

17  
201



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

"CARACTERIZACION DE LOS ACEROS DE  
REFUERZO FABRICADOS EN MEXICO"

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO QUIMICO METALURGICO  
P R E S E N T A :  
JOSE ANTONIO LEGORRETA ROSALES



**FALLA DE ORIGEN**



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.

## INDICE

CAPITULO I	
Introducción.....	1
CAPITULO II	
Fabricación de los aceros de refuerzo.....	3
Norma B-6.....	3
Norma B-18 y Norma B-32.....	24
Norma B-294.....	25
Norma B-457.....	25
CAPITULO III	
Propiedades mecánicas del acero de refuerzo.....	38
Resistencia a la tensión.....	39
Resistencia al impacto.....	45
Resistencia al dobléz.....	48
Propiedades mecánicas de los aceros de refuerzo fabricados en México.....	57
Experiencias en el ensayo de tracción.....	70
Experiencias en el ensayo de impacto.....	76
Experiencias en el ensayo de dobléz.....	83
CAPITULO IV	
Soldabilidad.....	91
Metalurgia del proceso de soldadura.....	100
Soldabilidad de los aceros de refuerzo fabricados en México.....	104
Experiencias de soldaduras con aceros de refuerzo.....	107
Descripción de los ensayos de soldadura realizados.....	109
Interpretación de las transformaciones de fase durante el proceso de soldadura.....	153
CAPITULO V	
Conclusiones.....	156
Bibliografía.....	160

## CAPITULO I

### INTRODUCCION

En la construcción de concreto reforzado para la edificación de viviendas, almacenes, etcétera, el acero de refuerzo es un constituyente fundamental, ya sea que se utilice en forma de alambón o varillas. El acero confiere a las estructuras de concreto reforzado propiedades importantes como ductilidad y resistencia. Los pasados sismos que ocurrieron en Septiembre de 1985 nos mostraron lo importante que es el acero de refuerzo en las construcciones de concreto.

El Instituto de Física de la U.N.A.M. (IFUNAM) se dedicó a la tarea de recolectar y analizar muestras de varillas y soldaduras de los edificios derrumbados por los sismos. Los resultados obtenidos de estos estudios demostraron varias deficiencias en cuanto al tipo de soldaduras realizadas, así como a las características mecánicas de los aceros empleados.

Estos resultados propiciaron una revisión de las normas mexicanas de los aceros de refuerzo fabricados en México. La totalidad de las normas revisadas no establecen un límite máximo en cuanto a la composición química se refiere, solo asignan un valor máximo al contenido de fósforo. En lo que respecta a las propiedades mecánicas el acero debe tener como mínimo una resistencia de  $42 \text{ kg/mm}^2$ , en cualquier calibre de varilla. En cuanto a la soldabilidad del acero de refuerzo las normas no especifican ningún grado de confiabilidad.

Ante estos resultados el IFUNAM en colaboración con la Siderúrgica Lázaro Cárdenas-Las Truchas S.A. ( SICARTSA ) propuso una nueva norma mexicana de acero de refuerzo para la construcción. Esta nueva norma establece valores máximos en la composición química, así como límites inferior y superior en la resistencia del acero, además refiere propiedades de soldabilidad y una mayor ductilidad. La norma propuesta se registró con la clave NOM-B-457-1987.

El objetivo de este trabajo de tesis es el de comparar los procesos de fabricación de los distintos tipos de acero de refuerzo, así como sus propiedades mecánicas y sus características de soldabilidad.

Las normas mexicanas de los aceros de refuerzo fabricados en México son:

- a) NOM-B-6-1983, Varillas corrugadas y lisas de acero, procedentes de lingote o palanquilla, para refuerzo de concreto.
- b) NOM-B-18-1975, Varillas corrugadas y lisas de acero, procedentes de riel, para refuerzo de concreto.
- c) NOM-B-32-1985, Varillas corrugadas y lisas de acero, procedentes de eje, para refuerzo de concreto.
- d) NOM-B-294-1972, Varillas corrugadas y lisas de acero estirado en frío, procedentes de lingote o palanquilla, para refuerzo de concreto.
- e) NOM-B-457-1987, Varillas corrugadas de acero de baja aleación, procedentes de lingote o palanquilla, para refuerzo de concreto.

## CAPITULO II

### FABRICACION DE LOS ACEROS DE REFUERZO

En este capitulo se describen los procesos de fabricación de los distintos tipos de acero de refuerzo fabricados en México de acuerdo a cada norma establecida.

#### 1) NOM-B-6, aceros de palanquilla (31)

Estos aceros son elaborados por los procesos de:

- a) Siderúrgica integrada con alto horno
- b) Siderúrgica integrada con reducción directa
- c) Miniaceras

### PLANTA SIDERURGICA INTEGRADA CON ALTO HORNO

La secuencia de fabricación del acero sigue las siguientes etapas, alto horno, convertidor BOF, refinación secundaria en la olla, colada continua y laminación en caliente.

El alto horno, figura 1, está constituido principalmente por las siguientes partes: tragante, cuba, vientre, etalaje, crisol, toberas y piquerías. La finalidad de un alto horno es transformar el mineral de hierro a arrabio líquido, que es una aleación de hierro muy rica en carbono y otras impurezas (1).

Los materiales que se agregan al alto horno son el mineral de hierro y la piedra caliza en forma de aglomerados o pelets, y trozos de coque (1).

Los aglomerados o pellets son una mezcla de mineral de hierro y piedra caliza usando bentonita como agente aglutinante. Estos aglomerados tienen un tamaño mayor a 10 milímetros. Los pedazos de coque tienen un tamaño entre 20 a 60 milímetros (2,3).

Los materiales se agregan mediante cargas alternadas de aglomerado y coque o bien en forma simultánea por el tragante, el cual se encuentra situado en la parte superior del alto horno.

En la parte inferior del alto horno entre el vientre y el estalaje se encuentran las toberas, las cuales sirven para la inyección de aire enriquecido con oxígeno y algún combustible líquido como por ejemplo un hidrocarburo (1).

Los gases obtenidos de la combustión del combustible pasan a través de la cuba y fluyen por los huecos que quedan entre las partículas de la carga, estos ceden su energía química y calorífica donde el carbono del coque se quema a monóxido de carbono. Junto con el monóxido de carbono se obtiene parte de gas hidrógeno resultante de la oxidación del hidrocarburo al entrar en contacto con el oxígeno dentro del alto horno.

El monóxido de carbono y el hidrógeno son gases reductores que al pasar por entre las partículas de aglomerado y coque producen la reducción de varios óxidos metálicos y la formación de compuestos de bajo punto de fusión (2,3).

Conforme baja la carga a través de la cuba la temperatura aumenta produciendo la fusión del arrabio y otros elementos. Esta fusión ocurre en el estalaje que es la zona más caliente en el alto horno (1).

Los gases que salen por la parte superior del alto horno son en su mayoría dióxido de carbono, monóxido de carbono, nitrógeno y polvo. Estos gases contienen un cierto porcentaje de monóxido de carbono y no se pueden expulsar al aire debido a que este es un gas tóxico, por lo que son tratados para eliminar o quemar la mayor parte de monóxido de carbono y aprovechar su capacidad energética.

El tratamiento de los gases empieza por pasarlos por unas trampas de agua para eliminar los polvos, de modo que la concentración de polvo residual sea de 0.002 a 0.015 g/m<sup>3</sup> (2,3).

Los gases limpios se pasan a través de unos dispositivos como estufas en donde por medio de calentamiento se quema el monóxido de carbono a dióxido de carbono, estas estufas están recubiertas de material refractario con alta capacidad calorífica con el fin de absorber el calor desprendido por la reacción de quemado u oxidación del monóxido de carbono, figura 2.



El calor absorbido por los tabiques refractarios de las estufas se utiliza para precalentar el sople del aire que entrara por las toberas y asi aumentar la eficiencia del proceso de alto horno. Los gases una vez quemados en su totalidad se aprovechan para calentar boquillas de los calentadores de aire, lingotes de acero, baterias de hornos de coque, calderas etc. (1,11).

En el estalaje la temperatura alcanza los 1800°C, en estas condiciones empieza la fusión de los materiales reducidos en la cuba. Estos son recogidos en el crisol en donde la caliza o mejor dicho el óxido de calcio interviene como un fundente y escorificante formandose asi la escoria y el arrabio líquido (1,2).

En la escoria que se forma se elimina gran parte de azufre asi como óxidos de varios metales incluidos el hierro. La escoria del alto horno tiene una utilización importante ya que se usa como materia prima para fabricar diferentes materiales de construcción como cemento, ligantes, morteros, hormigones, pomez de escoria, lana de escoria, materiales para muros y adoquines entre otros.

La escoria y el arrabio se sacan del crisol por unos ductos llamados piqueras. La piqueta de escoria esta colocada en un nivel más alto que la piqueta para el arrabio ya que la escoria flota.

El arrabio líquido se sangra por unas piqueras situadas en la parte inferior del crisol, las piqueras se abren por medio de un mecanismo perforador que rompe un tabique refractario y la costra de material formada en la parte interior del crisol. El arrabio líquido es recogido en trenes-olla (2), figura 3, en donde se transportara a los talleres de aceración.

El arrabio tiene una composición química (1) de 3.5 a 4.5% de carbono, 0.5 a 3.5% de silicio, 0.5 a 2.0% de manganeso, 0.1 a 2.5% de fósforo y de 0.004 a 0.006% de azufre.

Una vez que el arrabio líquido llega a la planta de aceración se vacia a unas ollas de paso para luego alimentar a los convertidores en donde se realizara la afinación del arrabio, los convertidores son del tipo BOF, convertidores básicos con oxígeno.

El convertidor BOF (3,5) consiste en un recipiente de acero de forma de pera. En su interior se encuentra recubierta por tres capas de material básico: la primera es una capa de tabiques de magnesita o cromo-magnesita, la segunda es un relleno de dolomita activada y la tercera es una capa de dolomita alquitranada apisonada para relleno de los espacios entre las capas de refractarios.

Por la parte superior se encuentra un orificio por donde se carga arrabio líquido, aleantes, chatarra y escorificantes. También por la parte superior se introduce una tobera de acero refrigerada por agua por donde se inyecta el flujo de oxígeno, como se indica en la figura 4.

La descarga del acero se realiza por una piquera situada cerca de la parte superior del convertidor (3). La escoria se desaloja por la parte superior del convertidor. El convertidor esta provisto de un mecanismo de giro y rotación completa con el cual se lleva a cabo la inclinación del convertidor en 180 grados.

La afinación del arrabio (3) se realiza en cinco etapas importantes:

La primera consiste en cargar al convertidor pedacería de chatarra, regularmente se carga de un 15 a 35% de la capacidad total del convertidor. En la segunda etapa se carga al convertidor el arrabio líquido procedente del alto horno.

En la tercera etapa ocurre la inyección de oxígeno por medio de la tobera, que se introduce por encima del convertidor. El oxígeno es inyectado a una presión de 8 a 10 atmósferas con lo cual se logra hacer penetrar el chorro de oxígeno en el baño rompiendo la capa de escoria.

El calor necesario para que el baño permanezca líquido se debe a las reacciones de oxidación del carbono, silicio y manganeso, las cuales son altamente exotérmicas.

El régimen de soplado dura de 12 a 22 minutos en función de la capacidad del convertidor así como del suministro de oxígeno.

La cuarta etapa consiste en la adición de materiales escorificantes como la cal y agentes fluidizantes de escoria como la fluorita. En esta etapa el arrabio se transforma en acero y se forma una capa de escoria que recolecta los óxidos formados y el fósforo remanente en el acero.

En este punto se introduce una lanza para toma de muestra y se mide la temperatura por medio de un termopar de inmersión. Si se desea ajustar la composición se pueden agregar elementos aleantes o bien inyectar un poco de oxígeno.

La escoria se descarga poniendo en posición horizontal el convertidor, una vez desechada se pone en posición vertical y se espera para vaciar el acero.

La quinta etapa es propiamente el vaciado del acero a una olla de colada o bien directamente a una máquina de colada continua.

El vaciado del acero se realiza colocando el convertidor en posición horizontal en dirección a la piqueta del convertidor, cuando se ha vaciado en su totalidad se gira 180 grados y se descarga por el cuello la escoria restante (1,2,3,5).

La afinación del arrabio a acero en el convertidor lleva no más de una hora, por lo que es un proceso bastante aconsejable para la producción de acero.

Cuando el acero es vaciado a una olla de colada se agrega una pequeña cantidad de escoria para proteger al acero de oxidaciones debido al oxígeno del aire.

En la olla figura 5, se realiza una homogeneización del baño líquido mediante la inyección por abajo de un gas inerte como argón o nitrógeno (6,7).

EL acero líquido, figura 6, se vacía en un recipiente por donde a velocidad controlada se pasa a un molde sin fondo de sección cuadrada llamado cristizador, este se encuentra rodeado de unos serpentines por la parte exterior para mantenerlo refrigerado, cuenta además con un movimiento vibratorio para evitar que el acero en su solidificación no se adhiera al molde (3).

Como el cristalizador no tiene fondo se cuenta con un dispositivo llamado inoculador, el cual consiste en una barra metálica con cabeza desmontable cuya sección corresponde a la del lingote, el inoculador posee un movimiento descendente con lo cual se extrae poco a poco el lingote sólido (2,3).

El acero es vaciado a un recipiente intermedio antes de entrar al cristalizador, en este recipiente se controla la velocidad de vaciado a los moldes de colada continua. Al caer el acero líquido se empieza a solidificar en la cabeza del inoculador que se encuentra en el fondo del molde, en este momento el inoculador se pone a mover hacia abajo arrastrando así al lingote solidificado de la caja del molde.

Una vez que el lingote empieza a salir del molde es jalado por unos rodillos con los cuales se le va dando una dirección al lingote, el lingote es de sección cuadrada con 10 a 15 centímetros por lado y de 6 a 8 metros de longitud, estos tramos son llamados palanquillas.

Las ventajas que presenta el sistema de colada continua con respecto a la colada en moldes fijos son: los costos de laminación bajan porque ocurre una reducción previa al forjar la palanquilla, mayor uniformidad de la composición química a través de la sección de mayor enfriamiento durante la solidificación y una mejor calidad superficial del acero.

Una vez obtenidas las palanquillas son llevadas directamente a los trenes o molinos de laminación para darles forma de producto terminado, estos productos pueden ser varillas corrugadas, alambres y barras de secciones cuadrada, hexagonal o redonda.

La varilla corrugada (9) es una barra de acero que ha sido especialmente fabricada para usarse como refuerzo de concreto, La superficie de la varilla esta provista de rebordes o salientes llamados corrugaciones, las cuales inhiben el movimiento relativo longitudinal entre la varilla y el concreto que la rodea.

Una vez obtenida la planquilla puede pasarse directamente a los trenes de laminación o bien se almacenan en un patio para su posterior utilización.

El proceso de conformado de las palanquillas es mediante la laminación en caliente (1,2,9). El principio en que se basa la laminación en caliente es llevar el material a una temperatura tal, que su dureza disminuya a un mínimo y su plasticidad aumente a un máximo sin llegar al límite donde el constituyente de menor punto de fusión empieza a fundirse.

Las temperaturas de trabajo en la laminación en caliente están comprendidas entre los 900°C y los 1250°C (1), correspondiendo las temperaturas más altas a los aceros de menor contenido de carbono. Debido a esto las palanquillas son llevadas a hornos de calentamiento en donde alcanzan la temperatura óptima para pasar a los trenes de laminación. Cuando las palanquillas alcanzan esta temperatura son transportadas por medio de bandas de rodillos a los trenes de laminación. A esta temperatura el acero de la palanquilla es bastante dúctil, en este estado físico se procede a reducir sucesivamente el área de la sección transversal por medio de rodillos separados convenientemente entre sí, como se indica en la figura 7.

Regularmente para conformar cualquier producto laminado este debe pasar por lo menos a través de dos trenes de laminación, el primero se llama tren de laminación desbastador, en el cual la reducción se hace más severa y los segundos se llaman trenes laminadores de acabado en los cuales se le da la forma y especificaciones al producto terminado ya sean varillas, barras, alambón o plancha.

La ventaja principal de la laminación en caliente es que se eliminan los esfuerzos asimilados durante la deformación casi instantáneamente produciendo una estructura de grano fino en el acero (10,11,20).



## PLANTA SIDERURGICA INTEGRADA CON REDUCCION DIRECTA

El camino para la obtención de varilla de refuerzo por este procedimiento comprende los siguientes procesos: reducción directa, horno eléctrico de arco, refinación secundaria en la olla, colada continua y laminación en caliente.

El proceso H.Y.L. de reducción directa, desarrollado por la compañía Hojalata y Lámina S.A. en Monterrey, Nuevo León, trata de obtener un hierro primario más puro que el arrabio y directamente utilizable en la industria, mediante la obtención de hierro sólido en forma fofo y porosa, llamada ferro-esponja, a partir del mineral de hierro (B).

La obtención del ferro-esponja se lleva a cabo en reactores llamados retortas, figura A, de forma cilíndrica y recubiertos en su interior de material refractario con una entrada por la parte superior para la carga y unas toberas para la inyección de los gases reductores. En la parte inferior se encuentra un canal de descarga para la extracción del ferro-esponja y una tobera de desalojo de los gases de salida.

La materia prima es el mineral de hierro previamente pelletizado o aglomerado, este se agrega por la parte superior de la retorta.

El proceso H.Y.L. utiliza una mezcla de gases rica en hidrógeno y monóxido de carbono para extraer el oxígeno del mineral de hierro.

La mezcla de gases reductores se produce en unos dispositivos llamados reformadores, como se indica en la figura 9, a partir de gas natural y vapor de agua. El gas natural y el vapor de agua se inyectan por una tubería de acero inoxidable que se calienta por medio de quemadores a una temperatura de 980°C a 1240°C, en estas condiciones y con la ayuda de un catalizador de óxido de níquel (NiO) que se pone en el interior de los tubos, ocurre una reacción química de disociación del gas natural según la reacción siguiente:



El hidrógeno y el monóxido de carbono producidos en estos reformadores salen acompañados de pequeñas cantidades de dióxido de carbono, este es producido debido a un sobrecalentamiento de los gases para compensar la absorción de calor producida durante la reacción de disociación la cual es endotérmica (2,3,8).

Los gases reductores se inyectan a la retorta por una tobera superior, el objetivo de esto es lograr reducir la mayor parte del óxido de hierro en el mineral de carga, esto se logra de un 85 a un 90 por ciento.

El proceso es intermitente, por esta razón las plantas de H.V.L. se componen de cuatro unidades reductoras para aprovechar al máximo la energía y el potencial de reducción de los gases, de esta manera se logra una producción casi continua (3,8), figura 10.

En la primera retorta ocurre la carga del mineral de hierro y un precalentamiento con ayuda de los gases reductores que salen de las otras retortas. En este paso también se elimina la humedad de la carga.

En las siguientes dos retortas tiene lugar una reducción más severa debido a la inyección de los gases reductores producidos en el proceso de reformación del gas natural.

En la cuarta retorta se efectúa la carburación del ferro-esponja. En esta retorta se desconecta el ciclo de gas y el enfriamiento del ferro-esponja dentro de la retorta, este enfriamiento se hace mediante la inyección de una corriente de gas natural durante 2 o 3 minutos. Esto provoca la descomposición del gas y la separación del 0.5 al 1.0% de carbono, en forma de hollín, en el ferro-esponja.

Todo el proceso dura 5 horas aproximadamente de las cuales una hora se designa a la carga y descarga de las retortas. El grado de reducción del hierro en el ferro-esponja acabado constituye alrededor del 75 al 92%.

Los gases que salen de las retortas una vez que sus componentes reductores se han aprovechado al máximo se pasan a unas estufas donde el monóxido de carbono es quemado completamente y así poder ser aprovechado para calentamiento de los tubos reformadores y precalentamiento de la carga y del gas natural.

El ferro-esponja se almacena en patios al aire libre de donde se le transporta a la planta de aceración para su utilización.

La producción del acero se realiza en hornos de arco eléctrico, el horno de arco eléctrico (2,3), comprende un espacio útil, 3 electrodos de carbono grafito, conductores de corriente provistos de mecanismos para subir y bajar los electrodos y otro basculante para inclinar el horno, como se observa en la figura 11.

El espacio útil se encuentra limitado por la bóveda, las paredes del horno, la solera, la ventana de trabajo y un orificio con canal para vaciar el acero.

El material refractario que cubre el interior del horno está distribuido de la siguiente manera: La solera está provista de varias capas, la primera de asbesto seguida de una capa de polvo de chamota y ladrillo de chamota, la última capa es de tabiques de magnesita o cromo-magnesita con una capa de dolomita alquitranada apisonada sobre todas las capas. Las paredes del horno y la bóveda se encuentran recubiertas por tabiques de magnesita y en algunos casos se refrigeran por medio de serpentines con agua (3).

Se usan tres electrodos para producir el arco eléctrico mediante la aplicación de una corriente trifásica que produce un foco calorífico que se estima entre 3000-4000°C y que por ello funde más rápido que una llama (1).

El proceso de obtención del acero se divide en dos pasos importantes: el primero consiste en la alimentación y fusión de la carga, el segundo consiste en el afinado del acero (2,9).

Los materiales que se cargan al horno son en su mayoría chatarra que constituye del 75 al 100 por ciento de la carga, ferro-esponja y pedacería de los electrodos consumidos. La chatarra se clasifica previamente de acuerdo a su composición química y a su tamaño.

La carga se realiza por la parte superior del horno, la bóveda tiene un mecanismo rotante que hace que se mueva junto con los electrodos a una posición fuera del horno, en este punto los materiales se descargan por medio de portacargas la pedacería de chatarra y por medio de toberas el ferro-esponja.

Una vez cargado el horno se pone la bóveda en su lugar y se inicia la fusión de la carga. La fusión se realiza en tres niveles o taps de calentamiento.

En el primero el arco se fornea arriba de la carga y se va bajando despacio, el segundo ocurre una vez que los electrodos se encuentran en el interior del horno, aquí el arco es más intenso para provocar la fusión de la carga. El tercer paso consiste en un calentamiento de la carga líquida mediante el arco eléctrico situado muy cerca de la superficie del baño líquido. Todo el proceso de fusión dura entre 1 a 3 horas dependiendo de la capacidad del horno y el tamaño de la chatarra.

El siguiente paso es el afino del acero el cual consiste en tres periodos básicamente: oxidación, reducción y vaciado del acero.

En el periodo de oxidación se sobrecalienta el acero a unos 1630°C aproximadamente y se inyecta una corriente de oxígeno por medio de una lanza que se introduce en el baño líquido a través de la ventana de trabajo.

A través de la ventana de trabajo se carga material escorificante como cal y fluorita. El flujo de oxígeno dura de 10 a 20 minutos al término del cual se ha formado bastante escoria la cual ha absorbido la mayoría del fósforo en el acero. La escoria se desaloja inclinando el horno en dirección de la ventana de trabajo.

El periodo de oxidación dura de 30 a 90 minutos y el objetivo es bajar el contenido de carbono a un nivel inferior del acero a obtener (3).

En el periodo de reducción ocurre la adición de ferro-aleaciones como ferromanganeso y ferrosilicio con el fin de eliminar el oxígeno remanente en el baño líquido. También se carga material escorificante para la eliminación del azufre en el acero. La escoria se desaloja por la ventana de trabajo y el arco eléctrico empieza a bajar su intensidad.

En este periodo ocurre la corrección de la composición química y la adición de los elementos aleantes como cromo, molibdeno, vanadio etc. La temperatura de vaciado se estabiliza y se sacan los electrodos. Este periodo dura de 40 a 120 minutos (3).

En el tercer periodo la temperatura del baño se ajusta a 1580°C aproximadamente, en este punto la olla donde se va a vaciar el acero debe estar lista y colocada abajo del canal de vaciado, 2 ó 3 minutos antes del vaciado se coloca una barra de aluminio puro en el canal de vaciado para eliminar el oxígeno remanente del baño (1).

El acero es recibido en una olla en donde se realizará la homogeneización del baño mediante una corriente de gas inerte como argón o nitrógeno que se inyecta por la parte inferior de la olla. El acero una vez en la olla se lleva al proceso de colada continua en donde se obtendrán las palanquillas que serán llevadas a los trenes de laminación en caliente descrito anteriormente.



## MINIACERIAS

Este método de producción de varillas es el más usado en las plantas que no parten del mineral de hierro para la obtención del acero sino que parten de la chatarra de acero. El camino que siguen es el de arco eléctrico, olla de colada, colada en lingoteras, laminación en caliente.

El procedimiento de arco eléctrico es similar al descrito en el proceso por reducción directa. El acero se vacía a una olla de colada en donde se realiza la homogeneización del baño por medio de la inyección por abajo de una corriente de gas inerte como argón o nitrógeno.

Por lo común estas miniacerías no cuentan con equipos de colada continua sino que el acero se vacía a moldes fijos llamados lingoteras, estas lingoteras son preparadas y puestas en carriles para poderlos mover fácilmente. El acero es vaciado a las lingoteras mediante el sistema de vaciado por sifón o en su defecto se vierte el acero directamente a las lingoteras.

Una vez solidificado el acero en las lingoteras, se procede al desmolde de los lingotes los cuales son almacenados en patios cercanos a los talleres de laminación.

Al igual que las palanquillas estos lingotes pasan por hornos de calentamiento antes de entrar a los trenes de laminación en caliente. El proceso de laminación es bastante más tardado debido a que los lingotes tienen un área transversal mayor lo que provoca que se tengan que dar más pasadas a través de los rodillos laminadores. La temperatura de laminación es mayor lo que provoca que se forme una costra sobre el lingote al salir del horno de calentamiento con lo cual existe una pérdida de material.

Los lingotes pasan a través de trenes laminadores desbastadores donde se les da la forma de barras o tochos de sección cuadrada y por medio de sopletes se cortan a una longitud deseada.

De aquí son llevados a un segundo paso de calentamiento en hornos secundarios de donde pasan a través de los trenes laminadores acabadores en donde se les da la forma de producto terminado ya sea en forma de varilla corrugada, barras redondas, cuadradas u ovoides.

2) NOM-B-18 y NOM-B-32, aceros de refuerzo de riel y de eje.

Estos tipos de acero de refuerzo utilizan como materia prima la chatarra de acero de riel y de eje de los carros de ferrocarril principalmente (32,33).

La obtención de varilla de este tipo se realiza por dos métodos: el primero consiste en la relaminación de estos productos y la segunda en la refusión del material desechado.

#### RELAMINACION

Esto consiste en calentar los ejes de ferrocarril o los rieles en un horno de combustión de diesel a una temperatura tal que el material sea lo bastante dúctil como para resistir el cambio de forma y las corrugaciones que se le va a dar en los trenes de laminación en caliente.

#### REFUSION

Este procedimiento es similar al usado en las miniacerasías, el único cambio es que la chatarra es solamente de eje de ferrocarril y de riel, claro que esto no siempre se hace y se agrega chatarra de acero y se carbura a los límites de un acero de esta clase.

3) NOM-B-294, aceros de refuerzo torcidos en frío.

Estos aceros son fabricados también en las miniacerías y usan como materia prima chatarra de acero de bajo carbono (34).

La fusión y afinación de esta clase de acero se realiza en hornos de arco eléctrico y vaciado en lingoteras o a la producción de palanquillas en el proceso de colada continua. Con estos productos se elaboran barras de sección circular.

Estas barras son pasadas a máquinas en donde se les sujetan en los extremos y se empiezan a estirar longitudinalmente en frío para lograr la resistencia necesaria que establece la norma de fabricación de esta clase de varilla de refuerzo.

4) NOM-B-457, acero de palanquilla microaleado.

Este tipo de acero (35) es fabricado en México exclusivamente por la compañía Siderúrgica Lázaro Cárdenas-Las Truchas S.A. (SICARTSA), la cual fabricó 120 toneladas de esta varilla para estudio y caracterización.

La producción de este acero de refuerzo agrupa los siguientes procesos: alto horno, convertidor BOF, refinación secundaria en la olla, colada continua y laminación en caliente.

El proceso de fabricación es idéntico al expuesto para la fabricación de acero de palanquilla por el procedimiento de alto horno, solo cambia en que al acero se le adicionan microaleantes en el paso de afinación del convertidor a la olla de colada.

La adición de estos microaleantes se realiza en la olla de colada mediante un proceso de inyección de arrastre de balas del material aleante por medio de una corriente de gas inerte (3). El gas que se usa es generalmente nitrógeno pero se realizan pruebas para inyectar argón. En este procedimiento se lleva a cabo la homogeneización del baño y la introducción del microaleante.

Los elementos microaleantes usados por lo general son niobio, vanadio, titanio y aluminio (9,21,28).

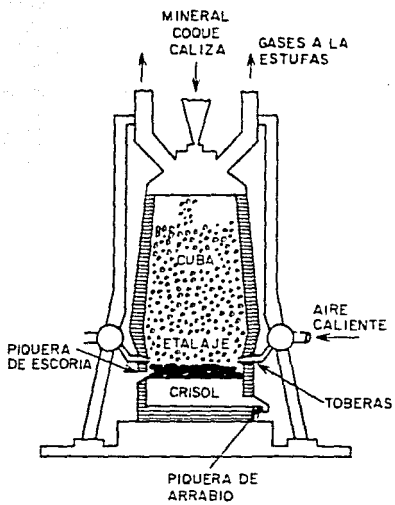
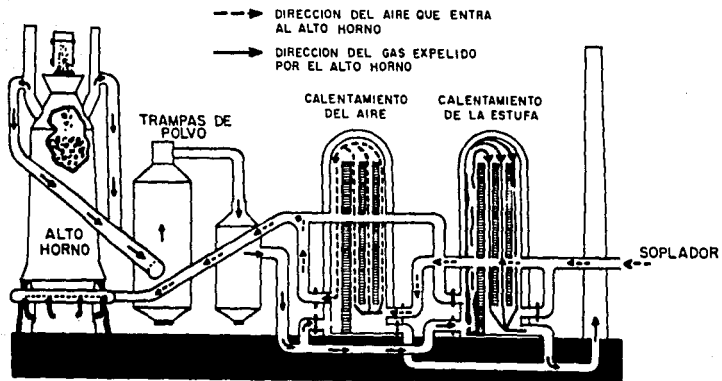


Figura 1. Representación esquemática de un Alto Horno.



ALEXANDER Y STREET, 1985

Figura 2. Sistema de recolección y entrada de gases en una planta de Alto Hornos.

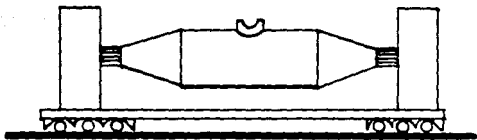


Figura 3. Tren-olla usado en la transportación del arrabio a la planta de aceración.



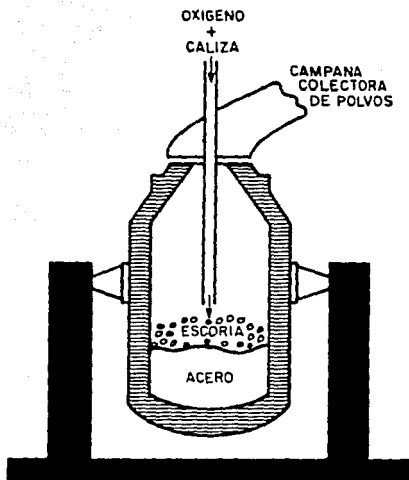


Figura 4. Representación esquemática de un convertidor básico al oxígeno ( BOF ).

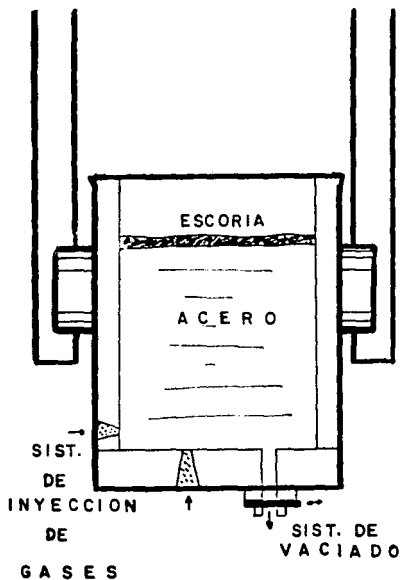


Figura 5. Olla de colada equipada con sistema de inyección de gases y sistema de vaciado de barra móvil.

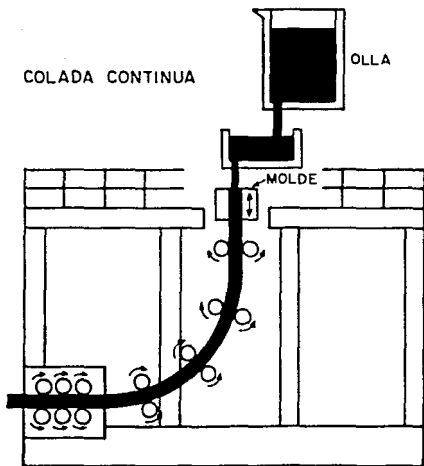


Figura 6. Proceso de colada continua.

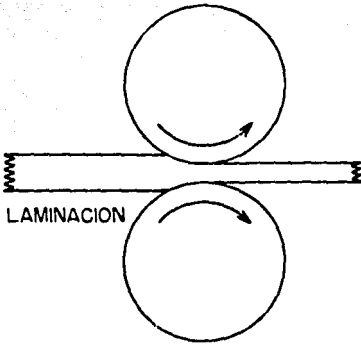


Figura 7. Proceso simple de laminación.

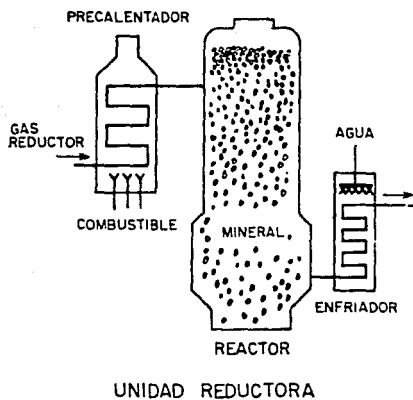


Figura 8. Dibujo esquemático representando una unidad reductora usada en el proceso de reducción directa HYL.

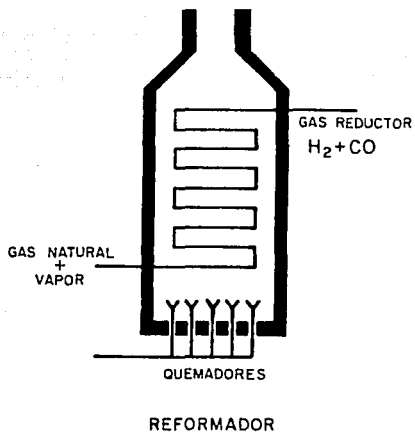
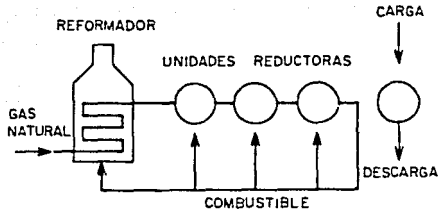


Figura 9. Sistema de reformación de gases del proceso de reducción directa HYL.



PROCESO DE REDUCCION DIRECTA HYL

Figura 10. Sistema de retortas en el proceso de reducción directa HYL.

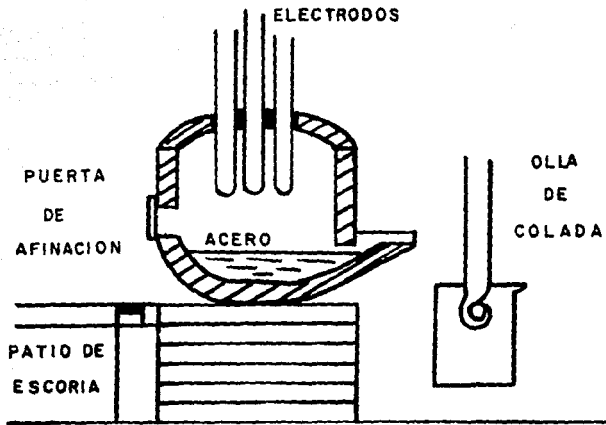


Figura 11. Representación esquemática de un Horno Eléctrico de Arco.



### CAPITULO III

#### PROPIEDADES MECANICAS DEL ACERO DE REFUERZO

En muchas construcciones los materiales empleados son el acero de refuerzo y el concreto. En una estructura formada por estos dos componentes su comportamiento mecánico es el resultado de la combinación de las propiedades tensiles del acero y de la resistencia a la compresión del concreto.

La función del concreto y del acero de refuerzo dentro de una construcción son diferentes pero a la vez son complementarias. El concreto es un material frágil por lo que cuando un edificio es sacudido por un sismo este empieza a formar grietas en su interior debido a que no es capaz de disipar la energía de movimiento que recibe. Es aquí donde interviene el uso del acero de refuerzo, el acero de refuerzo es un material capaz de amortiguar la energía que los sismos transmiten a los edificios mediante el fenómeno de deformación plástica (14,18).

Es por esto que el acero de refuerzo debe poseer los máximos requerimientos para ser usado en la industria de la construcción y así garantizar que el edificio resistiera el efecto destructivo de un sismo y proteger tanto la estructura como a las personas (17,27).

El acero de refuerzo debe reunir las siguientes propiedades:

- a) alta resistencia a la tracción
- b) alta ductilidad
- c) buena soldabilidad
- d) alta tenacidad.

#### RESISTENCIA A LA TENSION

La contribución del acero esta determinada principalmente por sus propiedades mecánicas a la tensión que suelen resumirse en una curva de esfuerzo contra deformación, figura 12, esta curva se obtiene efectuando un ensayo de tracción convencional, la probeta se sujeta a dos mordazas colocadas en la máquina de tracción de manera que se desplazan en dirección longitudinal de la probeta. Al deformarse la probeta, la fuerza va aumentando de forma progresiva y se van midiendo simultáneamente la fuerza y el alargamiento, como se indica en la figura 13. Con los datos de cargas y alargamientos obtenidos se construye la curva de tensión contra deformación (12,16,29).

La tensión se define como la resistencia interna del cuerpo por unidad de área a la fuerza aplicada externamente (12). Esta se determina midiendo la fuerza aplicada y dividiendola entre el área transversal instantánea de la probeta.

$$S = F / A$$

donde S = tensión

F = fuerza aplicada

A = área transversal de la probeta

La deformación unitaria es la relación de la variación en la longitud de la probeta y la longitud inicial de la misma, esta deformación se representa por el símbolo e

$$e = l - l_0 / l_0$$

donde e = deformación unitaria

l = longitud de la probeta

l<sub>0</sub> = longitud inicial de la probeta.

También existe una deformación real la cual representa más fielmente la medida de la deformación de la probeta. Esta se define como la variación en la dimensión lineal dividida por el valor instantáneo de esta dimensión (12). Se representa por el símbolo E.

$$E = \ln ( l / l_0 ) = \ln ( e + 1 )$$

donde E = deformación real

l = longitud de la probeta

l<sub>0</sub> = longitud inicial de la probeta

e = deformación unitaria

En una curva típica de un acero dúctil, se pueden distinguir varios parámetros y zonas importantes que caracterizan a los materiales y en este caso específico a los aceros (12,24,26) :

- a) el límite elástico,
- b) la resistencia última a la tensión,
- c) la ductilidad.
- d) la tenacidad.

En la gráfica de la figura 12, pueden distinguirse cuatro zonas principales: la zona elástica, la zona de deformación de Lüder, la zona de endurecimiento y la zona de inestabilidad plástica.

La zona elástica es el área bajo la curva cuyos límites máximos se encuentran acotados por una tensión llamada límite elástico o resistencia a la fluencia, el cual nos indica el cambio en el comportamiento del material al pasar de un comportamiento elástico a uno plástico. En materiales dúctiles se presenta una meseta debido a la deformación de Lüder llamada planicie de cedencia y se encuentra enseguida de la resistencia de fluencia.

Esta deformación se debe al movimiento de los planos de deslizamiento dentro de los granos en el acero y a las barreras que se oponen a este movimiento como son los límites de grano y defectos cristalinos como inclusiones o vacancias (12).

En la zona elástica se encuentra una recta en la cual la pendiente de la misma nos indica el módulo de Young o módulo de elasticidad, este valor nos da una medida de la rigidez del material, mientras mayor sea el valor del módulo, más pequeña será la deformación elástica resultante de la aplicación de una tensión dada.

Es claro entonces que un acero deba poseer un límite de elasticidad alto y a la vez poseer una amplia planicie de cedencia. Se han establecido cotas inferior y superior del límite elástico de manera que el acero supere un mínimo de resistencia elástica, pero que se pueda asegurar que la cedencia plástica ocurrirá antes de que el esfuerzo sea demasiado alto y pueda provocar la fractura del concreto (13).

La zona de endurecimiento por deformación esta limitada desde el final de la planicie de cedencia si la hay y por la resistencia última a la tracción.

La resistencia última a la tracción es la tensión máxima en la curva de tensión contra deformación, esta nos indica el origen de la formación de un cuello en la probeta, a partir de este punto la deformación plástica ya no es uniforme esto debido a que el área se reduce continuamente, hasta que se rompe la probeta. Este período entre la resistencia última a la tensión y la ruptura se denomina zona de inestabilidad plástica.

El hecho de que aparezca una zona plástica radica en que al deformarse el acero este se empieza a endurecer y tiende a un comportamiento de un material frágil (12).

En la deformación plástica del acero, cuando se encuentra en la etapa de endurecimiento por deformación, es lo suficientemente grande como para prever que a esas alturas ya el concreto se estaría desmoronando a su alrededor en el evento de un terremoto. Por lo que se considera de gran importancia que el acero exhiba en su curva de esfuerzo contra deformación las mayores elongaciones uniforme y de fractura posibles (11,27).

Dentro de la curva de esfuerzo contra deformación existen los parámetros denominados elongación uniforme y elongación de fractura. La elongación uniforme es la deformación total desde el inicio de la zona elástica hasta la resistencia última a la tracción. Y la elongación de fractura es la deformación desde el inicio de la zona elástica y la resistencia a la ruptura (12).

La ductilidad y la tenacidad de un material se cuantifican en relación a la curva de esfuerzo contra deformación.

La ductilidad es una medida de la capacidad del acero para deformarse plásticamente. En este caso la ductilidad se cuantifica empleando el concepto de elongación uniforme. Los aceros son más dúctiles en la medida que su planicie de cedencia es más amplia (12,26,27), como lo indica la figura 14.

La tenacidad es la capacidad de los materiales para disipar energía al deformarse plásticamente. Una medida de la tenacidad es el área bajo la curva de esfuerzo contra deformación, que es la energía por unidad de volumen que el acero disipa al deformarse plásticamente (12,26).

La curva de esfuerzo contra deformación es característica de cada acero y depende de la composición química del acero, figura 15, y de la temperatura a la cual se realice el ensayo de tracción. Es por esto que existen elementos que ayudan a incrementar las propiedades de ductilidad y tenacidad de los aceros como son el cromo, níquel, vanadio, titanio etc. (23,25,28,35). La zona de Lüder es también una función de la composición química del acero.

## RESISTENCIA AL IMPACTO

Este ensayo nos permite determinar la energía que absorbe el acero al fracturarse subitamente como función de la temperatura.

El ensayo de impacto se realiza con probetas especiales, de dos tipos principales: Charpy e Izod (12). La probeta Charpy y la probeta Izod son de sección transversal cuadrada y tienen en uno de sus costados una entalla en forma de V o de U. La entalla en la probeta Charpy se encuentra a la mitad de la probeta mientras que en la probeta Izod se encuentra a una cuarta parte de la probeta. El ensayo de impacto se realiza por lo general con el uso de la probeta Charpy (12).

La máquina en la cual se realiza el ensayo de impacto es básicamente un péndulo con un peso determinado, la probeta se apoya horizontalmente por sus dos extremos como una viga y la carga se aplica por el choque del péndulo cuyo impacto se produce por el lado opuesto de la entalla, obligando a la probeta a flexionarse y romperse, figura 16.

La respuesta de la probeta al ensayo de impacto se mide usualmente por la energía absorbida en la ruptura de la probeta a la temperatura de ensayo. Este ensayo se realiza a diferentes temperaturas obteniéndose diferentes datos acerca de la energía absorbida.



Con estos datos se construye una curva de energía absorbida contra temperatura, la forma de la curva es representada en la figura 17.

Se puede observar que tiene la forma de una S en donde el punto donde cambia de concavidad es el cambio entre un comportamiento frágil a dúctil, este punto está caracterizado por la temperatura de transición frágil-dúctil (12).

Un dato más que proporciona este ensayo es la morfología de la superficie de la fractura a través de la entalla, esta fractura según las características físicas que presente nos da también una idea de la transición frágil-dúctil (12,26,28). El método para medir el porcentaje de fractura frágil es el de comparación entre la fractura obtenida en el ensayo y un patrón de fotografías estándar.

Una fractura se define como la separación o fragmentación de un cuerpo sólido en dos o más partes bajo la acción de una tensión (12). Las fracturas se clasifican en dúctiles y frágiles.

Una fractura dúctil se caracteriza físicamente por que la superficie de esta presenta una forma como de desgarramiento de tipo granular y la superficie no tiene brillo sino que es más bien opaca. Una fractura frágil presenta planos de cizallamiento o de corte, ángulos definidos y una superficie brillante.

Este ensayo de impacto es característico para cada acero por lo que la composición química tiene una función importante en el caso de la determinación de la temperatura de transición. Otros factores que alteran la curva son la forma del entallamiento de la probeta y el tipo de carga que da lugar a distintos estados de tensiones.

En general los criterios empleados para determinar la temperatura de transición se basan en la variación de la energía absorbida, cambio de aspecto de la superficie de fractura, o tránsito en la ductilidad medida por la contracción en el fondo de la entalla. El más conveniente para seleccionar la temperatura de transición consiste en comprobar si coincide con la observada durante el comportamiento en el servicio.

## ENSAYO DE DOBLEZ

Este ensayo nos da una idea de la ductilidad de un material cuando se le deforma a determinados radios de curvatura.

En el caso del doblado de varillas, la máquina de prueba consiste básicamente en dos apoyos cilíndricos giratorios de separación regulable y un mandril central cambiable, que ejerce una presión sobre la probeta mediante un desplazamiento vertical, como se indica en la figura 18.

La dimensión de la probeta usada en este ensayo es de un metro aproximadamente y se coloca en el soporte sujetando los extremos con unas mordazas y aplicando una carga sobre la varilla en el centro de la misma mediante el mandril, el cual tiene la facilidad de cambio de su cabezal por uno de mayor o menor radio de curvatura. Bajo la acción de esta fuerza la varilla se dobla a diferentes ángulos de doblado. El radio mínimo de doblado suele expresarse en múltiplos del diámetro de la varilla (30).

El estado de tensiones que se producen en el doblado son de dos tipos: un estado de tensión en tracción que se presenta en la superficie externa al ángulo de doblez y un estado de tensión en compresión en la parte interna al ángulo de doblez.

En el interior del material existe una zona neutra en la cual el material no es deformado drásticamente con respecto a las superficies externas en el doblado. Este eje neutro está en función del diámetro de la varilla y del ángulo de doblado.

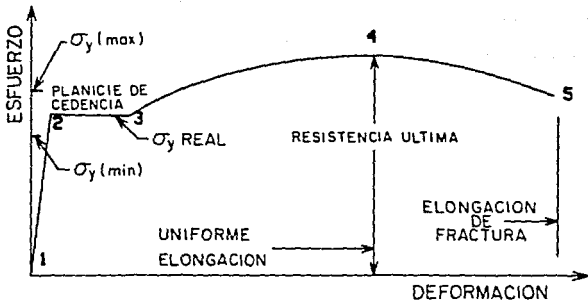


Figura 12. Curva de esfuerzo contra deformación de un material medianamente dúctil mostrando las siguientes zonas:  
 1-2, comportamiento elástico  
 2-3, deformación de Líder o Planicie de cedencia  
 3-4, zona de endurecimiento por deformación  
 4-5, zona de inestabilidad plástica.

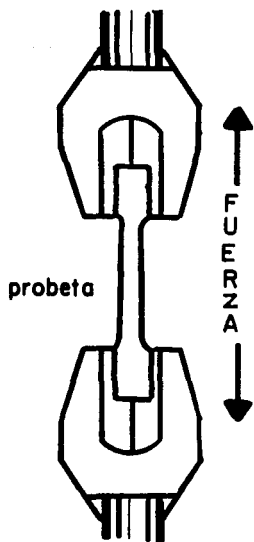


Figura 13. Ensayo de tracción convencional.

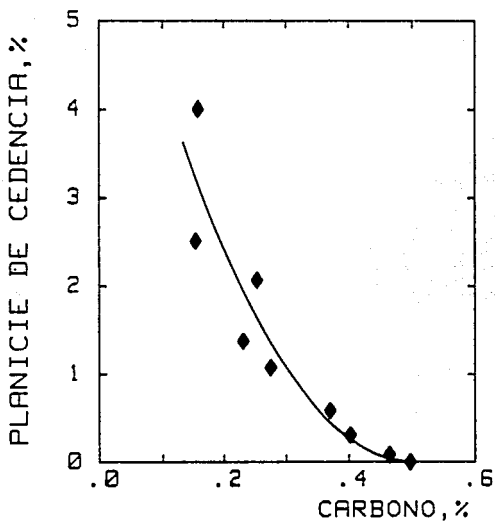


Figura 14. Relación entre el porcentaje de carbono y el porcentaje de la planicie de cedencia en la curva de esfuerzo contra deformación.

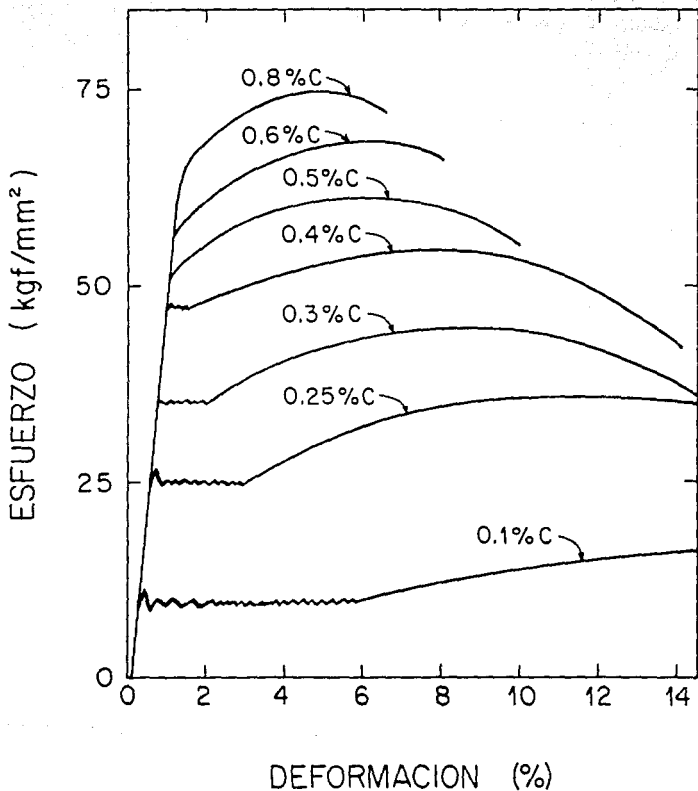


Figura 15. Forma de la curva de esfuerzo contra deformación como función del porcentaje de carbono del acero.



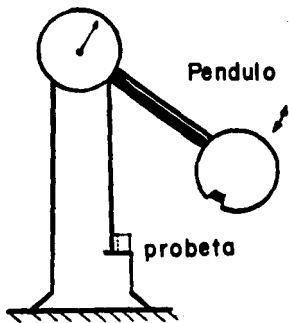


Figura 16. Ensayo de impacto.

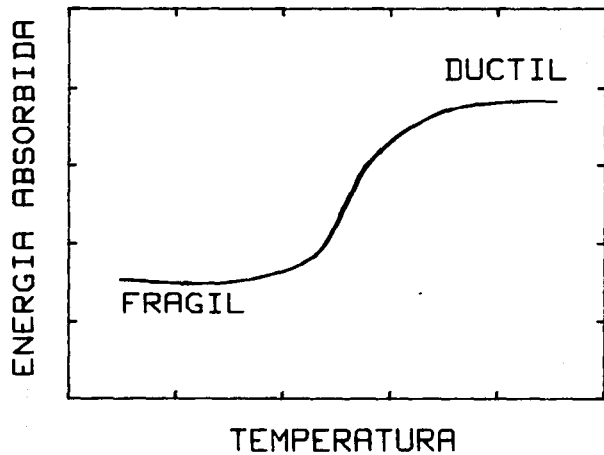


Figura 17. Curva característica de un ensayo de impacto.

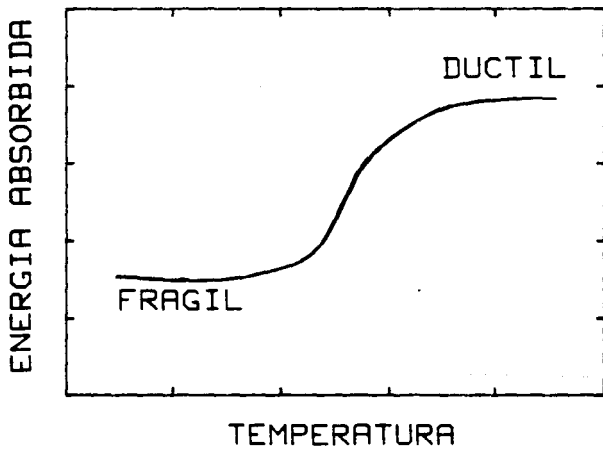


Figura 17. Curva característica de un ensayo de impacto.

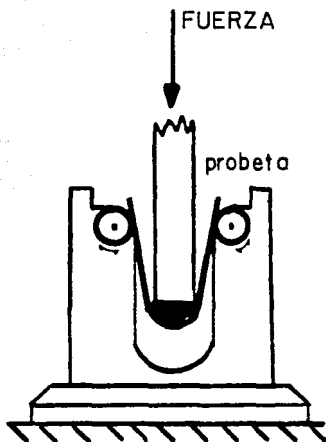


Figura 18. Ensayo de dobléz.

## PROPIEDADES MECANICAS DE LOS ACEROS DE REFUERZO

### 1) NOM-B-6, aceros de palanquilla de medio carbono

En esta norma (31) no se especifica una composición química definida, solo se recomienda que el porcentaje de fósforo no sobrepase el 0.05% . La composición típica de un acero de esta clase esta reportada en la tabla A.

De acuerdo a la composición química de este acero se encuentra ubicado en el diagrama de fases hierro-carbono, como un acero hipoeutectoide con un porcentaje de 85 a 90 por ciento de fase perlítica y el restante fase ferrítica, figura 20a.

Las propiedades mecánicas en este acero se deben al alto porcentaje de carbono que contiene.

<u>PROPIEDAD</u>	<u>VALOR</u>	<u>UNIDAD</u>
límite de fluencia (LF)		
mínimo	42	kgf/mm <sup>2</sup>
máximo	*	*
resistencia a la tracción (RT)		
mínimo	63	kgf/mm <sup>2</sup>
relación RT/LF	1.5	*
ductilidad (200 mm)	7 a 9	%

## 2) NOM-B-18, aceros de planquilla de riel

En esta norma (32) no se especifica una composición química definida, solo se dice que debe ser hecha exclusivamente con rieles de tren. La composición química típica de un acero de esta clase se representa en la tabla A.

Este tipo de acero presenta una microestructura de un acero hiper-eutectoide, en la cual se encuentra principalmente fase perlítica y carburo de hierro como cementita.

Sus propiedades mecánicas en este caso se deben al alto contenido de carbono que contiene.

PROPIEDAD	VALOR	UNIDAD
límite de fluencia (LF)		
mínimo	42	kgf/mm <sup>2</sup>
máximo	*	*
resistencia a la tracción (RT)		
mínimo	63	kgf/mm <sup>2</sup>
relación RT/LF	1.5	*
ductilidad ( 203.2 mm)	4.5 a 5	%

### 3) NDM-B-32, aceros de eje

Este tipo de acero (33) es similar al acero de riel en cuanto a composición química, es un acero hipereutectoide con un alto porcentaje de fase perlítica y fase cementita.

Sus propiedades mecánicas están en función del alto contenido de carbono.

PROPIEDAD	VALOR	UNIDAD
límite de fluencia (LF)		
mínimo	42	kgf/mm <sup>2</sup>
máximo	*	*
resistencia a la tracción (RT)		
mínimo	63	kgf/mm <sup>2</sup>
relación RT/LF	1.5	*
ductilidad (203.2 mm)	7	%

### 4) NDM-B-294, aceros torcidos en frío

En esta norma (34) no se especifica el porcentaje de carbono ni una composición química definida, por lo general este acero presenta una composición similar a un acero de bajo carbono como un 1015, una composición típica se muestra en la tabla A.

Este tipo de acero presenta una microestructura de granos alargados en dirección a la deformación en la cual se realizó el proceso de estirado de la barra.

El proceso de endurecimiento mecánico en frío (12) puede entenderse como si una barra fuera estirada de manera que alcanza el punto A en la curva de esfuerzo contra deformación mostrada en la figura 19. En este punto se retira la carga de la barra la cual queda deformada plásticamente y con la resistencia a la tensión que corresponde al punto A. Cuando la barra se estira nuevamente su límite elástico es el valor del esfuerzo en el punto A y la deformación plástica procede conforme al resto de la curva. Este aumento en la resistencia es perjudicial debido a que se pierde completamente la planicie de cedencia y con ella la ductilidad del acero (11,12,27,29).

PROPIEDAD	VALOR	UNIDAD
límite de fluencia (LF)		
mínimo	42	kgf/mm <sup>2</sup>
máximo	*	*
resistencia a la tracción (RT)		
mínimo	52	kgf/mm <sup>2</sup>
relación RT/LF	1.23	*
ductilidad ( 203.2 mm)	8	%



## 5) NDM-B-457, acero de palanquilla microaleado

Esta norma (35) especifica una composición química con valores máximos en los elementos aleantes de: 0.3 por ciento de carbono, 1.5 por ciento de manganeso, 0.5 por ciento de silicio, 0.035 por ciento de fósforo, 0.045 por ciento de azufre y elementos tales como cobre, níquel, cromo, molibdeno, vanadio, niobio, titanio y circonio. La composición típica de este acero se representa en la tabla A.

El acero presenta una microestructura hipoeutectoide con aproximadamente 60 por ciento de fase ferrítica y el resto fase perlítica, figura 20b.

Las propiedades mecánicas de este acero se deben al efecto combinado del endurecimiento por precipitación y el tamaño de grano pequeño provocado por los elementos microaleantes.

Los microaleantes son elementos que agregados en cantidades muy pequeñas, cientos de partes por millón, inducen la formación de precipitados coherentes en la red cristalina del acero. El niobio, el vanadio y el titanio son elementos que se usan frecuentemente porque forman carburos o carbonitruros en la red cristalina del acero e incrementan notablemente las propiedades mecánicas del acero, en especial la resistencia a la tracción (13,21,23,28).

Por otro lado estos mismos precipitados inhiben el crecimiento de grano durante el proceso de recristalización en el laminado en caliente (10), lo cual ayuda a que el acero posea una microestructura de grano fino. Con el grano fino se aumenta la resistencia del acero y se aumenta la ductilidad (12). Estas propiedades se resumen en la siguiente ecuación (12):

$$S = S_i + K_y \cdot D^{-1/2}$$

donde S : límite elástico

S<sub>i</sub>: tensión de fricción que se opone al movimiento de las dislocaciones

K<sub>y</sub>: medida de la extensión del apilamiento de dislocaciones frente a las barreras.

D : diámetro del grano

PROPIEDAD	VALOR	UNIDAD
límite de fluencia (LF)		
mínimo	42	kgf/cm <sup>2</sup>
máximo	55	kgf/cm <sup>2</sup>
resistencia a la tracción (RT)		
mínimo	56	kgf/cm <sup>2</sup>
relación RT/LF	1.25	*
ductilidad (200 mm)	12 a 14	%

**TABLA A**

NORMA DEL ACERO	PORCIENTO EN MASA						
	C	Mn	Si	P	S	Ni	V
B-6	0.44	1.80	0.31	0.014	0.03	*	*
B-18 , B-32	0.78	0.90	0.14	0.026	0.03	*	*
B-294	0.15	0.45	0.20	0.040	0.05	*	*
B-457	0.24	1.28	0.31	0.014	0.03	0.04	0.04

Como se puede observar no existe una homogeneidad en los aceros de refuerzo fabricados en México por lo que se anexan gráficas en las que se puede observar el comportamiento mecánico de cada uno de los acros de refuerzo, figuras 21,22,23,y 24.

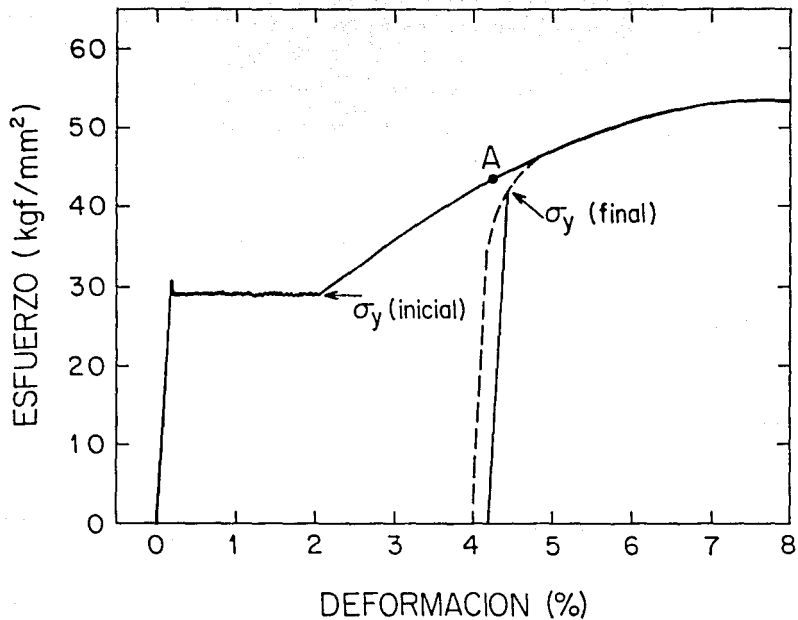


Figura 19. Fenómeno de endurecimiento de un acero deformado en frío.

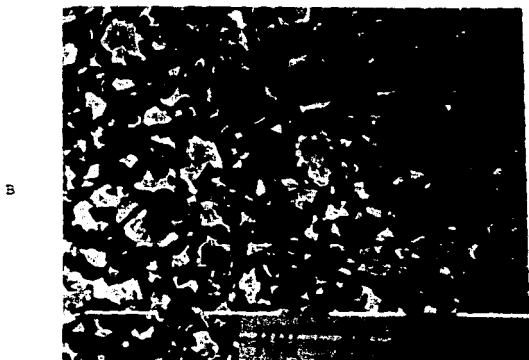
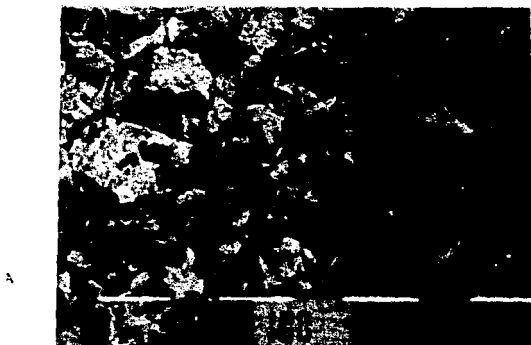


Figura 20. Microestructuras de los aceros de refuerzo en estudio:  
a) palanquilla de medio carbono, 100X  
b) palanquilla microaleada, 100X

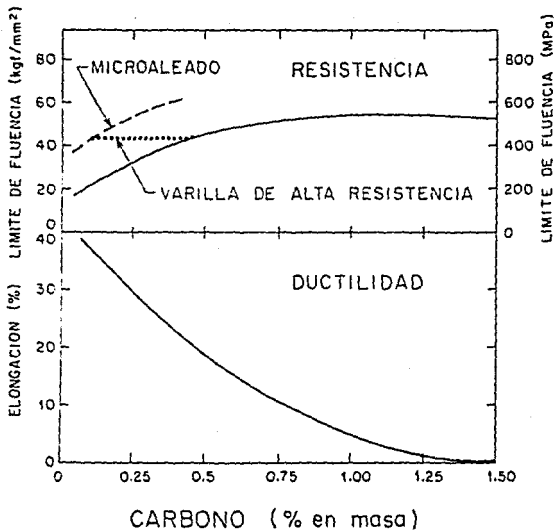


Figura 21. Efecto del carbono en las propiedades mecánicas del acero.

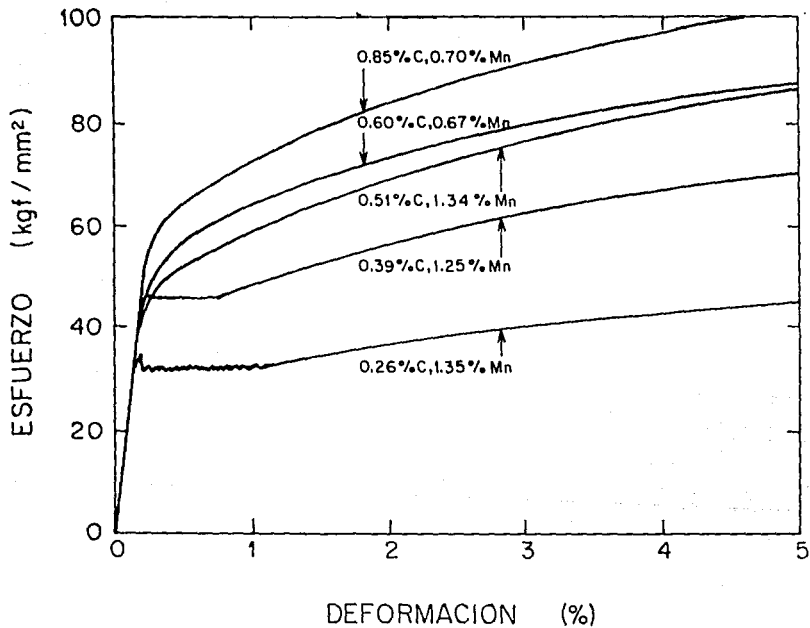


Figura 22. Curvas de esfuerzo contra deformación en diferentes tipos de aceros

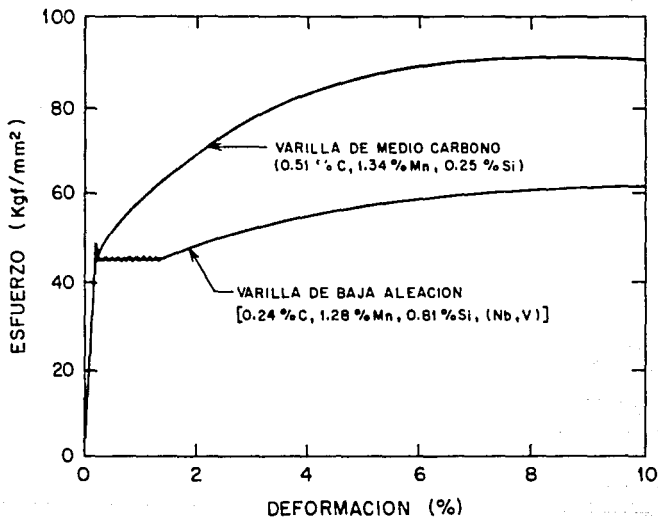


Figura 23. Comparación entre un acero de refuerzo de palanquilla de medio carbono y uno microaleado en la forma de la curva de esfuerzo contra deformación.



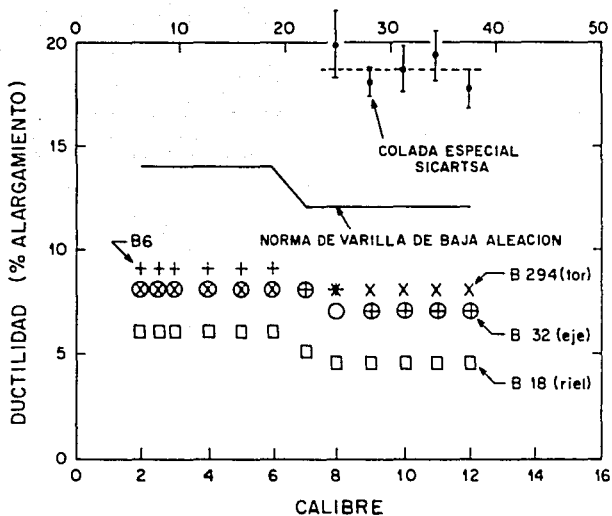


Figura 24. Comparación de la ductilidad de los aceros de refuerzo con respecto al calibre de la varilla.

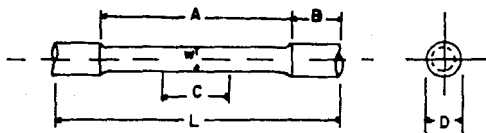
## EXPERIENCIAS EN EL ENSAYO DE TRACCION

Estas pruebas se realizaron en una máquina INSTRON de 10 toneladas de capacidad ubicada en el Instituto de Investigaciones Eléctricas ( IIE ) en Cuernavaca, Morelos. Las probetas fueron maquinadas de un acero de refuerzo de medio carbono de calibre 12 de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-B-310-1981, las dimensiones son descritas en la figura 25.

La gráfica de esfuerzo contra deformación obtenida en el ensayo de tracción efectuado en la máquina INSTRON es la representada en la figura 26 ,los datos obtenidos son representados en la tabla B.

En la gráfica se encuentran los siguientes puntos: el punto A en donde el acero se comporta elásticamente, esto es representado graficamente por una línea recta; en el punto B el acero pierde sus características elásticas y empieza a deformarse plásticamente, este punto se conoce como resistencia a la fluencia, en la gráfica se observa además que no existe planicie de cedencia debido al alto porcentaje de carbono contenido. En el punto C se encuentra la resistencia máxima a la tensión , en donde el material pasa de una deformación uniforme a un estado de inestabilidad plástica, esto es representado por la formación de un cuello en la parte media de la probeta.

Esta inestabilidad plástica es debida a que el área transversal de la probeta se reduce conforme se aplica más carga, por lo que esta deformación no se compara con la deformación hasta la resistencia última a la tensión. En el punto D el material alcanza su resistencia a la fractura y el acero se rompe, la superficie de la fractura obtenida es brillante, por medio de una observación con un microscopio de barrido se observan dos zonas dentro de la fractura, la primera se encuentra en el centro de la probeta y se caracteriza por planos de cisallamiento y de clivaje figura 27; la segunda se encuentra en los bordes de la fractura y es del tipo dúctil por el desgarramiento de los granos.



A = 48 mm.

B = 15 "

C = 25.4 "

D = 11 "

L = 78 "

w = 7 "

Figura 25. Dimensiones de las probetas usadas en el ensayo de tracción realizado en el laboratorio.

TABLA B  
ENSAYO DE TRACCION

CARGA (KGF)	ELONGACION (MM)	CARGA (KGF)	ELONGACION (MM)
0	0.000	1800	0.250
100	0.010	1900	0.390
200	0.015	2000	0.425
300	0.020	2100	0.550
400	0.025	2200	0.620
500	0.030	2300	0.700
600	0.032	2400	0.810
700	0.049	2500	0.955
800	0.050	2600	1.100
900	0.051	2700	1.250
1000	0.052	2800	1.450
1100	0.053	2900	1.750
1200	0.075	3000	2.300
1300	0.076	3020	3.150
1400	0.080	2650	5.260
1500	0.082		
1600	0.085		
1700	0.150		

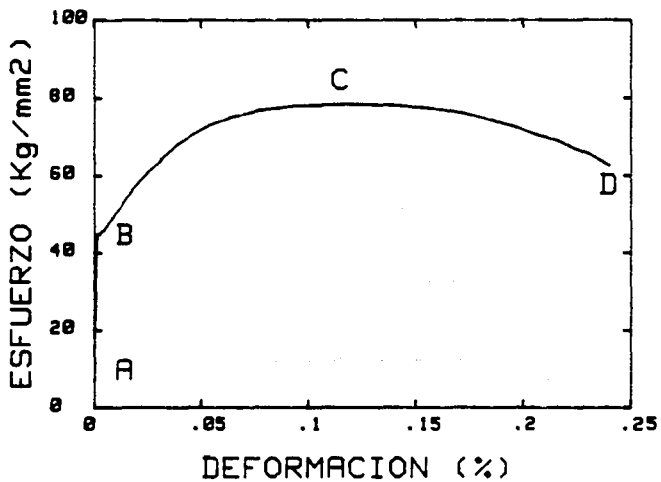
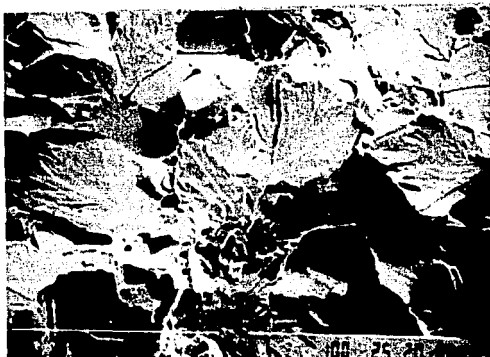
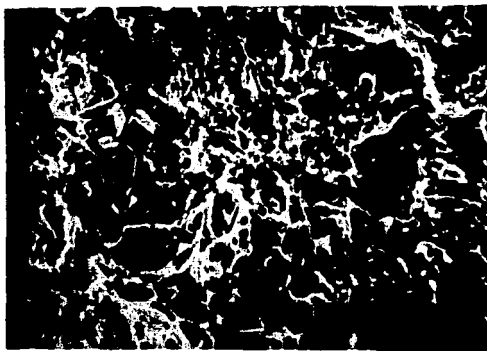


Figura 26. Gráfica obtenida en el ensayo de tracción realizado en el laboratorio.



A



B

Figura 27. Fractura obtenida en las probetas de tracción:  
a) frágil y b) de desgarre.

## EXPERIENCIAS EN EL ENSAYO DE IMPACTO

Esta prueba se realizó con un péndulo de cinco kilogramos y con una escala de energía de hasta 50 Joules, el aparato se encuentra en el Instituto de Investigaciones Eléctricas en Cuernavaca, Morelos. Las dimensiones de la probetas usadas están de acuerdo a la norma ASTM A-370 las cuales son especificadas en la figura 28.

El tipo de acero de refuerzo usado en este ensayo fue de palanquilla de medio carbono en calibres 8, 10 y 12. Los resultados de este ensayo se reportan en la gráfica de la figura 29. Los datos experimentales se muestran en la tabla C.

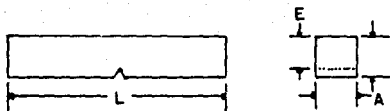
En la gráfica se observa que la temperatura de transición dúctil-frágil de este acero en cualquier calibre está por encima de los 50°C.

De acuerdo al diagrama de por ciento de carbono contra calibre de varilla representados en la figura 30a, se observa que el diámetro de varilla que posee el por ciento de carbono más alto es de calibre 12. En la gráfica se observa que el calibre 12 tiende a una temperatura de transición mayor que los otros dos calibres, el calibre 8 y 10 presenta un cruceamiento en su comportamiento pero se puede decir que su tendencia es a que el calibre 8 posea una temperatura de transición menor.



Debemos tomar en cuenta que existen variables que afectan este comportamiento como son: el porcentaje de azufre, figura 30b ya que el azufre fragiliza al acero, otro es el hecho de que la temperatura de la probeta no se encuentra a una temperatura uniforme desde su centro a la superficie, se puede mencionar además que la temperatura a la que se toma la lectura de la probeta es diferente a la temperatura a la que se realiza el ensayo.

El tipo de fractura obtenida en todos los calibres a las temperaturas de ensayo muestran una estructura de fractura frágil, esta estructura es caracterizada en la figura 31 en la cual se observan perfectamente los planos de clivaje.



A = 6 mm.  
E = 4 "  
L = 55 "

Figura 28. Dimensiones de las probetas Charpy empleadas en el ensayo de impacto realizado en el laboratorio.

TABLA C  
PRUEBA DE IMPACTO. PROBETA CHARPY

DIAMETRO DE VARILLA 1 PULGADA

PROBETA	VOLTAJE (MV)	TEMPERATURA ( C )	ENERGIA ABS.(J)
1	----	25	4.25
2	- 3.5	-74	0.58
3	- 13	-13	2.10
4	10	45	7.48
5	0.5	33	7.50
6	- 0.7	3	3.45

DIAMETRO DE VARILLA 1 1/4 PULGADAS

PROBETA	VOLTAJE (MV)	TEMPERATURA ( C )	ENERGIA ABS. (J)
1	----	25	7.50
2	- 3.5	-74	0.65
3	- 0.7	3	1.45
4	- 13	-13	1.30
5	0.5	33	6.50
6	10	45	9.00

DIAMETRO DE VARILLA 1 1/2 PULGADAS

PROBETA	VOLTAJE (MV)	TEMPERATURA ( C )	ENERGIA ABS. (J)
1	----	25	3.60
2	- 3.5	-74	0.55
3	- 13	-13	1.55
4	10	45	4.50
5	- 0.7	3	1.85

# ENSAYO DE IMPACTO

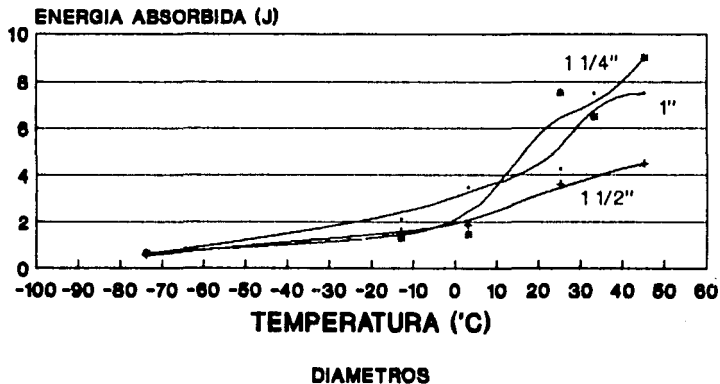


Figura 29. Gráfica obtenida en el ensayo de impacto realizado en el laboratorio con tres diferentes calibres de varilla de palanquilla de medio carbono.

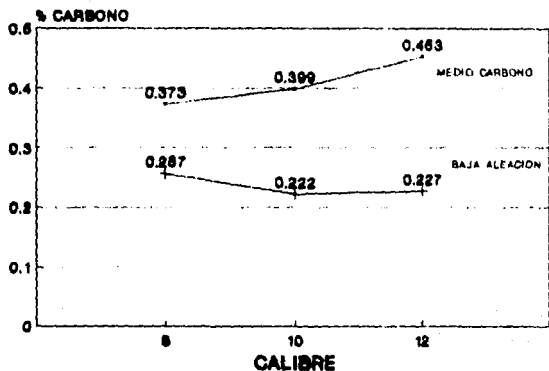
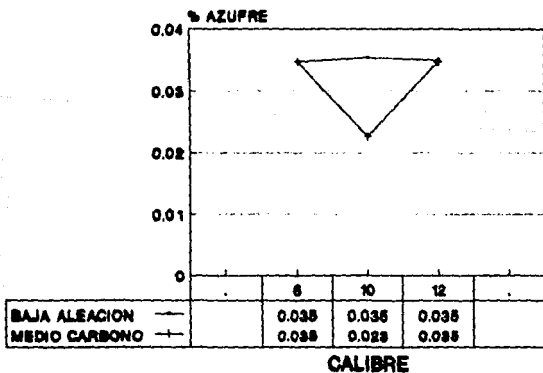


Figura 30. Graficas de porcentaje de carbono y azufre en un acero de refuerzo de medio carbono y uno de baja aleación.



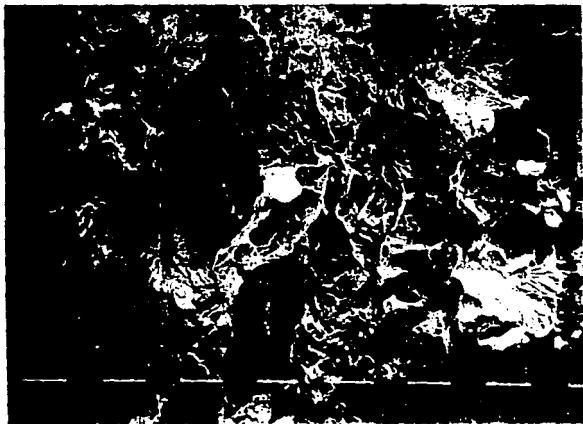


Figura 31. Fractura obtenida en los ensayos de impacto realizados con aceros de medio carbono.

## EXPERIENCIAS EN EL ENSAYO DE DOBLEZ

Este ensayo se realizó con una muestra de varilla de medio carbono calibre 12 grado R-42 comercial, se dobló a un ángulo de 90 grados. Este doblado se cortó a la mitad por el plano transversal al doblado. Se preparó la superficie para medir la dureza a través de la superficie. La dureza se midió en la escala de Dureza Rockwell B, con penetrador esférico de 1/16 de pulgada, a una carga de 100 kilogramos y tiempo de aplicación de la carga de 20 segundos. Los resultados son representados en las figuras 32a,b,c.

En las gráficas anteriores se aprecia que las zonas de máxima deformación se encuentran en los extremos exterior e interior al doblado. Esto se debe a que la zona exterior al doblado está sometida a un estado de tensiones, mientras que la zona interna al doblado presenta un estado de compresión.

En el centro de la varilla la dureza permanece sin cambios, un análisis microestructural de estas zonas mostró la formación de microgrietas en la zona de tensión, figura 33 y un aplastamiento de los granos perlíticos en la parte interna al doblado.

En la planta de Michoacán se realizó el ensayo de dobléz de acuerdo a la Norma Mexicana NOM-H-113-1981, se probaron varillas de medio carbono y varillas microaleadas. Los resultados se observan en la figura 34, la varilla de medio carbono no soporto un dobléz de más de 90 grados y se fracturo mientras que la microaleada soporto cualquier tipo de dobléz.

La microestructura y el tamaño de grano en los aceros de refuerzo son un factor importante en la ductilidad del acero. Las fases dúctiles como la ferrita favorecen la ductilidad del acero mientras que la perlita la disminuye debido a que es un microconstituyente compuesto de ferrita y carburo de hierro el cual es bastante frágil.



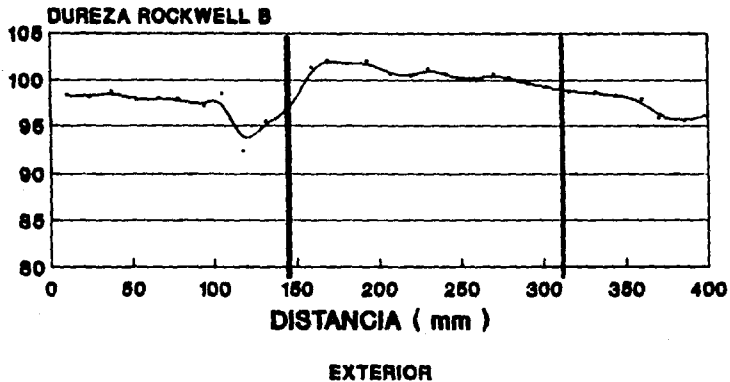
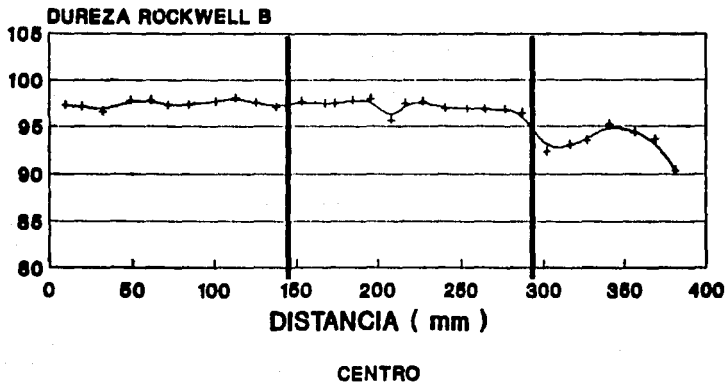
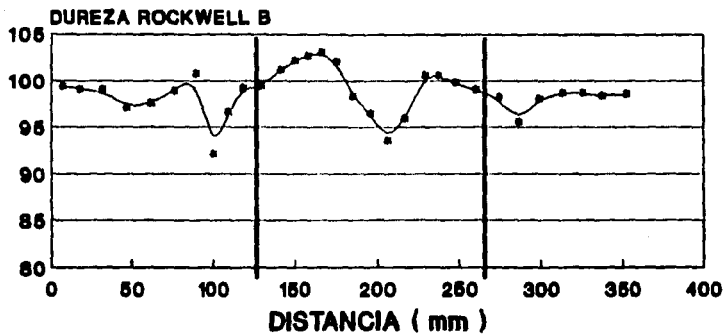


Figura 32. Distribución de durezas a lo largo de una varilla de medio carbono doblada a 90°  
 a) exterior al dobléz, b) centro, c) interior al dobléz.





**INTERIOR**

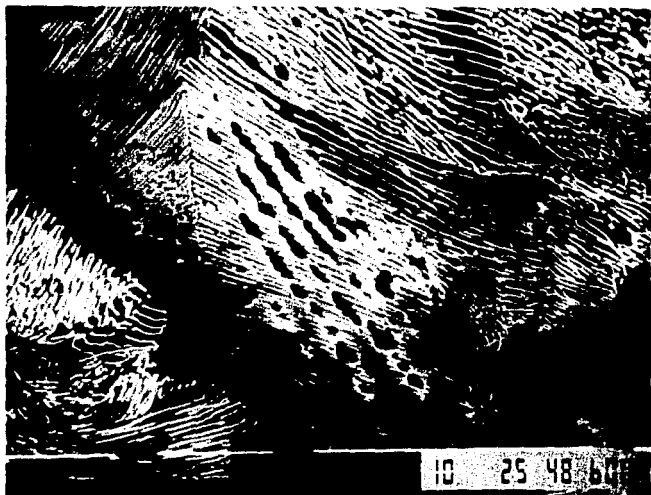
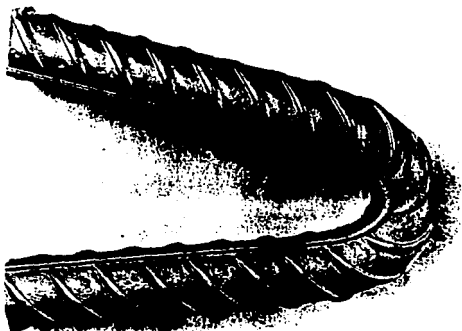


Figura 33. Microestructura encontrada en una varilla de medio carbono doblada a  $90^\circ$ , mostrando la -  
formacion de microgrietas dentro de los granos  
de perlita perpendiculares a la direccion del  
doblez.



A-1



A-2

Figura 34. Prueba de doblez efectuada a varillas de calibre 12 a dos distintos radios de doblez: 1-radio=diametro, 2-radio= $\frac{1}{2}$ diametro; sobre A-palanquilla microaleada y B-palanquilla de medio carbono.



B-1



B-2

## CAPITULO IV

### SOLDABILIDAD

La soldabilidad se refiere a la nobleza de un material para ser unido a otro material similar por medio de una soldadura de manera que a través de la unión exista el máximo de continuidad en las propiedades mecánicas del material (41,42,43,48).

La soldabilidad depende de:

- a) la composición química del acero
- b) el método de soldadura empleado
- c) el tipo de uniones para realizar la soldadura
- d) el tipo de electrodo usado
- e) la calificación profesional de los soldadores
- f) la supervisión del proceso de soldadura

Los métodos empleados para llevar a cabo la soldadura se clasifican en: soldadura con soplete, soldadura por resistencia eléctrica, soldadura por arco eléctrico y soldaduras especiales.

En la soldadura por arco eléctrico, el arco eléctrico se establece poniendo en contacto el electrodo y la pieza a soldar.

Al principio del proceso de soldadura el voltaje del arco tiene que vencer la barrera del aire que tiene una gran resistencia , pero una vez iniciado, los gases de la barrera se ionizan y se hacen conductores, de tal forma que la resistencia se invierte y queda el sistema electrodo-pieza en un estado de corto circuito, una vez iniciada la corriente se separa el electrodo ligeramente (37,38,39).

Antes de efectuar el proceso de soldadura con arco eléctrico se deben preparar las superficies de las piezas a soldarse, esta preparación consiste en biselar las piezas y limpiar las superficies de grasa, oxidos y polvo. El objeto de biselar las piezas es que exista una superficie de amarre mayor entre la pieza y la soldadura . Los biseles (42,51) mas usados son del tipo de bisel en V, doble V y a tope, como se ilustra en la figura 35.

El tipo de soldadura (42,51) que se va a realizar entre dos superficies depende de la forma de las piezas a soldar, si son láminas, varillas, placas etc. Dentro de estos tipos se encuentran la soldadura a tope, la soldadura en ángulo, la soldadura de tapón, la soldadura a solape, la soldadura de borde, la soldadura por puntos, la soldadura de costura y el recargue de soldadura, figura 36.



En la soldadura a tope esta puede ser abierta o cerrada según sea el grosor de las chapas a soldar y el método de soldadura empleado.

La soldadura en ángulo se efectúa en las esquinas de las uniones en T.

La soldadura de tapón es un método de unir a tope dos chapas haciendo un agujero en una de ellas y rellenandolo con soldadura.

La soldadura a solape es una variante de la soldadura en ángulo en donde se procura que el cordón de soldadura tenga su pie igual al grosor de las chapas.

La soldadura de borde es un cordón de soldadura depositado sobre los bordes colocados a raz de dos chapas adosadas, solo se unen chapas finas con soldadura de borde.

La soldadura por puntos es una soldadura de pequeña extensión que une dos o más chapas y es efectuado con un equipo de soldadura por puntos.

La soldadura de costura, es una sucesión de soldaduras por puntos a solape.

El recargue de soldadura consiste en aumentar el grosor de una pieza mediante el depósito de material de aportación, usualmente se hace depositando cordones de soldadura unos sobre otros.

La soldadura de varillas se realiza comúnmente por medio del procedimiento con arco eléctrico usando un electrodo recubierto, como se ilustra en la figura 37.

Los electrodos deben ser seleccionados de acuerdo con el nivel de resistencia del acero y a las condiciones físicas del medio ambiente en donde se realizará la soldadura. Los tipos de electrodos se clasifican de acuerdo a su resistencia última a la tensión (37,51).

Para seleccionar si un acero de refuerzo posee buena soldabilidad se emplea un estándar establecido por el Comité Europeo del Concreto (48), en el cual se definen en un diagrama de carbono contra carbono equivalente tres niveles de soldabilidad, este diagrama es representado en la figura 38.

El carbono equivalente (24,26,49) es una función empírica que sintetiza el efecto de los elementos aleantes en la soldabilidad del acero y esta dada por la relación empírica:

$$CE = \%C + \%Mn/6 + \%Si/6 + \%Cu/40 + \%Ni/20 + \%Cr/10 + \%Mo/50 + \%V/10$$

Donde el porcentaje de cada elemento debe ser expresado como porcentaje en masa.

En este diagrama de carbono contra carbono equivalente se encuentran tres zonas importantes. En la región marcada con la letra C se localizan las composiciones químicas de los aceros que son recomendables para soldadura.

En la región B la soldabilidad de estos aceros es todavía aceptable siempre y cuando se tengan algunos cuidados en el control de las temperaturas de procedimiento y entre pasadas. En la región A se encuentran los aceros cuya soldadura falla con demasiada frecuencia debido al exceso de carbono.

La calificación profesional de los soldadores debe verificarse periódicamente porque representa un aspecto crítico en los procesos de soldadura. En muestras recogidas en edificios derrumbados por los sismos de Septiembre se encontraron uniones soldadas en las que había ausencia de biseles, escases de material de aporte y la presencia de poros y cavernas de gran tamaño lo que provocaron fragilidad en las estructuras de acero (50).

La supervisión del proceso de soldadura debe ser continua y apoyarse con una labor de inspección externa con la ayuda de aparatos de rayos X, o bien mediante pruebas destructivas como ruptura en tensión, doblez y análisis metalográfico.

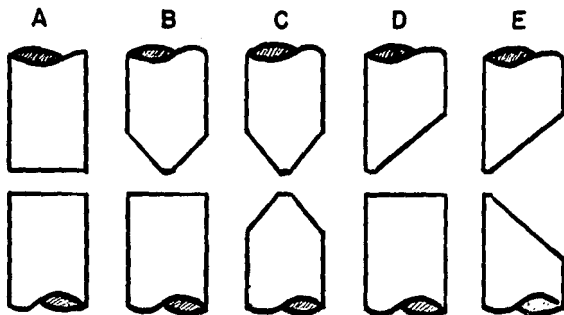


Figura 35. Tipos de bisel: a) de tope , b) doble en media V ,  
 c) doble en V , d) de media V , e) de V.

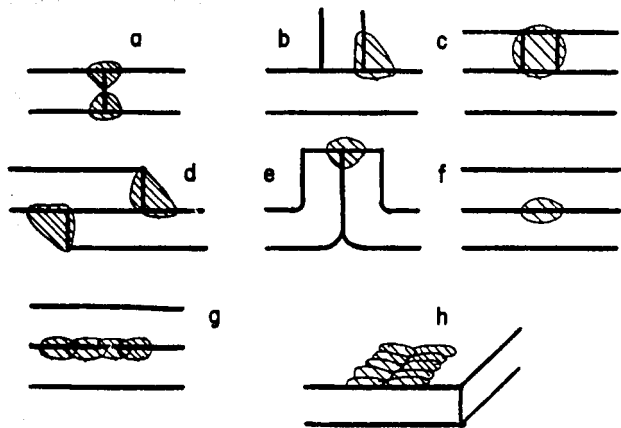


Figura 36. Tipos de soldaduras: a) a tope, b) en ángulo, c) de tapón, d) a solape, e) de borde, f) por puntos, g) de costura , h) recargue de soldadura.

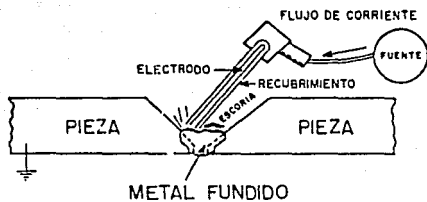


Figura 37. Proceso de soldadura por arco eléctrico.

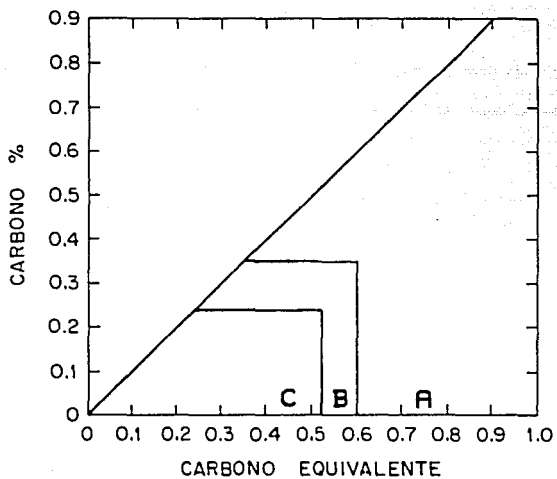


Figura 38. Diagrama de carbono contra carbono equivalente usado en la selección de la soldabilidad del acero.

Zona: A-mala, B-media y C-buena.

## METALURGIA DEL PROCESO DE SOLDADURA

Durante el proceso de soldadura el metal base sufre un tratamiento térmico variable en cada punto según el ciclo térmico impuesto por el procedimiento de soldadura, el método de soldadura, las propiedades físicas del metal y el espesor de las chapas a unir (40).

En el caso de los aceros, el ciclo térmico puede provocar transformaciones microestructurales como la recristalización y el crecimiento de grano, así como transformaciones de fase en estado sólido, como son el tratamiento térmico de recocido, normalizado y temple (36,49).

Se ha comprobado que en la soldadura por arco eléctrico la zona del metal base que es más afectada por el calor, es la que se encuentra adyacente a la línea de fusión en este punto se alcanza una temperatura inicial de unos 1150°C (41).

Esta zona es conocida como la zona afectada térmicamente (ZAT), la cual es adyacente a la soldadura y las propiedades mecánicas y la microestructura del metal base han sido alteradas por el proceso de soldadura.



Durante el proceso de soldadura ocurren fenómenos como:

- a) la fusión de la soldadura,
- b) la solidificación de la soldadura,
- c) reacciones gas-metal, como la disolución de nitrógeno, hidrógeno y oxígeno en el acero,
- d) reacciones de escorificación,
- e) fenómenos de superficie y
- f) reacciones en estado sólido.

Durante el proceso de soldadura la temperatura que se alcanza entre la soldadura y la zona afectada térmicamente varían desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de fusión del acero.

Al soldar varillas se considera que el flujo de extracción de calor se realiza en dos dimensiones, una en la dirección radial al eje de la soldadura y otra en dirección axial. La extracción de calor en la dirección axial es mayor que en la dirección radial, debido a la cantidad de material es mayor en esta dirección.

El estudio de la distribución térmica hace prever que el metal base, sufrirá modificaciones microestructurales dando origen a toda una serie de microestructuras, desde el semi-temple del tipo bainítico hasta el hipertemple total austenítico (45).

En la soldadura, el metal fundido se solidifica rápidamente por lo que las reacciones químicas que se inician en el metal fundido y en la escoria no tienen tiempo para completarse.

La solidificación uniforme de la soldadura en el bisel se altera por refusión cuando se aplican pasadas subsecuentes. La estructura de la soldadura y su solidificación dependen del ancho y profundidad del bisel (42).

Si el espacio entre las varillas donde se va a depositar la soldadura es de mayor profundidad que su anchura, el metal fundido solidificará de modo que se formen en el centro de la sección transversal de la soldadura zonas en donde se encuentre soldadura sin solidificar siendo posible la formación de escoria e inclusiones de gases dentro de la soldadura.

Si el espacio es más ancho que su profundidad, la solidificación de la soldadura será de forma creciente y el metal fundido que no ha solidificado todavía se encontrará en la parte media de la superficie de la soldadura eliminándose todas las impurezas del metal de la soldadura.

La inclusión de gases como el hidrógeno y el oxígeno es perjudicial debido a que el hidrógeno provoca fragilidad en el acero y el oxígeno forma óxidos con los elementos del acero los cuales se eliminan en la escoria. Esta absorción de gases es función de la temperatura de depositación de la soldadura y del grado de humedad en el medio en que se realiza la soldadura, es por esto que los electrodos están recubiertos para impedir la absorción de estos gases. De preferencia deben realizarse las soldaduras en ambientes en los que exista una humedad baja y realizando un precalentamiento de los electrodos antes de efectuar el procedimiento de soldadura (51,52).

Debido al gradiente de temperaturas existente entre la soldadura y el metal base se han propuesto varias zonas en donde ocurren diferentes reacciones en estado sólido. En general podemos decir que en dichas reacciones ocurren procesos de recuperación, recristalización y crecimiento de grano.

## LA SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS DE REFUERZO FABRICADOS EN MEXICO

### 1) NOM-B-6, Acero de palanquilla

De acuerdo al diagrama carbono contra carbono equivalente este acero se localiza en la región A, en esta región se presentan riesgos al realizar la soldadura por lo cual se debe realizar tomando ciertas medidas como por ejemplo precalentamiento de las uniones a soldar.

Debido al alto porcentaje de carbono contenido en este acero, existe una tendencia a formar estructuras duras como la martensita con el choque térmico entre el acero y la soldadura, esta fase martensítica es una estructura frágil por lo que su aparición es negativa en el interior de un acero que debe tener un comportamiento frágil-dúctil.

### 2) NOM-B-18, aceros de riel y NOM-B-32, aceros de eje

En el diagrama de carbono contra carbono equivalente los aceros de riel y de eje se ubican en la zona A pero a mucho más altura que los aceros de palanquilla, por lo que la soldadura en estos aceros de refuerzo es sumamente riesgosa.

Estos aceros presentan una tendencia mucho mayor a formar estructuras martensíticas con el ciclo térmico impuesto en el proceso de soldadura por lo que su uso en la fabricación de estructuras no es recomendado.

3) NOM-B-294, aceros estirados en frío.

Dentro del diagrama de soldabilidad estos aceros se ubican en la zona B, la cual nos indicaría que para realizar la soldadura no habría muchos problemas en cuanto a composición química, sin embargo, estos aceros tienen el inconveniente de que su estructura es una estructura deformada la cual al aplicarle un ciclo de calentamiento pierde totalmente las características mecánicas iniciales haciendo que su resistencia a la tensión baje considerablemente.

4) NOM-B-457, acero de palanquilla microaleado

En el diagrama de soldabilidad los aceros microaleados pueden ubicarse en la zona C y B, de soldabilidad buena o aceptable.

En la tabla D se encuentran los valores de carbono contra carbono equivalente promedio tomados de distintos aceros de refuerzo, en la figura 39 se encuentran graficados dichos valores.

TABLA D

NORMA	% CARBONO	CARBONO EQUIVALENTE
B-6	0.44	0.792
B-18	0.78	0.953
B-32	0.78	0.953
B-294	0.15	0.258
B-457	0.24	0.513

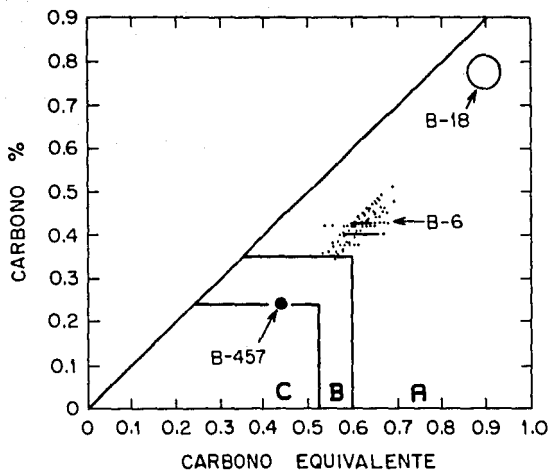


Figura 39. Soldabilidad de los aceros de refuerzo fabricados en México

## EXPERIENCIAS DE SOLDADURAS

Estas experiencias consisten en el análisis de varias soldaduras realizadas con las varillas de palanquilla más comerciales, como son las de medio carbono y microaleada. Se escogieron varios diámetros de las varillas y se hicieron biseles de varios tipos.

Los diámetros usados son de 1 1/4 y 1 1/2 pulgadas, calibres 10 y 12 respectivamente, puesto que estos diámetros son ampliamente empleados en la fabricación de estructuras metálicas de media y gran altura.

Los tipos de bisel usados son en V, bisel simple en V y bisel doble en V, según lo indica la norma mexicana NDM-H-121-1988, Procedimiento de soldadura estructural, acero de refuerzo.

Se realizaron 5 soldaduras en las cuales se midió su dureza y se estudio su microestructura.

La denominación usada para caracterizar cada soldadura es:

V T M D TB

donde:

V = VARILLA

T = TRATAMIENTO TERMICO, SOLDADO (S)

M = TIPO DE ACERO

H (medio carbono), S (microaleado)

D = DIAMETRO DE LAS VARILLAS EN PULGADAS

TB = TIPO DE BISEL: BISEL SIMPLE (BS),

BISEL DOBLE V ó BISEL DOBLE (BD),

BISEL LARGO (BL)

ejemplo: VSS 1 1/4 BD, varilla soldada ,acero microaleado.  
diámetro 1 1/4 pulgadas con bisel doble.

Las soldaduras realizadas fueron:

MUESTRA A: VSH 1 1/4 BS

MUESTRA B: VSH 1 1/4 BD

MUESTRA C: VSH 1 1/2 BS

MUESTRA D: VSS 1 1/4 BS

MUESTRA E: VSS 1 1/2 BL

#### ANALISIS DE LAS EXPERIENCIAS DE SOLDADURA

Todas las soldaduras se realizaron por soldadores calificados mediante el proceso de arco eléctrico usando un electrodo metálico recubierto del tipo E90XX. de bajo hidrógeno . Los biselés fueron hechos tomando en cuenta la norma H-121, cada extremo a soldar media aproximadamente 50 centímetros de longitud.

El ensayo de dureza que se realizó a las soldaduras fue del tipo de dureza Rockwell B, con una carga de 100 kilogramos, y usando un penetrador de bola de acero con diámetro de 1/16 de pulgada a un tiempo de aplicación de la carga de 20 segundos.



## DESCRIPCION DE LAS SOLDADURAS REALIZADAS

MUESTRA A: VSH 1 1/4 BS

La dureza de la soldadura se realizó a través de tres direcciones longitudinales, izquierda, centro y derecha , la distancia entre cada marca de dureza es de 5 milímetros aproximadamente. Los resultados se reportan en las figuras 40a,b,c,d. En las tres gráficas se observa un aumento apreciable en la dureza de la varilla al acercarnos al límite con el material de aporte.

Un macroataque a la superficie pulida de la soldadura demuestra una zona más oscura en ambos lados de las varillas unidas en las cercanías con el material de aporte, esta región es la zona afectada térmicamente (ZAT) la cual tiene una extensión que oscila entre los 2 y 3 milímetros a partir del límite entre la varilla y el material de aporte. Las zonas en donde se encuentra el mayor espesor de la ZAT es en los extremos exteriores del bisel plano; esto se debe probablemente a que estas zonas disipan calor por el efecto de punta caliente, por lo tanto deben existir mayores transformaciones de fase debido a este sobrecalentamiento.

Con respecto a los cambios en la microestructura de la varilla en la ZAT se encuentran algunas regiones importantes.

En la zona central de la varilla alejada del bisel, la microestructura de la varilla presenta un tamaño de grano de 4 a 5 ASTM aproximadamente en los que se observan granos de perlita laminar sobre una matriz ferrítica, figura 4ig. A medida que nos acercamos al límite con la ZAT se observa globulización de la perlita laminar acompañada por un refinamiento del grano original, figura 4ib.

La microestructura de la soldadura presenta dendritas típicas de una estructura de colada, figura 4id.

En la ZAT se observa un refinamiento del tamaño de grano bastante fuerte, el tamaño de grano oscila entre 7 y 8 ASTM aproximadamente, presentando una estructura de granos de perlita y ferrita de forma equiaxial, figura 4ia. En el límite cercano al material de aporte se observa un aumento en el tamaño de grano junto con un pequeño grado de descarbonización de la varilla, observándose un aumento de la fase ferrítica de la varilla con respecto a la original, figura 4ih. La zona ferrítica en la punta del bisel en V es de forma basáltica, figura 4if. En las cercanías del límite entre el bisel plano y el material de aporte se encontraron estructuras que se catalogaron como martensita revenida o bainita, figura 4ie.

Un recorrido desde la punta del bisel a los extremos de la varilla presenta una estructura de ferrita basáltica en punta del bisel, en los extremos se encontraron estructuras ferríticas del tipo Widmanstatten de un tamaño de grano austenítico de 6 a 7 ASTM , figura 41c, Estas estructuras Widmanstatten se encuentran en los extremos exteriores en ambas varillas. En la punta del bisel y los extremos se encuentra una microestructura de grano ferrítico fino equiaxial acompañado por una descarburización en el límite con el material de aporte.

Las curvas de distribución de dureza se pueden explicar en términos de la morfología de la microestructura y el tamaño de grano en el punto donde se tomó la medida. Se puede concluir que la dureza aumenta por: un tamaño de grano pequeño, estructuras más duras que la original como son la ferrita Widmanstatten, la bainita o la martensita, alta densidad de dislocaciones. . Mientras que una disminución en la dureza puede ocurrir por: aumento del tamaño de grano, estructuras dúctiles como la ferrita, descarburización, revenido, relajación de tensiones en el material debido al ciclo térmico.

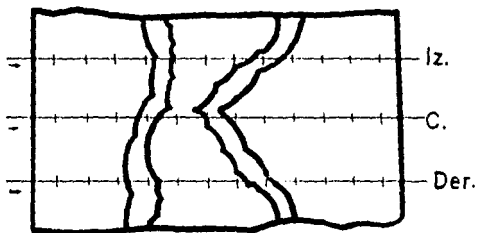
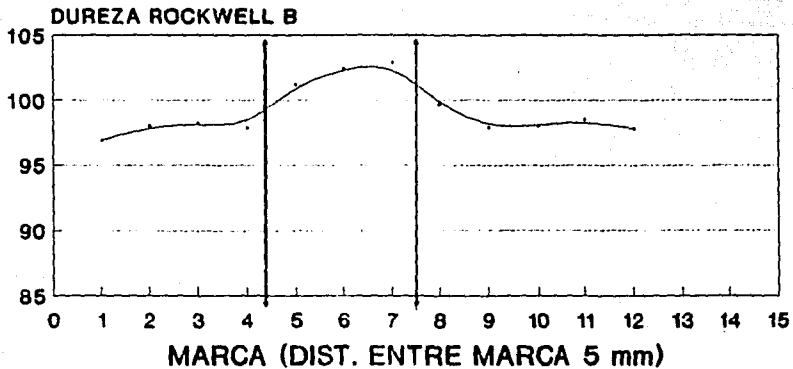


Figura 40. Distribución de durezas en la muestra A:

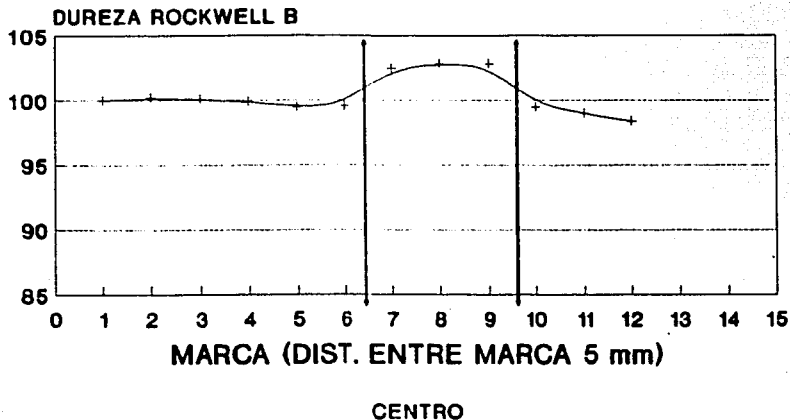
- a) marcas de dureza
- b) eje izquierdo
- c) eje central
- d) eje derecho

# VSH 1 1/4 BS

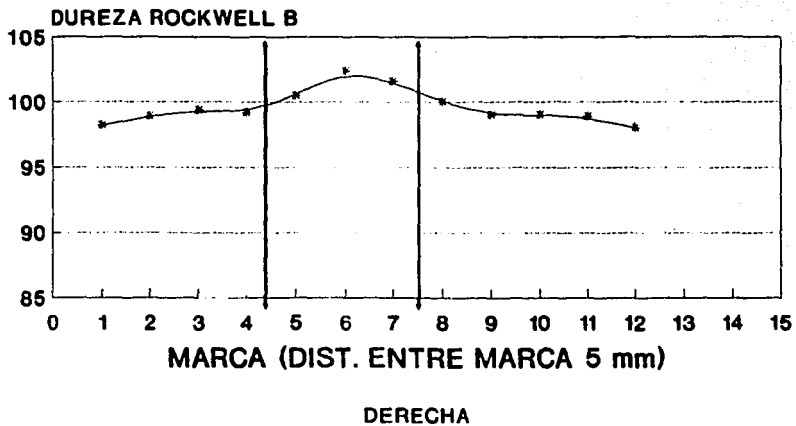


IZQUIERDA

# VSH 1 1/4 BS



# VSH 1 1/4 BS



**Figura 41. Microestructuras encontradas en el acero de palanquilla de medio carbono en la muestra A:**

- a) zona afectada térmicamente, 150X
- b) globulización de la perlita, 100X
- c) ferrita Widmanstatten, 150X
- d) soldadura, 100X
- e) bainita, 100X
- f) ferrita basáltica, 500X
- g) grano original del acero, 100X
- h) ferrita equiaxial, 400X



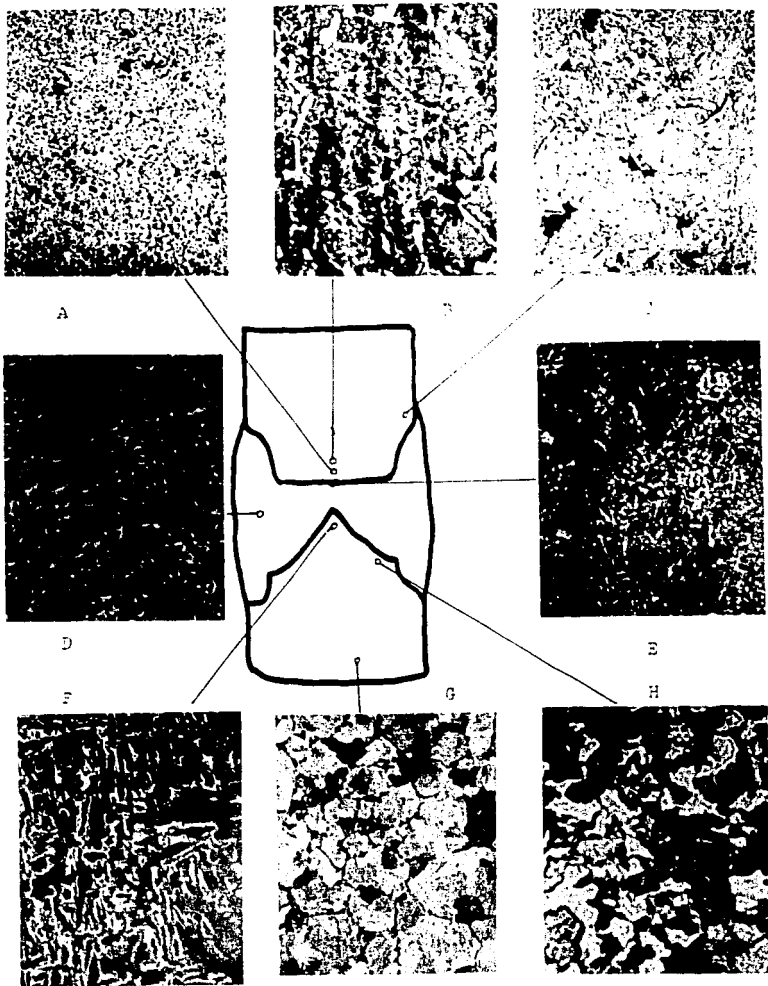


Figura 41 Microestructuras encontradas en la muestra A

## MUESTRA B: VSH 1 1/4 BD

Las gráficas de distribución de dureza se presentan en las figuras 42a,b,c,d. En ellas de manera general se observa la misma tendencia a aumentar la dureza en la interfase varilla-metal de aporte. En la distribución a lo largo del centro de la soldadura se observa una disminución de la dureza en ambas varillas.

En esta soldadura el espesor de la ZAT oscila entre los 3 y 5 milímetros, las regiones en la que se encuentra el mayor espesor son en los extremos exteriores de las varillas. Esta soldadura presenta un defecto en el centro de la unión entre las varillas, este defecto es una cavidad cuadrangular formada debido a que no se depositó correctamente material de aporte al unir las varillas.

Las microestructuras encontradas en esta soldadura son similares a la descrita anteriormente.

En la dirección central de la soldadura desde la varilla original a la interfase con el material de aporte, se presenta una disminución del tamaño de grano junto con la globulización de la perlita laminar original, seguidamente se encuentra una refinación del grano en la que se observa una forma de grano equiaxial tanto de fase ferrita como de perlita.

Al acercarnos a la punta del bisel se observa un crecimiento de grano acompañado por estructuras degradadas por los ciclos térmicos, figura 43a.

En las interfases de la varilla-material de aporte se presenta un crecimiento basáltico de ferrita y una descarburización en la varilla. Las estructuras del tipo Widmanstätten se localizan en los extremos exteriores en menor proporción que en la anterior soldadura, se localizó una estructura de martensita revenida en uno de estos extremos, figura 43b.

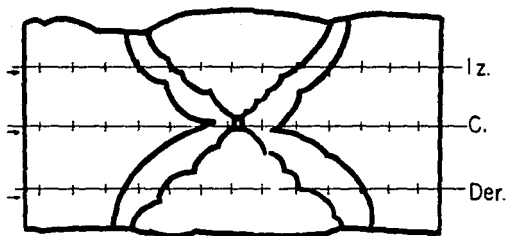
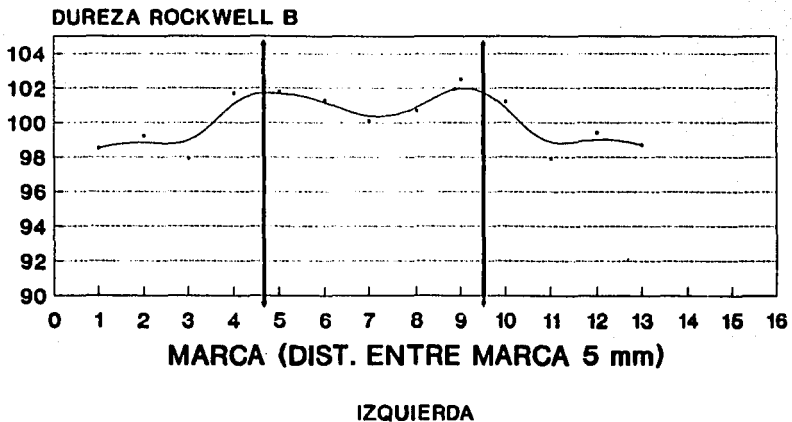


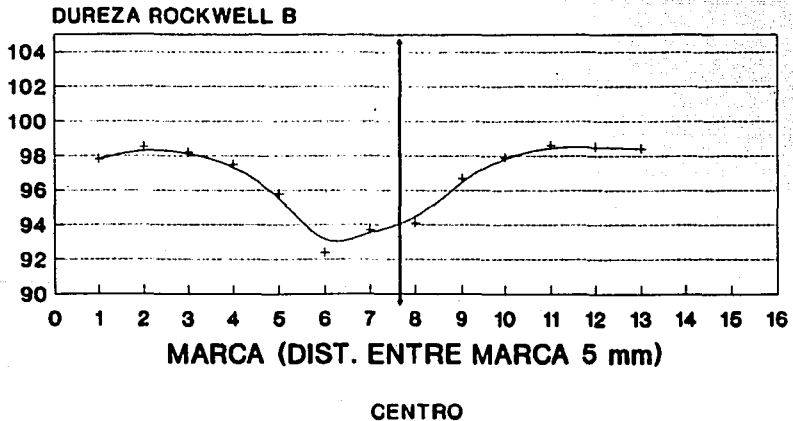
Figura 42. Distribución de durezas en la muestra B:

- a) marcas de dureza
- b) eje izquierdo
- c) eje central
- d) eje derecho

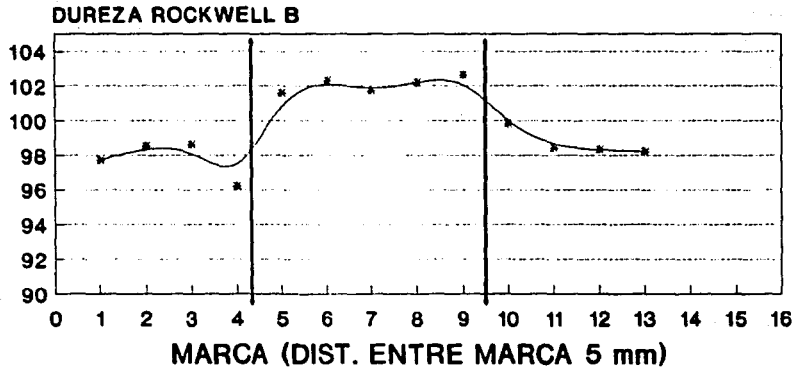
# VSH 1 1/4 BD



# VSH 1 1/4 BD

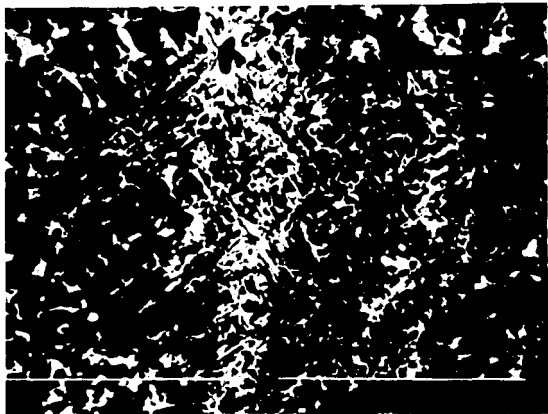


# VSH 1 1/4 BD



DERECHA

A



B

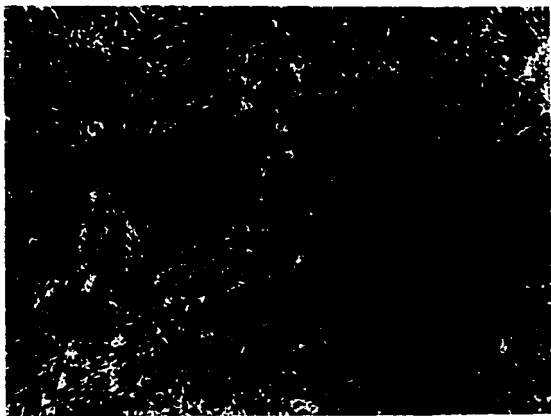


Figura 43. Microestructuras encontradas en el acero de palanquilla de medio carbono en la muestra B:  
a) ferrita degradada, 400X  
b) martensita revenida, 400X



MUESTRA C: VSH 1 1/2 BS

En esta soldadura el porcentaje de carbono es mayor por lo que los cambios estructurales son más representativos de un material con mala soldabilidad. Las mediciones de dureza se realizaron en direcciones paralelas al eje central de la soldadura y mediciones sobre el bisel plano y en ambos lados del bisel en V, figura 44a,b,c,d,e,f.

La ZAT presento espesores de entre los 2 a 9 milímetros, los espesores mayores se localizaron en las esquinas de los extremos exteriores de las varillas.

Con respecto a las distribuciones de durezas longitudinales se observa un aumento mayor en la magnitud de la dureza que en las pasadas dos soldaduras, esta presenta además una tendencia a aumentar la dureza a medida que se acerca a la interfase de la varilla y el material de aporte. En la dirección del bisel plano se observa una disminución de la dureza desde el extremo al centro. En la dirección del bisel en V se presenta una disminución en la dureza desde el extremo hacia la punta del bisel.

La morfología de la ZAT es similar a la observada en las dos soldaduras descritas anteriormente.

En el pico del bisel en V se encuentra una estructura de ferrita basáltica y una recristalización del grano. Siguiendo la dirección del bisel se observa un refinamiento del grano y en el extremo se presenta nuevamente la estructura Widmanstatten. La estructura de Widmanstatten se localiza en los extremos exteriores de las dos varillas, figura 45a.

Se localizan también regiones de descarburización en los extremos exteriores de las varillas y en la interfase de la varilla y el material de aporte principalmente en las cercanías con el bisel en V.

En el bisel plano se encontró una estructura martensítica de forma masiva y plumosa, figura 45b.

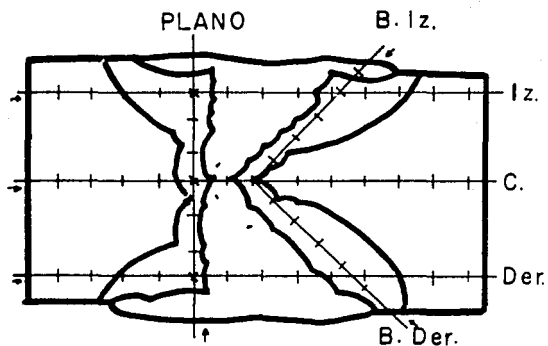
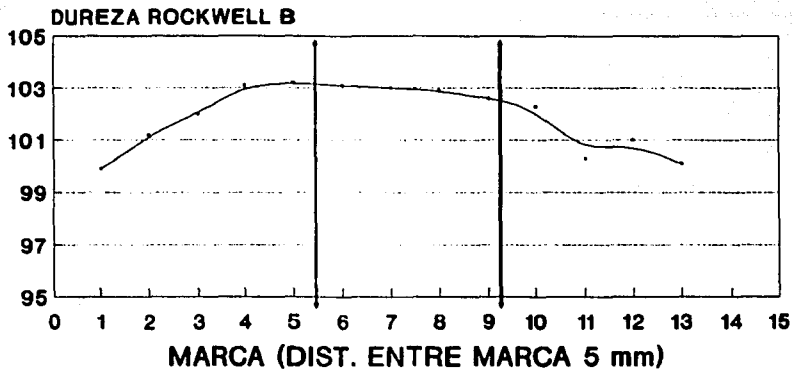


Figura 44. Distribución de durezas en la muestra C:

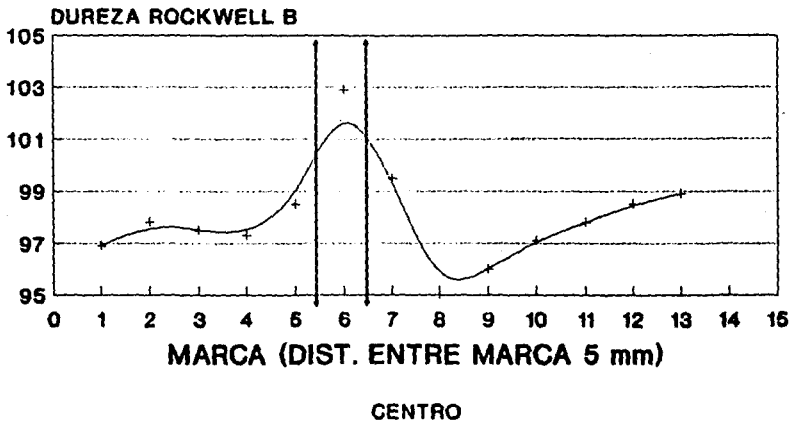
- a) marcas de dureza
- b) eje izquierdo
- c) eje central
- d) eje derecho
- e) sobre bisel plano
- f) sobre bisel en V

# VSH 1 1/2 BS

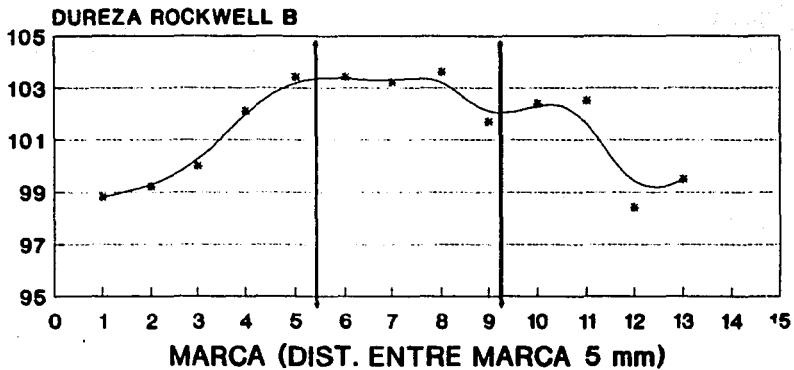


IZQUIERDA

# VSH 1 1/2 BS

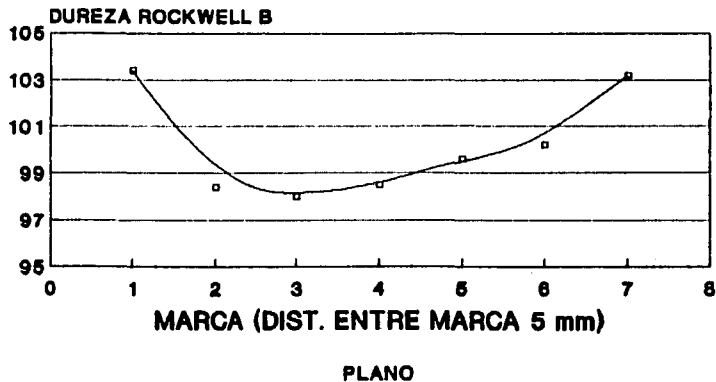


# VSH 1 1/2 BS



DERECHA

# VSH 1 1/2 BS



# VSH 1 1/2 BS

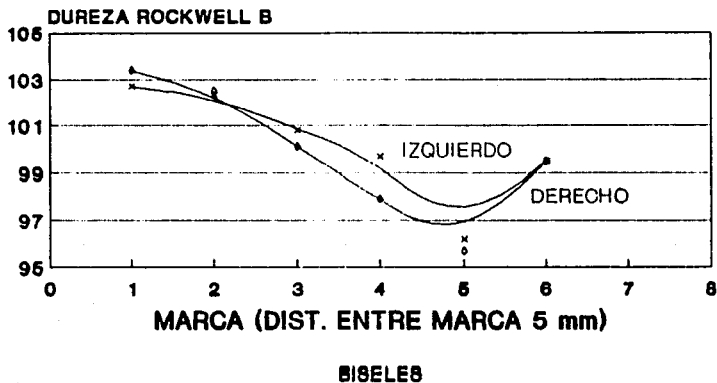
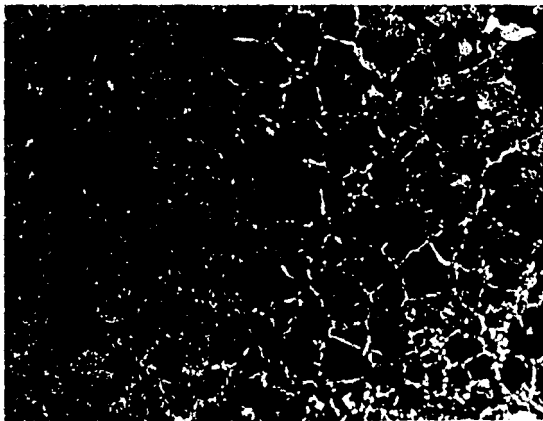




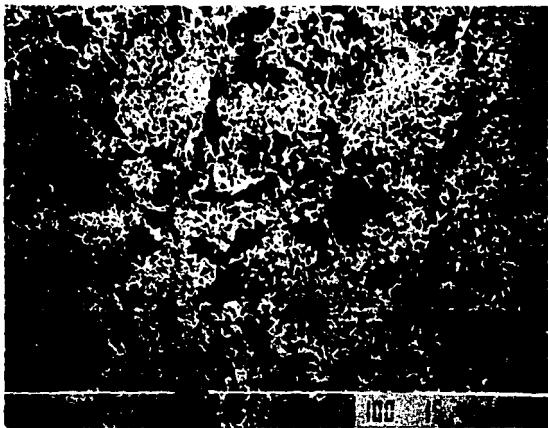


Figura 45. Microestructuras encontradas en el acero de palanquilla de medio carbono en la muestra C:

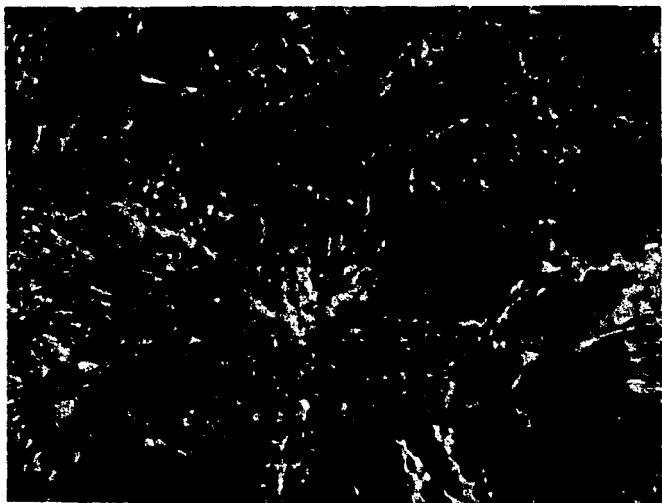
- a) ferrita Widmanstatten, 350X
- b) refinamiento del grano original, 50X
- c) globulización de la perlita láminar, 350X
- d) martensita, 1000X



B



C



#### MUESTRA D: VSS 1-1/4 BS

Las distribuciones de dureza se realizaron en la dirección paralela al eje central de la soldadura, en la dirección del bisel plano y en la dirección del centro del bisel hacia el extremo de la varilla, figura 46a,b,c,d,e.

Las distribuciones de dureza nos muestran que la dureza no se ve afectada drásticamente sino que oscila dentro del valor original y solo aumenta en la interfase con el material de aporte.

La ZAT tiene un espesor de 3 a 5 milímetros, encontrándose el máximo espesor en las esquinas exteriores de la varilla.

Con respecto a los cambios en la microestructura se describe desde el centro de la varilla original hacia la punta del bisel.

La microestructura de la soldadura presenta dentritas, característica de una estructura de colada, figura 47e.

El tamaño de grano original de la varilla es de 7 a 8 ASTM aproximadamente, figura 47b, la perlita es de forma laminar y los granos de ferrita equiaxiales.

Al acercarnos a la ZAT se empieza a globulizar la perlita laminar, figura 47a, al centro comienza una refinación gradual del grano original la cual domina toda la ZAT, figura 47d, en las cercanías con el material de aporte el grano empieza a crecer, figura 47h. En el centro del bisel en V se observa un crecimiento basáltico de ferrita, figura 47g.

Un seguimiento a través del bisel en V hacia el extremo de la varilla muestra un grano fino de ferrita basáltica y equiaxial, figura 47c, al alejarnos del centro el grano es equiaxial principalmente. En el extremo se observa estructura Widmanstätten con un tamaño de grano aproximado de 6 ASTM, figura 47f.

En la varilla con el bisel plano las estructuras son similares y no presentan estructuras duras.

En esta muestra la calidad del material de la varilla fue bastante deficiente puesto que se encontraron fracturas internas en la varilla orientadas en la dirección de laminación, así como una heterogeneidad en las zonas ferríticas y perlíticas.

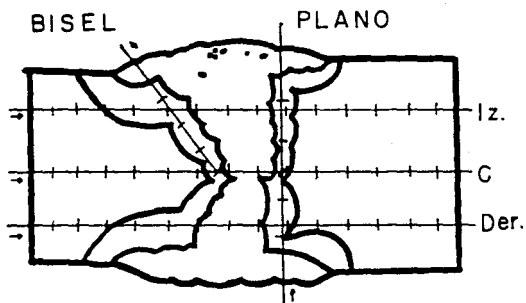
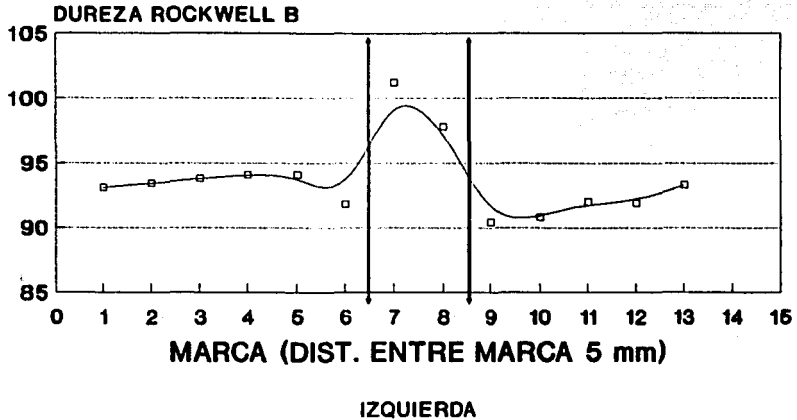


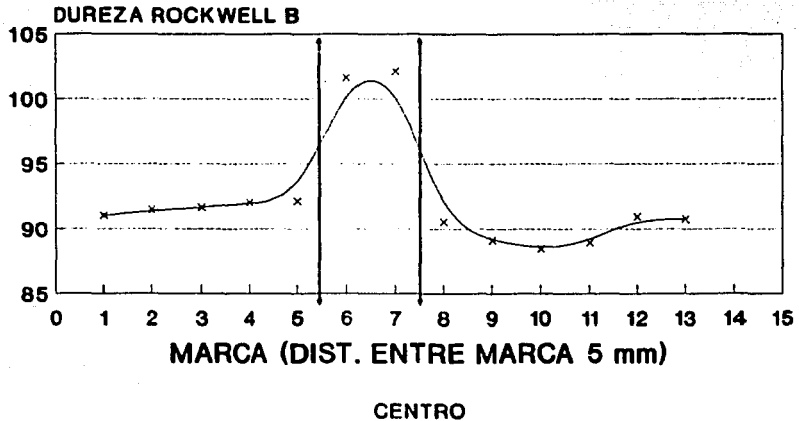
Figura 46. Distribución de durezas en la muestra D:

- a) marcas de dureza
- b) eje izquierdo
- c) eje central
- d) eje derecho
- e) sobre bisel plano y en V

# VSS 1 1/4 BS

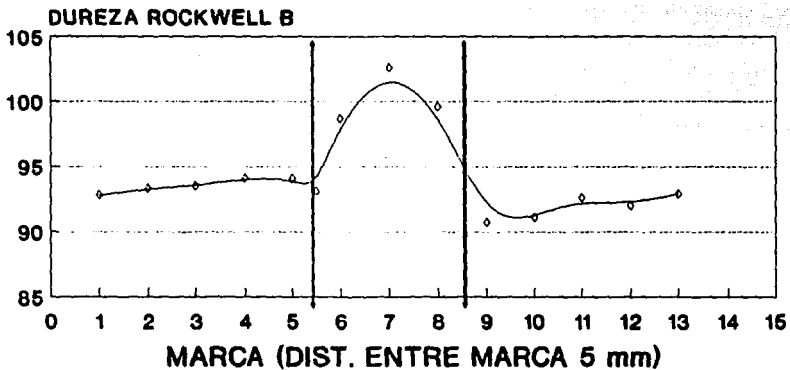


# VSS 1 1/4 BS



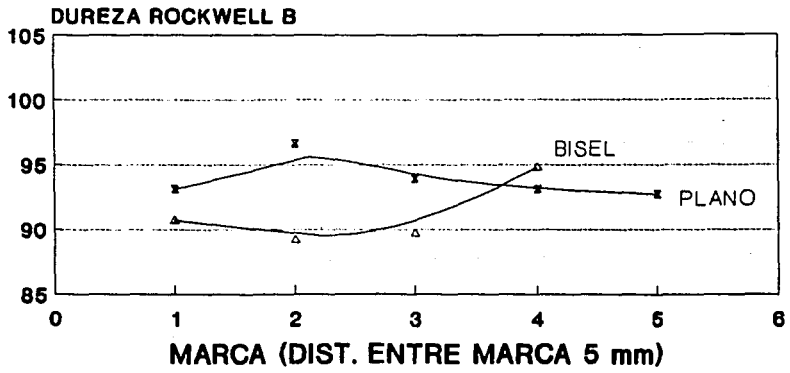


# VSS 1 1/4 BS



DERECHA

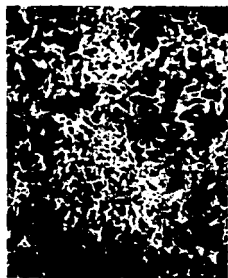
# VSS 1 1/4 BS



**BISEL Y PLANO**

**Figura 47. Microestructuras encontradas en el acero de palanquilla microaleado de la muestra D:**

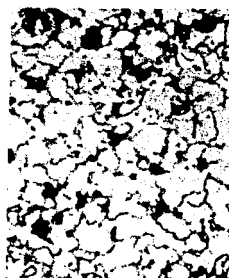
- a) globulización de la perlita, 350X
- b) grano original del acero, 100X
- c) ferrita equiaxial, 400X
- d) zona afectada térmicamente, 250X
- e) soldadura, 100X
- f) ferrita Widmanstatten, 150X
- g) ferrita basáltica, 1000X
- h) refinación del grano original, 100X



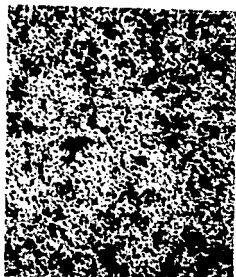
A



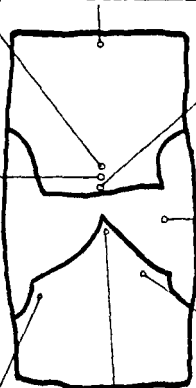
B



C



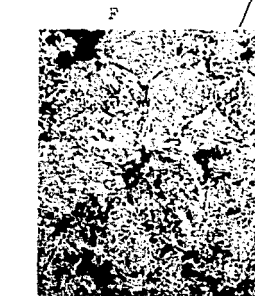
D



G



E



F



G



H

Figura 47 Microestructuras encontradas en la muestra D

## MUESTRA E: VSS 1 1/2 BL

En esta soldadura las distribuciones se midieron en la dirección paralela al eje central de la varilla, en las cercanías del bisel plano y del bisel largo, figura 48a,b,c,d,e.

Un análisis de estos datos muestra que la dureza no se ve afectada drásticamente por el material de aporte, solo existe un punto en el que la dureza es bastante alta comparada con los valores que se tienen, este punto es el extremo del bisel largo más alejado al bisel plano.

La ZAT presenta un espesor de entre los 2 a 5 milímetros, en donde el mayor espesor se localiza en el extremo del bisel largo más alejado al bisel plano.

Las microestructuras son parecidas a las descritas en la soldadura anterior, un refinamiento de grano en las cercanías de la ZAT, con un crecimiento en los límites con el material de aporte en donde se encontró una estructura de ferrita basáltica acompañada de recristalización de grano, figura 49a.

Las estructuras de ferrita Widmanstätten se encontraron en los extremos exteriores de las varillas, figura 49b.

En el bisel plano la dureza no se vio afectada grandemente, la microestructura que predomina en los límites con el material de aporte es ferrítica de grano fino en coexistencia con granos de ferrita basáltica.

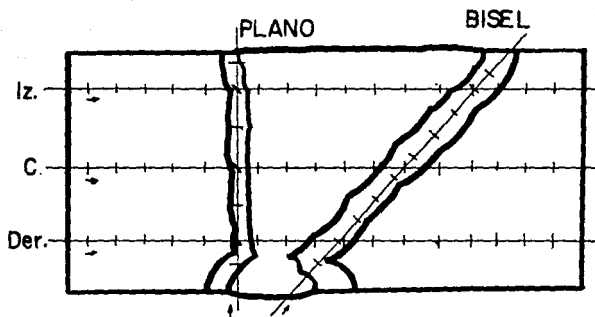
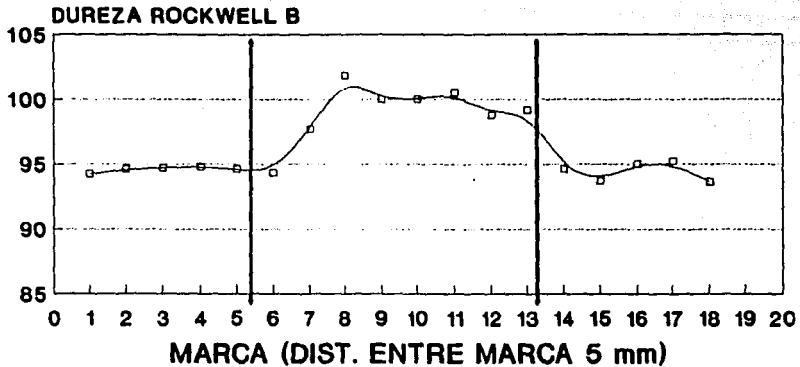


Figura 48. Distribución de durezas en la muestra E:

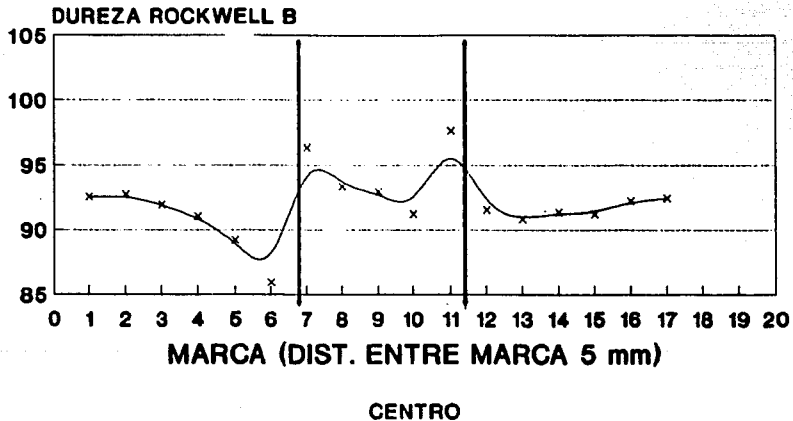
- a) marcas de dureza
- b) eje izquierdo
- c) eje central
- d) eje derecho
- e) sobre bisel plano y bisel largo.

# VSS 1 1/2 BL



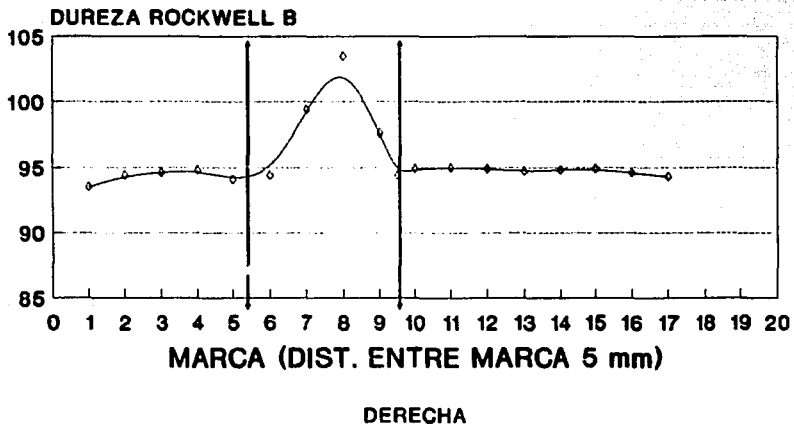
IZQUIERDA

# VSS 1 1/2 BL

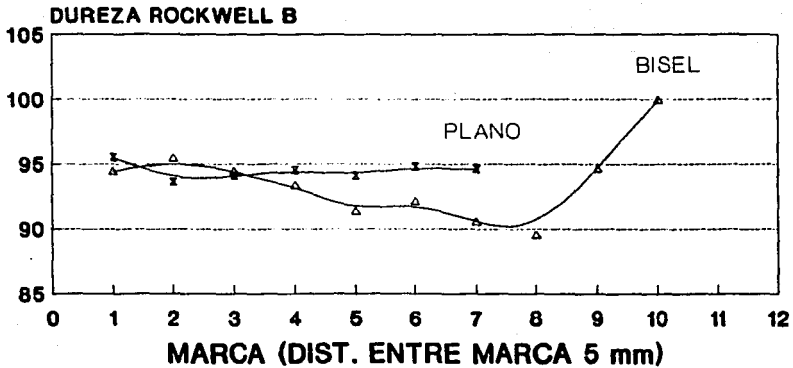




# VSS 1 1/2 BL



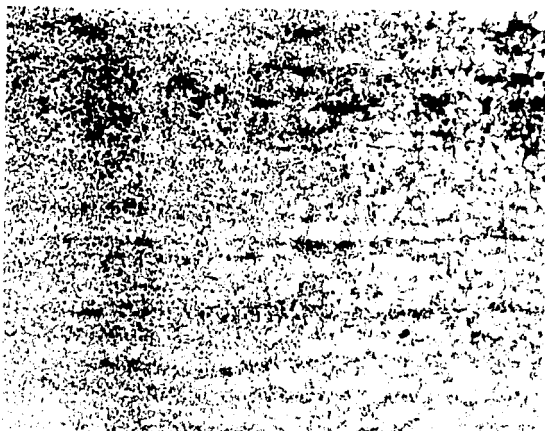
# VSS 1 1/2 BL



**BISEL Y PLANO**



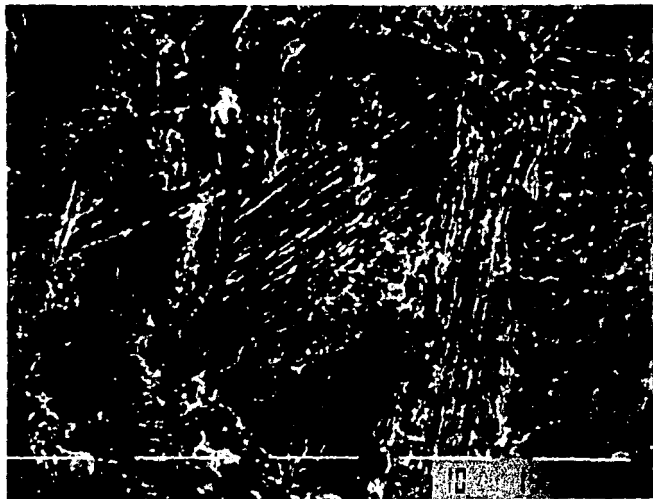
Figura 49. Microestructuras encontradas en el  
acero de palanquilla microaleado en  
la muestra E:  
a) ferrita basáltica, 400X  
b) refinamiento del grano original, 50X  
c) ferrita Widmanstatten, 350X  
d) bainita, 1500X



B



C



ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

## INTERPRETACION DE LAS TRANSFORMACIONES DE FASE

En esta interpretación consideremos un acero que ha sido laminado en caliente y presenta corrugaciones en la superficie de la barra de acero. La composición química es aproximada a un acero hipoeutectoide con 50 % ferrita y 50 % perlita

Se va a soldar con bisel en V, los extremos de las varillas son biselados para asegurar mayor superficie de amarre con el material de aporte, esto se hace en frío por lo que la varilla es deformada en los extremos exteriores de los biseles.

La soldadura se deposita por capas desde el centro hacia fuera, removiendo la escoria formada en cada paso con un cepillo de cerdas metálicas, primero de un lado y luego del otro. Por lo que el ciclo de calentamiento es del centro hacia el extremo izquierdo y del centro al extremo derecho.

Al depositar el primer cordón de soldadura el calor se disipa en forma longitudinal al eje central de las varillas, como un varilla tiene bisel plano y otro en punta de V la extracción de calor se realiza principalmente por el bisel plano por el efecto de mayor masa en la varilla. En este primer punto el choque térmico es grande puesto que las varillas se encuentran a temperatura ambiente y la soldadura en un punto de fusión de aproximadamente 1300°C, la estructura en la interfase de las varillas tiende a una estructura de temple.

Como en este punto se sobrepasa la línea de transformación austenítica, al enfriarse la varilla puede traer consigo la presencia de austenita retenida la cual sirve como núcleos de crecimiento para la martensita.

En las sucesivas pasadas las varillas empiezan a calentarse y la velocidad de enfriamiento es menor por lo que las estructuras de temple se empiezan a revenir, los cambios como la globulización de la perlita ocurren por los 670°C y los fenómenos de crecimiento de grano, recristalización y refinación de grano ocurren en las zonas cercanas a la depositación del cordón de soldadura.

En las estructuras deformadas durante el biselado al aplicar el ciclo térmico la densidad de dislocaciones en estos puntos favorecerá el refinamiento de grano antes que el crecimiento de grano ocurra.

Al aplicar un cordón de soldadura y limpiar escoria y aplicar otro cordón, el ciclo de calentamiento no es uniforme por lo que los cambios estructurales serán desiguales. Cuando se aplica el último cordón de soldadura el acero de la varilla entra en una etapa de normalización en la cual todas las estructuras tenderán al equilibrio.

Las estructuras de temple tales como la martensita y la bainita son degradadas por las sucesivas pasadas de la depositación del cordón de soldadura, por lo que es posible encontrar martensita revenida o bainita inferior en las zonas en las cuales el choque térmico fue más severo como lo son el centro y los extremos de las varillas.

La estructura Widmanstätten se forma debido a un sobrecalentamiento y a una velocidad de enfriamiento constante, por lo que tenderá a aparecer en los extremos cercanos a la superficie de la varilla.



## CONCLUSIONES

De acuerdo a lo observado en este estudio, los aceros de refuerzo fabricados en México deben sobrepasar la resistencia de 42 kg/mm sin importar sus propiedades de soldabilidad ni su composición química. La mayoría cumple con las exigencias especificadas en cada norma de acero de refuerzo, pero es preciso observar que se debe buscar un acero de refuerzo capaz de dar seguridad a las personas que viven o laboran en las construcciones de concreto. Los aceros microaleados nos dan una alternativa bastante favorable en cuanto a los aceros de medio y alto carbono, así como a los endurecidos en frío y esta es su buena soldabilidad.

Los aceros fabricados bajo la norma B-6 son los más usados en la industria de la construcción debido a sus propiedades tensiles, sus propiedades mecánicas se resumen en una gráfica de esfuerzo contra deformación en la cual se observa que su límite elástico corresponde a lo especificado en la norma, no presenta planicie de cedencia pero resiste una deformación total de aproximadamente 7 al 9 por ciento.

En lo que se refiere a su soldabilidad este acero presenta microestructuras frágiles durante el proceso de soldadura de arco eléctrico debido a su porcentaje de carbono, el cual favorece la creación de martensita que induce la formación de microgrietas en la zona de unión entre la soldadura y el acero.

La soldabilidad de este tipo de acero se puede mejorar con un precalentamiento del acero antes de efectuar el proceso de soldadura, con lo cual se puede evitar el choque térmico entre la soldadura y el acero sin provocar fracturas internas en la unión de la soldadura.

Los aceros de refuerzo fabricados bajo las normas B-18 y B-32 no son recomendados para la construcción de edificaciones de gran altura, a pesar de poseer una resistencia mayor que los aceros de la norma B-6, porque sus propiedades de soldabilidad no nos aseguran una correcta unión de estos aceros.

El porcentaje de carbono en estos tipos de acero es muy alto lo cual induce a la creación de la martensita y con ello la formación de tensiones y grietas en la unión soldada, además de la formación de gases e inclusiones dentro de la unión de soldadura por la descarburación del acero.

Los aceros de la norma B-294 torcidos en frío poseen la resistencia adecuada según su norma, no presentan planicie de cedencia debido a que la perdieron durante el proceso de deformación en frío, por su contenido de carbono son adecuados de acuerdo al diagrama de soldabilidad para ser unidos por medio de soldadura sin ningún riesgo pero es aquí donde entra el inconveniente de su deformación.

Al calentar una estructura deformada esta tiende a recrystalizar el grano y posteriormente al crecimiento del mismo con lo que las propiedades tienden a ser las del material antes de la deformación en frío, es por esta razón que no son recomendables para ser soldados en construcciones de concreto.

El acero de refuerzo microaleado norma B-457 presenta varias ventajas favorables para ser recomendado como un constituyente importante en construcciones de concreto reforzado.

Sus propiedades mecánicas están dentro del rango de los demás aceros con la diferencia de que es mas dúctil debido a que presenta planicie de cedencia lo que ningún otro acero de refuerzo posee, alcanza deformaciones del 15 por ciento con lo que asegura una mayor absorción de energía durante un movimiento sísmico.

En lo que se refiere a su soldabilidad, sus propiedades permanecen con cambios mínimos de resistencia a través de la unión con soldadura por lo que es recomendable para estructuras con una resistencia uniforme. Los elementos microaleantes que lo constituyen propician que el tamaño de grano no crezca demasiado con el ciclo térmico del proceso de soldadura, la formación de estructuras frágiles como la martensita no tiene lugar debido a que su porcentaje de carbono es bajo para propiciar su crecimiento dentro de la unión entre la soldadura y el acero.

El acero de refuerzo microaleado todavía se encuentra en etapa de estudio para garantizar su uso dentro de la industria de la construcción de estructuras de concreto reforzado. Pero por lo que respecta sus propiedades mecánicas y de soldabilidad es recomendada de acuerdo a los resultados obtenidos en este trabajo de tesis.

## BIBLIOGRAFIA

- 1- Ing. Fernando González Vargas. Guía Siderúrgica para No Siderúrgicos. 3er. Congreso Nacional de la Industria Siderúrgica. (1965)
- 2- V.G. Yoskoboinikov. Metalurgia General. pp 123-156, Ed. Mir, Moscú (1982).
- 3- V.A. Kudrin. Metalurgia del Acero. pp 235-286., Ed. Mir, Moscú (1984)
- 4- J. Latapi. Compendio de Términos Siderúrgicos. Editado por AHMSA, FUMOSA y SICARTSA, México D.F. (1978).
- 5- Acería Básica al Oxígeno. pp 87-96. ILAFA (1975).
- 6- Dr-Ing. Herman Peter Haastert. Ladie Metallurgy Processes in Steelmaking Part. I: Treatment of Hot Metal Heats. Forschung Thyssen Stahl A.G., Duisburg Metallurgical Plant and Technology (1984).
- 7- Dr-Ing. Herman Peter Haastert. Ladie Metallurgy Processes in Steelmaking Part. II: Treatment of Metal Heats. Forschung Thyssen Stahl A.G., Duisburg Metallurgical Plant and Technology (1984).
- 8- C.G. Sada. The HYL Iron Ore Direct Reduction Process. Grupo Acero HyLSA, (1973).
- 9- United States Steels (USS). The Making, Shaping and Treatment of Steel. (1978).
- 10- W. Knudsen, J.Sankar. Simulation of Rolling Schedules for HSLA Steels. pp 235-245. Hot Working and Forming Processes. (1978).
- 11- J.L. Albarrán, B.Campillo, J.A. Legorreta y L. Martínez. Caracterización de los Aceros de Refuerzo Fabricados en México. IFUNAM, Cuernavaca Morelos. (1988).
- 12- Dieter G.. Metalurgia Mecánica. , Ed. Aguilar (1984).
- 13- G.Magallón , F. Estévez. Desarrollo de un Acero Microaleado de Alta Resistencia para Refuerzo con Características de Soldabilidad y Alta Ductilidad apto para Zonas Sísmicas. 12vo. Congreso Nacional Bienal del Colegio de Ingenieros Mecánicos y Electricistas, México D.F., Noviembre 1986.

- 14- E. Arce. Comportamiento de Barras de Refuerzo de Hormigon. Congreso Latinoamericano de Siderurgia, ILAFA-27, México D.F., Octubre 1986.
- 15- American Concrete Institute. Building Code Requirements for Reinforced Concrete. Chicago, Illinois (1983)
- 16- Cia. Fundidora de Hierro y Acero de Monterrey S.A.. Manual para Constructores. (1965).
- 17- G. Magallón B., F. Estévez R., L. Martínez G.. Varilla de Acero de Alta Ductilidad, Soldable para la Construcción en Zonas Sísmicas. CONACyT, clave PUT/NAL/3219 (1988).
- 18- L. Martínez, E. Orozco, A. Mendoza y F. Estévez. La Conveniencia de los Aceros de Baja Aleación en la Construcción Antisísmica. CONACyT PUT/NAL/3219. (1988).
- 19- American Society for Metals. Metals Handbook Vol. 1. (1978).
- 20- T.N Baker. Subgrain and Dislocation Strengthening in Controlled-rolled Microalloyed Steels. Hot Working and Forming Processes.
- 21- American Society for Metals. Microalloyed HSLA Steels.
- 22- R.W.K. Honeycombe. Some Strengthening Mechanisms in Alloy Steels Journal of Metals.
- 23- Iain LeMay, Paul A. Fallon, James L. McCall. Microestructural Science. Vol. 7, ELSEVIER.
- 24- Kern, Suess. Steel Selection, Wiley Interscience. (1979).
- 25- Rain and Paxton. Alloying Elements in Steel.
- 26- Carter. Principles of Physical and Chemical Metallurgy. American Society for Metals.
- 27- G. Magallón, F. Estévez, E. Orozco, A. Mendoza and L. Martínez. Exploring Alternatives for Construction in the Mexican Seismic Zones: HSLA Rebars. Trabajo Producido con el Apoyo de Siderúrgica Lázaro Cárdenas Las Truchas S.A., Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y la Universidad Nacional Autónoma de México, con clave INT/CO/87/372B.

- 28- James D. Cotton. The Effects of Steel Composition and Treatment on Precipitation, Transformation Product Microstructure and Mechanical Properties of V-Bearing Microalloyed Steels. Master of Science Thesis. february 1986. Departament of Metallurgical Engineering. Colorado School of Mines, Golden Colorado.
- 29- Norma Oficial Mexicana, NOM-B-310-1981. Métodos de Prueba a la Tensión para Productos de Acero. Dirección General de Normas, Secretaría de Industria y Comercio. (1981).
- 30- Norma Oficial Mexicana, NOM-B-113-1981. Acero-Método de Prueba-Doblado de Productos Terminados. Dirección General de Normas, Secretaría de Industria y Comercio. (1981).
- 31- Norma Oficial Mexicana, NOM-R-6-1983. Productos Siderúrgicos-Varillas Corrugadas y Lisas de Acero, Procedentes de Lingote o Palanquilla para Refuerzo de Concreto. Dirección General de Normas, Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (1983).
- 32- Norma Oficial Mexicana, DGN-B-18-1975. Varillas Corrugadas de Acero, Procedentes del Riel, para Refuerzo de Concreto. Dirección General de Normas, Secretaría de Industria y Comercio (1975).
- 33- Norma Oficial Mexicana, DGN-B-32-1975. Varillas Corrugadas y Lisas de Acero, Procedentes de Eje, para Refuerzo de Concreto. Dirección General de Normas, Secretaría de Industria y Comercio (1975).
- 34- Norma Oficial Mexicana, DGN-B-294-1972. Varillas Corrugadas de Acero, Torcidas en Frío, Procedentes de Lingote o Palanquilla, para Refuerzo de Concreto. Dirección General de Normas, Secretaría de Industria y Comercio (1972).
- 35- Norma Oficial Mexicana, NOM-B-457-1987. Varillas Corrugadas de Acero de Baja Aleación, Procedentes de Lingote o Palanquilla, para Refuerzo de Concreto. Dirección General de Normas. Secretaría de Desarrollo y Fomento Industrial (1987).
- 36- Welding Handbook. American Welding Society. Vol.1.
- 37- A.C.Davis. The Science and Practice of Welding. Vol.1.
- 38- D. Seferian. Las Soldaduras. Ed. Urmo. (1977).

- 39- Patton. Ciencia y Técnica de la Soldadura pp 30-52 Ed. Urmo. (1977).
- 40- J.Y.Koo. Welding Metallurgy of Structural Steels. Journal of Metals, June 1987.
- 41- Howard R. Cary. Modern Welding Technology.
- 42- Joseph W. Giachino. Técnica y Práctica de la Soldadura.
- 43- Henry Horwitz P.E. Soldadura: Aplicaciones y Práctica.pp. 505-548. Ed. Representaciones y Serv. de Ingeniería (1984)
- 44- Jimeno. Metalurgia General Tomo II, pp 1125-1164. Madrid 1955
- 45- G.E. Linnert. Welding Metallurgy Vol. 2. American Welding Society, Miami, Florida. (1967).
- 46- Conference on Welding of HSLA Structural Steels. Metal Progress III, June 1977.
- 47- Metals and their Weldability. Section 4, Welding Handbook 6th. Ed MWS. Miami, Florida (1972).
- 48- L. Martínez y E. Ramírez. La soldabilidad del Acero en Edificios Derrumbados por el Sismo. Ciencia y Desarrollo, México, 71,27 (1986).
- 49- Krauss. Principles of Heat Treatment of Steel. American Society for Metals.
- 50- L. Martínez, J.L. Albarrán and J.Fuentes. Lessons in Welding from the 1985 Mexico City Earthquake Welding Journal, March 1987.
- 51- Norma Oficial Mexicana, NOM-H-121-1988. Procedimiento de Soldadura Estructural, Acero de Refuerzo. Dirección General de Normas, Secretaría de Desarrollo y Fomento Industrial. 1988.
- 52- Oscar de Buen. Recomendaciones para Soldar Varillas de Refuerzo en Estructuras de Concreto. Instituto de Ingeniería, UNAM, Octubre 1971. Patrocinado por la Cámara Nacional de la Industria de la Construcción.