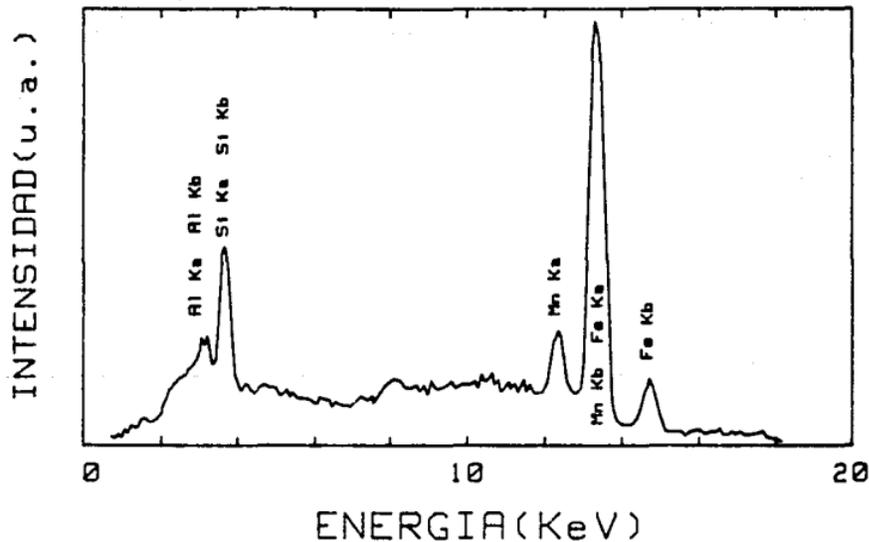
La figura muestra el patrón de EDX encontrado para un típico sulfuro de manganeso precipitado en un acero, micrografía 10. El pico más alto es representativo del azufre, mientras que los picos más cortos representan al manganeso.



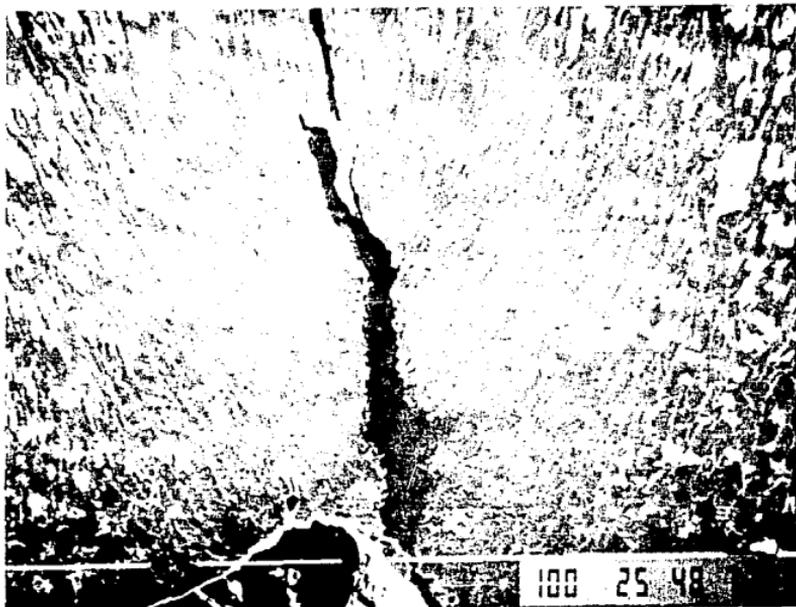
NITAL 2

MICROGRAFIA 11

Este tipo de particulas se presentan en muy poca cantidad y se trata de una particula de aluminosilicato formada durante la solidificación.



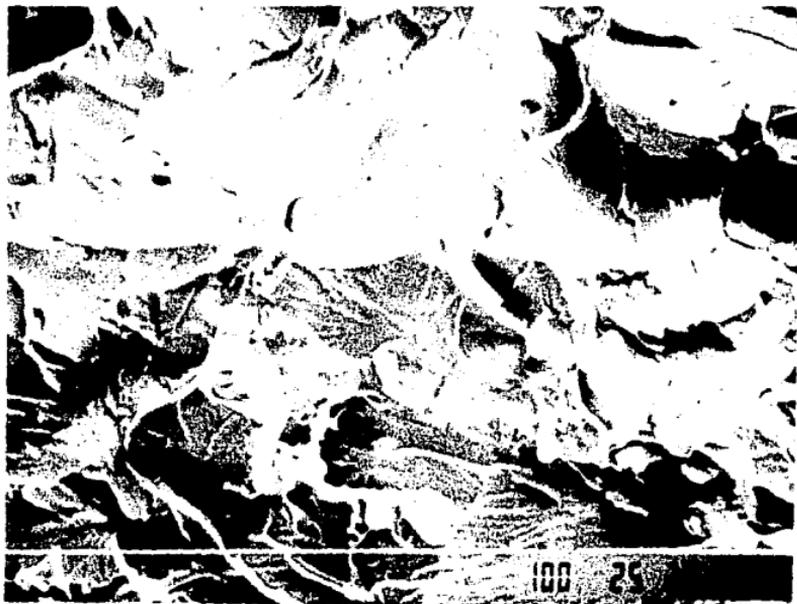
La figura muestra el patrón de EDX encontrado para una partícula precipitada de aluminosilicato mostrada en la microfotografía II. Con la representación de picos de aluminio, silicio y manganeso, los picos de hierro son interferencias de la matriz.



NITAL 2

#### MICROGRAFIA 12

Esta micrografia corresponde a la varrilla 6 en la cual se observan granos muy alargados, este alargamiento es debido a la compresión sufrida por el acero con el dobléz. La fractura se presenta en la zona con mayor cantidad de deformación.



SIN ATAQUE

MICROGRAFIA 13

La fractura mostrada en esta micrografia es de tipo transgranular frágil, se observan planos de clivaje y particulas de precipitados ocluidas en la superficie de fractura.



NITAL 2

MICROGRAFIA 14

Esta es la misma fractura de la micrografia anterior vista en un corte perpendicular a la misma, se observa que efectivamente la fractura se propaga en forma transgranular.

## REFERENCIAS

#### REFERENCIAS

1. W.T. Lankford, N. L. Samways, R. F. Craven and H.E. McGannon. "The making, Shaping and Treating of Steels". Tenth Edition. United States Steel.
2. M. Cohen. "On the fundamentals of HSLA steels". ASM November 1985-61-71.
3. J.H. Woodhead and S.R. Keown, "The history of microalloyed steels", ASM 1985.
4. J.L. Albarran, B. Campillo, F. Estevez and L. Martínez. "A study of the effect of nitrogen in two niobium microalloyed steels". Scripta Metalurgica, Vol. 23-1099-1104 1989.
- 5.
6. A. Malishev, G. Nikolaiev, Yu. Shuvalov. "Tecnología de los materiales" Editorial MIR Moscú 1979. Quinta Edición.
7. H.G. Guy. "Metalurgia Física para Ingenieros"
8. A.S.M. Metals Handbook Ninth Edition. Volume 10 "Materials Characterization".
- 9.
10. J.D Verhoeven. "Fundamentos de metalurgia física". Primera edición en español. LIMUSA 1987.
11. H.E. Davis, G.E. Troxell and C.T. Wiskocil. "The testing and inspection of engineering materials". Third Edition. McGraw-Hill Book Company, Inc.

12. G.L. Kehl. "Metalurgy and Metalurgicals Engineering Series". Third Edition. McGraw-Hill Bookcompany. 1949
13. V. G. Voskobóinikov, V. A. Kudrin y A. M. Yákushev, Metalurgia General, Editorial MIR Moscú (1979).
14. L. Martínez, J.L. Albarran y J. Fuentes, Welding Journal 66, 23 (1987)
15. F. Estevez y L. Martínez, Siderurgia Latinoamericana, 329, 23 (1987)
16. Nornas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto, Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal, 44, 47, noviembre 1987.
17. E. Rosenbluth y R. Meli, Concrete International, 5, 26 (1986)
18. S. Susuki y A.S. Kiremidjian, The México Earthquake of september 1985, Blume Earthquake Engineering Center (1986).
19. W. C. Stone, F. Y. Yokel, M. Calebi, T. Hanks, E. V. Leydendecker, Engineering Aspects of the September 1985 Mexico Earthquake, National Bureau of Standards Building Science Series 165, Washington, D.C.(1987).
20. D. Mitchel, J.Adams, R. H. DeVall, R.C. Lo y D. Weichest, The 1985 Mexican Earthquake. A visit Site Report, Earth Physics Branch, Open File Report 86-2, Energy Mines and Resources, Ottawa, Canadá.
21. L. Jiménez Cacho, Siderurgia Latinoamericana, 221, 66(1977).
22. R. Park y T. Paulay, Reforced Concrete Structures, J. Weley, New York, 40(1975).

23. J. F. McDermoth, en *Proceedings of the Workshop on Earthquake Resistant Concrete Building Constructions*, V. Bertero, Editor, Berkely, California, 629(1978).
24. A. J. Gutiérrez, *Competitividad del acero en Edificaciones Sismo-Resistentes*, Memorias del Congreso del Instituto Latinoamericano del acero, Caracas, Venezuela, 111(1988).
25. J. M. Gray, *Use of Niobium in Concrete Engineering Bar Steels*, Memorias del Instituto Latinoamericano de Fierro y del Acero, Lima, Perú(1978).
26. A. Hey, H. Weise, y W. G. Wilson, en *Niobium*, H. Stuart, Editor, The Metallurgical Society, Warrendale, Pa., 967(1984).
27. A. J. DeArdo, J. M. Gray y L. Mayer, en *Niobium*, H. Stuart, Editor, The Metallurgical Society, Warrendale, Pa., 685(1984).
28. J. L. Albarran, B. F. Campillo, J. A. Juárez, F. Estévez y L. Martínez, *Soldabilidad y Propiedades Mecánicas del Acero de Refuerzo*, Memoria, Tercer Congreso Nacional de Soldadura, Morelia, Michoacan, Noviembre(1989).