

10  
lej.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE QUIMICA**

**EL ACERO DE REFUERZO DE CONCRETO EN  
EDIFICIOS DERRUMBADOS POR EL SISMO  
DE 1985**

**T E S I S**  
**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE**  
**INGENIERO QUIMICO METALURGICO**  
**P R E S E N T A :**  
**ELVIRA RAMIREZ ESQUIVEL**

**1 9 8 7**



## **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.

	pag.
SUMARIO	1
INTRODUCCION	2
CAPITULO I. ACERO DE REFUERZO DE CONCRETO.	3
I.1. Fabricación de varilla de acero de bajo y medio carbono.	4
I.1.1. Laminación.	9
I.1.2. Laminadores.	11
I.2. Propiedades mecánicas.	13
I.3. Inclusiones.	18
I.3.1. Origen de las inclusiones.	19
CAPITULO II. SOLDADURA Y SOLDABILIDAD.	21
II.1. Soldadura.	22
II.1.1. Soldadura de arco eléctrico.	22
II.1.2. Electrodo para soldadura eléctrica.	25
II.1.3. Zona afectada por el calor.	26
II.1.4. Defectos en las uniones soldadas.	30
II.1.5. Procedimientos de soldadura.	36
II.1.6. Inspección de piezas soldadas.	41
II.2. Soldabilidad.	42
II.2.1. Soldabilidad metalúrgica.	42
II.2.2. Efecto de los elementos aleantes en la soldabilidad.	44
II.2.3. Efecto de las propiedades físicas en la soldabilidad.	48
II.2.4. Problemas de metales con diferente composición química.	48

CAPITULO III. CASO DE ESTUDIO: LA SOLDARILIDAD DE LA VARILLA EN SEIS EDIFICIOS DERRUMBADOS.	50
III.1. Procedimiento.	52
III.2. Análisis.	55
III.3. Discusión.	56
CAPITULO IV. CASO DE ESTUDIO: PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA EN UN EDIFICIO DERRUMBADO.	69
IV.2. Análisis.	71
IV.3. Inferencias.	91
CAPITULO V. INFLUENCIA DE LOS ELEMENTOS EN LAS PROPIEDADES DE RESISTENCIA.	92
V.1. Procedimiento.	97
V.2. Análisis.	97
CONCLUSIONES.	101
APENDICE.	103
BIBLIOGRAFIA.	105

### SUMARIO.

El análisis químico de los aceros encontrados cumple con las actuales normas mexicanas. Se estudió una distribución de la composición química, incluyendo los elementos que mayormente influyen en las propiedades mecánicas de los aceros.

En el análisis metalográfico realizado en las soldaduras encontradas en un edificio derrumbado, se localizaron errores en los procesos de ejecución de las soldaduras, motivo por el cual se presenta una breve revisión de los conceptos básicos de los procesos de soldadura, del soldeo en obra, de la inspección y supervisión de las soldaduras, debido a la gran importancia que reviste en la industria de la construcción.

La detección de fallas en los procesos de soldadura, motivó la realización de un análisis de soldabilidad de los aceros encontrados, tomando como base los criterios reconocidos internacionalmente para la soldabilidad de acero de refuerzo de concreto. Así como una revisión de la misma desde fechas aproximadas de la construcción de los edificios dañados, a la fecha del terremoto.

## INTRODUCCION

La cantidad de edificios derrumbados ocasionada por el terremoto del 19 de septiembre de 1985 en la Ciudad de México, ha motivado muchos estudios de la comunidad científica nacional e internacional, acerca de la calidad de los materiales de construcción, entre ellos el acero para refuerzo de concreto y las técnicas de soldadura.

Preocupados por estos ocontencimientos el departamento de estado sólido del Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México (IFUNAM), con el apoyo del Concejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), se interesaron por analizar el acero de las estructuras dañadas.

La brigada del IFUNAM a cargo de la recolección de muestras, reunió un total de 60 varillas de acero de refuerzo de concreto localizadas en distintas partes de la zona afectada, 4 de ellas unidas por soldadura se encontraron en un edificio derrumbado. Los trozos de varilla fueron encontrados en las ruinas de varios inmuebles de las colonias Roma, Doctores y Centro de la ciudad.

En este trabajo se presenta el resultado del análisis de los aceros de refuerzo de concreto hayados entre las ruinas, de su soldabilidad y de las soldaduras encontradas.

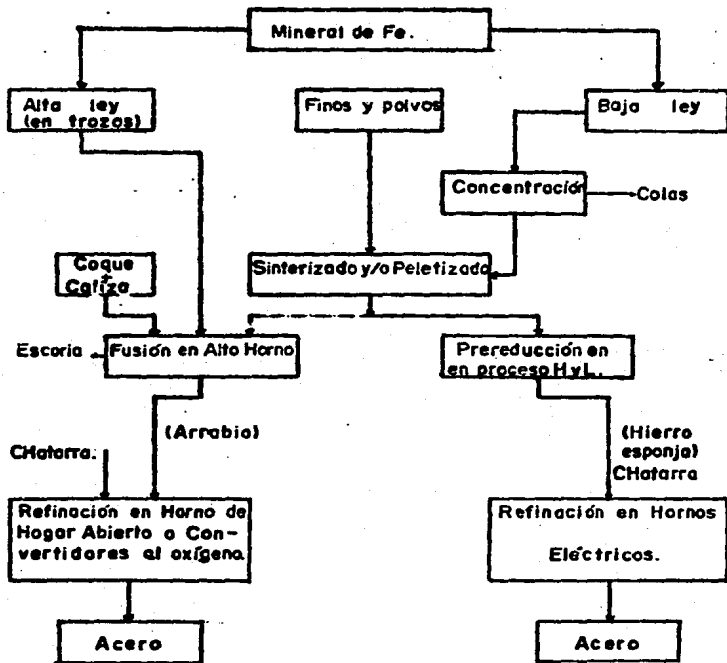
Actualmente el Instituto de Física de la UNAM y la Siderúrgica Lazaro Cardenas las Truchas, han propuesto el establecimiento de una norma de varilla con propiedades que superen la calidad de las que actualmente se fabrican en México y que sean capaces de disipar la energía destructiva los sismos. Se esta analizando una primera colada a escala industrial de varilla de acero de bajo carbono con microaleantes (Nb, V).

CAPITULO I

ACERO DE REFUERZO DE CONCRETO

I.1 FABRICACION DE VARILLA DE ACERO DE BAJO Y MEDIO CARBONO.

El acero se produce a partir de minerales de hierro y el producto final se obtiene utilizando alguno de los dos procesos que a continuación se muestran.



Proceso Convencional.

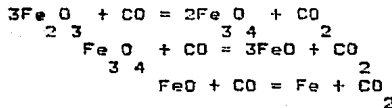
Proceso no Convencional.

Fig.1. Producción de acero a partir del mineral de hierro.

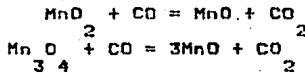


ALTO HORNO. La materia prima importante para la fabricación de acero es el arrabio, producto del alto horno. El arrabio se obtiene reduciendo el mineral de hierro con el coque y la piedra caliza (como fundente); por su alta ley la hematita y la magnetita son los minerales normalmente utilizados(1). Algunas veces la carga se complementa con prerreducidos de mineral de hierro en estado sólido (sinter y/o pellet), en la obtención de éstos suele emplearse hidrógeno o monóxido de carbono (2).

En la fusión se adiciona aire caliente para quemar coque y facilitar la formación del monóxido de carbono ( $\text{CO} + \text{CO} = 2\text{CO}$ ) que reaccionará con el mineral de hierro (3):



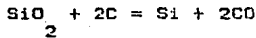
el monóxido de carbono y el carbono logran reducir elementos que se encuentran mezclados con el mineral (Mn, P, Si y S):



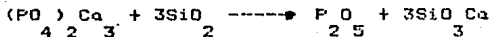
la reducción total la realiza el carbono de acuerdo con ;



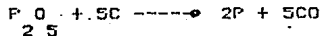
la sílice se reduce con carbono (4);



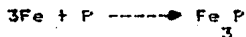
El fósforo (aportado por cenizas de coque y ganga) se reduce a altas temperaturas. Este se presenta en forma de fosfato que reacciona con la sílice dejando libre el anhídrido fosfórico:



el cual se reduce con carbono de acuerdo a;



el fósforo pasa en su mayor parte al acero en forma de fósforo férrico:



El principal problema es eliminar el fósforo, ya que para ello, se requieren condiciones oxidantes (5).

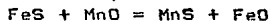
La mayor parte del azufre reacciona con el hierro formando sulfuro ferroso (FeS) muy soluble en el arrabio. Este se puede eliminar por medio del óxido de calcio o manganeso.

Con el CaO, según la reacción:

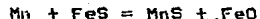


quedando en la escoria el CaS.

Con el manganeso, según la reacción:



también el manganeso procedente del MnO, reacciona con el FeS;



y, como el sulfuro de manganeso es soluble en la escoria y en el metal líquido, la desulfuración se logrará aumentando la escoria y la riqueza del MnO (5).

**REFINACIÓN DE ARRABIO.**- Puede realizarse en dos tipos de hornos.

**A. HORNO DE HOGAR ABIERTO.**

1. BASICO.
2. ACIDO.

**B. CONVERTIDOR.**

1. BESSEMER.
2. BASICO CON OXIGENO (BOF).

Estos hornos proveen acero de distintas características, ya que cada sistema de horno requiere distintos materiales,

recursos energéticos y control químico (1).

Los hornos que producen acero de mayor calidad son: el convertidor BOF en el proceso convencional y hornos eléctricos de arco para el proceso no convencional.

CONVERTIDOR BOF. El convertidor básico con oxígeno se utiliza para la afinación del arrabio. El revestimiento del horno es principalmente de magnesita (de 96 a 97 % de  $MgO$ ). Se carga aproximadamente 30% de chatarra y el resto de arrabio caliente, se insufla oxígeno (de alta pureza) a presión por medio de una lanza en forma vertical, a una distancia de entre 1 y 3 metros por arriba del baño. Con la presión del oxígeno (de 8 a 10 atm.) sobre la superficie se oxidan las especies carbono, manganeso y silicio (1). La oxidación de estos elementos y el oxígeno son los que proporcionan calor durante el proceso.

Se agregan polvos de cal y cales dolomíticas con el propósito de que la cal escorifique y recolecte impurezas y la dolomita proporcione magnesita a la escoria para fluidizarla y evitar el ataque al refractario del horno.

La cal que se carga resulta un tanto inefectiva, ya que esta no logra disolverse cuando se forma una película de silicato dicálcico alrededor de estas partículas. También la magnesita resulta ser poco desulfurante y desfosforante por ese mismo efecto, para que estas escorias produzcan el efecto deseado es necesario el uso de espatofluor ( $CaF_2$ ), (6).

### PROCESO NO CONVENCIONAL.

HORNOS ELECTRICOS DE ARCO. Existen dos tipos de hornos para la fabricación de acero: el horno de arco y el horno de inducción (2),(3).

Las ventajas que ofrecen estos hornos son:

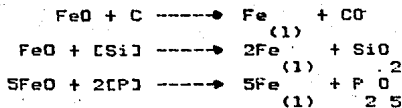
- 1) Gran flexibilidad de operación.
- 2) Altas temperaturas.
- 3) Buen control químico.
- 4) Bajas pérdidas de elementos aleantes.

Aunque sus principales desventajas pueden ser :

- 1) Altos costos de operación.
- 2) Baja capacidad del horno.

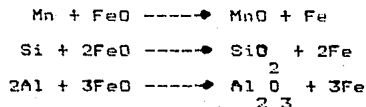
Los hornos eléctricos de arco se utilizan con mayor frecuencia. Por el tipo de refractario se categorizan como ácidos y básicos. El ácido requiere de materias primas de alta calidad (bajos porcentajes de fósforo y azufre). El horno con revestimiento básico utiliza ladrillos refractarios de magnesita y alumina hasta el nivel del baño metálico, y hacia arriba hasta el hogar, el revestimiento es de magnesita o dolomita episonada. Los electrodos son de grafito o de carbono (1).

La carga puede ser de hierro esponja ( 70 % ) y el resto de chatarra. Inicialmente se carga la chatarra por ser buen conductor de la corriente eléctrica y formador del arco. Por efecto de las altas temperaturas se oxida el hierro para que posteriormente se realice la reducción de este de acuerdo a :



Los óxidos resultantes son atrapados por la escoria. Se agrega coque o cal para promover el movimiento del metal y continuar con la afinación.

Si el nivel del fósforo y el azufre han bajado, se procede a desoxidar con ferroaleaciones. ( FeMn y FeSi ) (3).



La escoria reductora al estar libre de óxidos metálicos logra una óptima desulfuración.

El paso final consiste en el ajuste de la composición química de carbono y de los aleantes adicionados, así como el ajuste de la temperatura final (2).

### I.1.1. LAMINACION.

Una vez que el metal tiene la composición química adecuada, se vacía en el distribuidor de metal para posteriormente colar continuamente y proseguir con el proceso de laminación.

El laminado consiste en reducir el área transversal de una pieza de metal, de tal manera que el espesor final sea uniforme a lo largo del producto (7).

El tratamiento termomecánico de este tipo de aceros, se basa en la ductilidad de las aleaciones. La ductilidad depende de la composición química de las fases presentes y de la estructura, así como de las condiciones de temperatura, grado y velocidad de deformación.

El proceso técnico se realiza en estado frío o en caliente.

Los principales mecanismos de deformación son: traslación intergranular, maclaje, desplazamiento recíproco y giro de granos. Durante la deformación plástica ocurren los siguientes fenómenos: rompimiento del grano, orientación de granos a lo largo de la dirección de deformación, tensiones entre granos, etc. . Todos estos fenómenos indican que las propiedades plásticas se reducen y que las propiedades de resistencia (límite de fluencia, resistencia a la fractura, etc.) se incrementan (8).

El proceso de laminación provoca la deformación de los cristales. La deformación en un principio es temporal ( cuando la fuerza aplicada proporciona una deformación menor al límite elástico del metal que se trabaja ), cuando se incrementa la fuerza, el acero alcanza un estado de deformación permanente y en ese momento el cristal pierde sus dimensiones originales formando cristales más pequeños. La destrucción de los cristales originales es lo que da lugar a cambios en las propiedades del acero, Fig 2.

Los lingotes se convierten en productos útiles al laminarse en caliente en dos pasos:

- 1) laminando el acero en "billet", tocho y palanquilla.
- 2) trabajando los "billets", tochos y palanquillas en perfiles.

El laminado en caliente se usa en el conformado inicial o "rompimiento" dendrítico de los lingotes. Con la elevada temperatura se incrementa la maleabilidad y se alcanza un mayor índice de deformación (9). La temperatura en este proceso es superior a la temperatura de recristalización del acero (0.8 Tf (6)), (10).

Ventajas que ofrece el trabajado en caliente:

- a) Se incrementan dureza y ductilidad del metal.
- b) Ya que la estructura de grano se refina, el metal adquiere tenacidad.
- c) El metal también adquiere tenacidad porque los poros son eliminados, la escoria y otras impurezas se comprimen dentro de las fibras metálicas las cuales tienen orientación definida y homogénea.
- d) En el trabajado en frío se requiere de mayor fuerza y el proceso es más lento.
- e) En el trabajado en caliente se pueden conformar secciones complejas debido a la recristalización continua (3).

#### I.1.2. LAMINADORES.

El tren de laminación o laminador es el conjunto de equipos destinados para la deformación plástica mediante rodillos. Los trenes de laminación usados para reducción primaria se conocen como perfiladoras (7). Estos laminadores utilizan dados para la producción de varilla en donde se utilizan alternativamente ranuras de ovalos, romboides, cuadrados, etc.. El metal a conformar se gira 90 grados antes de cada paso, con el propósito de promover el máximo flujo plástico y aumentar así la uniformidad del producto (3), Fig.3.

Del laminador de perfiles finos se obtiene varilla redonda corrugada de 10 a 30 mm de diámetro y de mayor diámetro cuando es necesario, (los diámetros y corrugaciones se especifican en las normas para estos aceros, I.2 ).

El número de corrugaciones y el espaciamiento existente entre éstas resulta de gran importancia ya que, estas salientes inhiben el movimiento longitudinal del concreto que se encuentra a su alrededor (11).

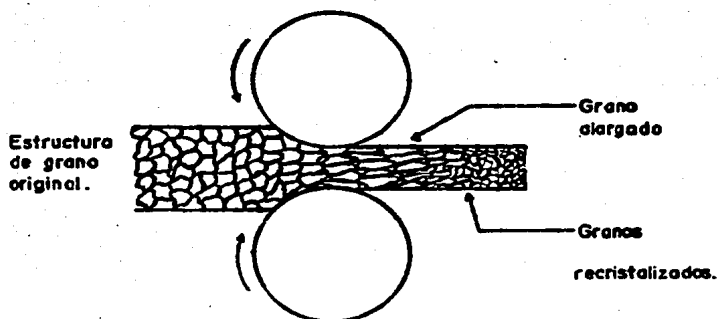


Fig. 2. Efecto del laminado sobre la estructura de grano.

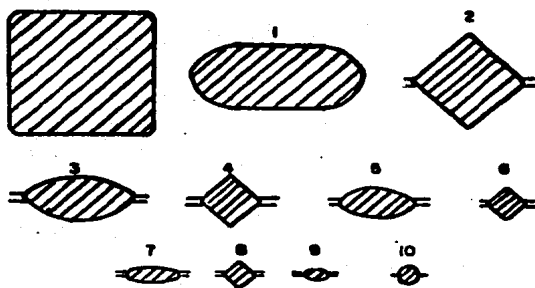


Fig. 3. Número de pasadas y secuencia en la reducción de la sección transversal de un facho, hasta barra redonda.



## 1.2. PROPIEDADES MECANICAS.

El concreto y el acero forman en conjunto una unidad que proporciona al acero propiedades específicas de resistencia flexión, flexocompresión y torsión:

Los elementos estructurales se dimensionan de modo que, bajo cargas nominales (cargas en condiciones de servicio), los esfuerzos y las fuerzas internas (momento flexionante, fuerza cortante, cargas axiales y momento torcionante) no excedan de ciertos valores y que cumplan con los requisitos establecidos por la Dirección General de Normas ( en México).

El concreto a utilizar es el que cumpla con las características y propiedades mecánicas ( resistencia a la compresión, principalmente). El concreto generalmente utilizado en las construcciones es una mezcla de cemento Portland, arena, agua y agregado de pH alto, aproximadamente 12 (12).

Las normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto, admiten el empleo de los siguientes tipos de acero de refuerzo:

a) Barras corrugadas laminadas en caliente en tres grados, 30, 42, 52. Norma NOM B6 1983. \* Varillas corrugadas y lisas de acero procedentes de lingote o palanquilla, para refuerzo de concreto\* (13).

b) Barras corrugadas torcidas en frío en tres grados, 42,52,60. Norma NOM B294 1972. \* Varillas corrugadas de acero, torcidas en frío procedentes de lingote o palanquilla para refuerzo de concreto\* (14). ( La actual norma es la NOM B294 1986, designada bajo el mismo nombre), (15).

c) Malla electrosoldada de alambre liso estirado en frío. Norma NOM B253 1974 "Malla de alambre de acero soldado, para refuerzo de concreto" (16).

En estribos y aplicaciones secundarias se admite el uso de alambón, según la norma NOM B6 1974 de barras lisas del número 2 grado 30 .

Las normas para la construcción de estructuras de concreto no incluyen el uso de barras provenientes de riel (Norma NOM B18 1974) y de eje (NOM B32 1974), ya que, no aseguran una ductilidad adecuada y además porque no se producen en México en forma continua (11).

En estas normas se especifica que la soldabilidad del acero no forma parte de las mismas.

Estos aceros deben cumplir con las propiedades mecánicas de resistencia a la tracción y doblado, teniendo en cuenta dureza, tenacidad y ductilidad. Por lo tanto, es también importante considerar algunos factores como contenido de carbono, microestructura, tamaño de grano y tipo de laminación.

Las propiedades mecánicas se definen como la respuesta característica de un material a soportar esfuerzos aplicados. Los aceros por ejemplo, deben tener la habilidad para resistir diversas cargas sin que exista una excesiva deformación permanente. Por lo que las propiedades mecánicas se dividen en dos grandes categorías; resistencia y ductilidad. La resistencia a la tensión es la habilidad del material para resistir fuerzas aplicadas, y la ductilidad es una medida de la habilidad del material para sufrir cambios permanentes de forma, sin que se produzca ruptura.

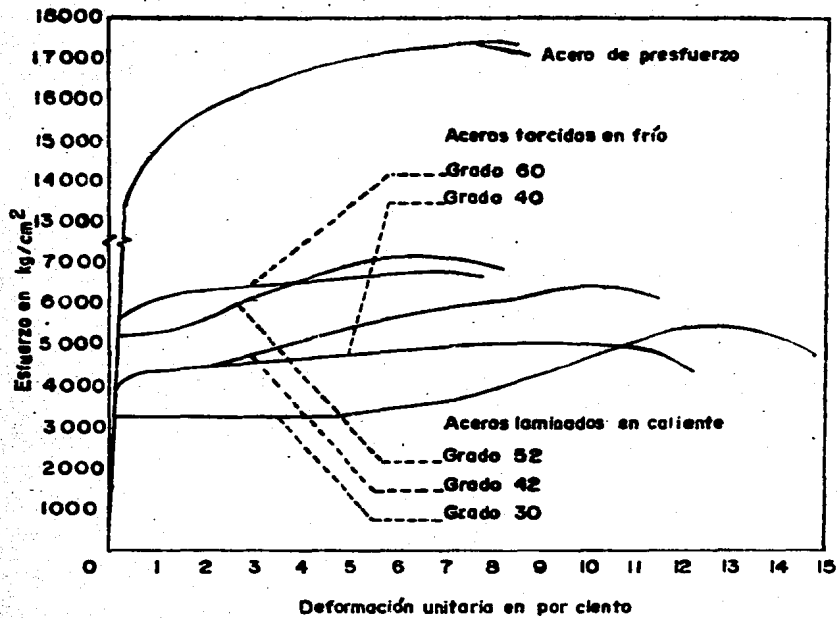
El comportamiento mecánico también depende de la tenacidad y se define como la medida de la energía por unidad de volumen necesaria para deformar un material hasta el momento en que inicia la fractura de la fractura (18).

Las reacciones mecánicas de los metales a fuerzas aplicadas son muy diversas, y estas dependen de la naturaleza exacta de las fuerzas y las condiciones dentro de las cuales ellas son aplicadas (en torsión, tensión, compresión, etc.). Para seleccionar el tipo de ensayo mecánico de tal forma que, este sea lo más parecido a las condiciones de servicio del material y que nos proporcione la información necesaria para realizar una evaluación confiable.

En la Tabla I, se muestran los requisitos de tensión para aceros laminados en caliente y torcidos en frío, de las normas NOM E6 1983 (13) y NOM B294 1986 (14) respectivamente, la Figura 4 muestra las curvas esfuerzo-deformación para los mismos aceros en diferentes grados.

TIPO DE ACERO	GRADO	ESFUERZO DE FLUENCIA kg/cm <sup>2</sup>	ESFUERZO MAXIMO kg/cm <sup>2</sup>	ALARGAMIENTO SOBRE 203cm %
LAMINADO EN CALIENTE B6 1974	30	3,000	5,000	7 a 11
	42	4,200	6,300	7 a 9
	52	5,200	7,000	5 a 8
TORCIDO EN FRIO B294 1972	42	4,200	5,200	8
	50	5,000	6,000	8
	60	6,000	7,000	8
ALAMBRE PARA MALLA ELEC-TROSOLDADO B253 1974	50	5,000	5,700	No especificado

TABLA I. ESPECIFICACION MINIMA DE PROPIEDADES PARA ACEROS DE REFUERZO PARA CONCRETO.



**Fig 4. CURVAS TÍPICAS ESFUERZO/DEFORMACION PARA DISTINTOS TIPOS DE ACERO DE REFUERZO.**

### I.3. INCLUSIONES.

De las inclusiones, las no metálicas son las que con mayor frecuencia se encuentran en los aceros, estas ejercen una fuerte influencia en las propiedades mecánicas de estos (18).

Las inclusiones son partículas de impurezas contenidas en un metal (19), y suelen clasificarse como:

1) Inclusiones exógenas.- Se generan con el arrastre mecánico de refractario, escoria, escamas de óxido y otras impurezas, varían en forma y composición. En soldaduras suelen llamarse inclusiones de escoria (Cap. II).

2) Inclusiones endógenas .- Son aquellas que se forman dentro del mismo baño por las reacciones químicas de la escoria y los desoxidantes, y estas pueden ser de dos tipos:

a. Inclusiones primarias . Precipitan directamente como sólidos o líquidos, antes o después de la solidificación.

b. Inclusiones secundarias. Precipitan durante la solidificación del acero, también como sólidos o líquidos (20).

En base a la composición química pueden clasificarse como sigue:

\_\_\_Sulfuros. Estos pueden ser simples ( FeS, MnS, CaS ) o complejos [Mn,Cr]S .

\_\_\_Silicatos. Por ejemplo :  $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$  .

\_\_\_Aluminatos . Tales como :  $MnO \cdot Al_2O_3$  (21).

En general, todas las sustancias de alto punto de solidificación existentes en el metal líquido, pueden quedar retenidas al solidificar el metal, formando una multitud de colonias de partículas pequeñas dispersas en este, las cuales generan concentraciones de esfuerzos (20).

El deterioro de las propiedades en los aceros debido a las inclusiones no dependen solamente de su mayor o menor abundancia, sino su disposición, distribución, configuración y tamaño (22).

### I.3.1 ORIGEN DE LAS INCLUSIONES.

Se han generado gran cantidad de investigaciones acerca del origen de las inclusiones tipo óxido en el acero, sobre todo porque existen diferentes procesos de fabricación y diversos tipos de aceros, los cuales requieren de diferentes técnicas de fusión, desoxidación y colado, y a su vez generan una gran variedad de inclusiones. Por tales razones, se hace complicado explicar el origen de las inclusiones.

El procedimiento propuesto por Kiessling y Lange (23), proporciona una guía acerca del origen de las inclusiones y el tipo de inclusiones más frecuentes en el acero. Indica los diferentes tipos de inclusiones (endógenas) esperadas, por los porcentajes en peso de los elementos "base" Mn, Si y Al. La influencia de los elementos calcio y aluminio utilizados como desoxidantes, generan también otro tipo de inclusiones.

Impurezas no-metálicas: los elementos Mn, Si, P y S, se presentan en el acero con el carácter de impurezas no-metálicas (18).

El silicio agregado al baño metálico con fines desoxidantes queda parcialmente en solución aumentando el límite elástico de la ferrita. Sin embargo si se rebasa el 0.35% el silicio puede ser considerado como impureza y puede también formar inclusiones constituidas por silicatos que disminuyen las propiedades

mecánicas del acero. Así, cuando se agrupan y alinean estas durante el estirado, pueden producir grietas peligrosas.

El manganeso es añadido para eliminar el azufre y evitar que se forme el FeS logrando la formación del MnS.

El azufre es una impureza peligrosa ya que con el FeS, con el sulfuro de manganeso y un exceso de hierro forma un eutéctico ternario frágil cuyo punto de fusión es de  $980^{\circ}\text{C}$ , este eutéctico contornea los granos de austenita y fragiliza el acero. Además por su bajo punto de fusión puede provocar que con un calentamiento a temperaturas superiores se funda y se separen los granos por la falta de cohesión. Este fenómeno constituye la fragilidad en caliente de los aceros. Si la cantidad de manganeso es ocho veces mayor a la del azufre se logra evitar la formación del FeS y del eutéctico. El contenido de azufre aceptable en aceros de refuerzo de concreto es de 0.05 a 0.06%.

El fósforo se disuelve en hierro gamma y en hierro alfa proporcionando gran fragilidad al acero. Tiene una alta tendencia a segregarse y gran repulsión por el carbono, por lo que en las zonas segregadas se empobrece el carbono quedando el acero heterogéneo. De aquí que con el laminado se logran constituir grandes bandas ferríticas (ricas en fósforo y pobres en carbono) y perlíticas (ricas en carbono y pobres en fósforo) que son muy perjudiciales para el acero. En los aceros comunes se permite hasta 0.06% de fósforo (24), (18).



CAPITULO II.

SOLDADURA Y SOLRABILIDAD.

## CAPITULO II. SOLDADURA Y SOLDABILIDAD.

En este capítulo se habla acerca de la importancia de la soldadura de varillas dentro del campo de la construcción, y de la soldabilidad del acero.

### II.1. SOLDADURA.

El proceso de soldadura consiste en unir o juntar partes metálicas por medio de calentamiento, a temperaturas inferiores a su punto de fusión y que se unan con un metal fundido de relleno. Con la finalidad de lograr partes únicas con propiedades mecánicas iguales.

Las uniones soldadas se llevan a efecto por:

a) Soldadura plástica o soldadura a presión . Los bordes de las piezas a unir son calentadas entre 1500 y 1550 °C (zona bifásica + L) (25) y se empalman por medio de fuerzas externas, la composición química no se altera y se obtiene un pequeño cambio en la microestructura.

b) Soldadura por fusión . Se calientan las piezas en forma localizada hasta fundirse, mezclándose el metal base y el metal de aporte. En este tipo de uniones se efectúan cambios en la composición química y en la microestructura como consecuencia de la heterogeneidad de los materiales y la rapidez de enfriamiento (26).

La soldadura por arco eléctrico es la de mayor interés para este trabajo ya que es un procedimiento comúnmente utilizado en la unión de varillas de acero para refuerzo de concreto (27).

#### II.1.1. SOLDADURA DE ARCO ELECTRICO.

En el proceso de soldadura por arco se logra la unión por

fusión y solidificación. El proceso es de amplia aplicación y se basa en el calor aportado por el arco eléctrico. Aquí, los bordes del metal son calentados y logran fundirse debido al calor del arco que se produce entre el electrodo y el metal base. La alta temperatura del arco (cerca de  $6000^{\circ}\text{C}$ ) asegura un calentamiento rápido.

En la soldadura por arco se utiliza corriente directa o corriente alterna. La soldadura con corriente alterna tiene mayor aplicación ya que el equipo es de menor tamaño y costo. El servicio y mantenimiento son sencillos, además el consumo de energía eléctrica es hasta un 50 % menor, si se compara con el uso de corriente directa.

Las fuentes de energía para la soldadura con arco son: generadores de corriente directa y transformadores de corriente alterna, estos últimos pueden ser destinados para soldar con uno o varios arcos eléctricos (26).

Durante la producción del arco se logran dos tipos de resistencia eléctrica, uno en el momento de iniciarse el arco y otro cuando el arco ya está establecido. En la iniciación el arco tiene que vencer la barrera del aire, que opone gran resistencia. Una vez iniciado este, los gases de la barrera se ionizan por lo que se vuelven conductores de tal forma que la resistencia se reduce quedando el arco en corto circuito (27).

El arco eléctrico está compuesto de dos partes, una consta de un plasma interior que se forma por los gases ionizados y vapores provenientes de materiales sólidos volatilizados, los átomos cargados positivamente juegan un papel importante en el

envío de corriente a través del arco. Otra parte consta de una flama y representa una zona de menor temperatura, los átomos del gas molecular previamente disociados en el plasma por efecto de la alta temperatura, se recombinan y liberan el calor absorbido durante la disociación.

En la soldadura de arco la diferencia de potencial se establece entre el electrodo y las piezas que se van a unir. Cada uno de los polos recibe el nombre apropiado, el ánodo es el polo positivo y los electrones son atraídos por él, el cátodo es el polo negativo y atraerá cualquier partícula o ión que este cargado positivamente (28).

Cuando se utiliza corriente directa, pueden existir dos tipos de polaridades. Se llama polaridad directa cuando la pieza que se suelda es positiva (ánodo). La polaridad es inversa cuando la pieza es negativa (cátodo), en este caso generalmente sucede que, el calor es producido principalmente en el ánodo y solo una tercera parte en el cátodo.

Cuando es utilizado la corriente alterna, la distribución del calor entre el electrodo y la pieza es aproximadamente la misma.

El metal de aporte es transportado fundido a través del arco, incluso contra la fuerza de gravedad, empujado por un campo (27).

La distancia de penetración del metal de aporte al metal base puede ser controlada, dependiendo de la cantidad de corriente que se consuma.

Es importante considerar que en la mezcla del metal de aporte y del metal base (baño metálico) se pueden retener

favorablemente grandes cantidades de gases y si este no es protegido contra los gases atmosféricos, químicamente podrían combinarse oxígeno y nitrógeno, y después del enfriamiento las soldaduras pueden aparecer relativamente porosas ( II.1.4 ),(29).

### II.1.2. ELECTRODOS PARA SOLDADURA ELECTRICA.

Para soldaduras por arco eléctrico se utilizan dos tipos de electrodos; electrodos de metal y electrodos de carbono. Para soldadura a mano pueden ser usados electrodos revestidos y sin revestimiento, estos últimos se utilizan muy poco, ya que, no logran asegurar calidad en la unión.

Los revestimientos de los electrodos se obtienen al sumergirse, prensarse y sinterizarse los compuestos minerales. Según su destino estos pueden ser electrodos ionizantes y electrodos de calidad. En los dos casos la función principal es reaccionar químicamente y actuar como oxidantes, reductores, desulfurantes, fundentes y disolventes de impurezas.

Los electrodos ionizantes estan constituidos de cal; agua y silicato de sodio o potasio, pero esta mezcla solo garantiza la estabilidad del arco, sin que el metal fundido esté protegido del medio ambiente.

Los electrodos de calidad constan de material ionizante (cal), formadores de escoria (caolín), formadores de gas (almidón), desoxidantes (aluminio y ferromanganeso), aleantes y sustancias cohesivas. Estos revestimientos al producirse el arco, crean un vapor o gas inerte cerca del área donde se va a soldar, el cual protege al metal fundido del medio ambiente. También se

forma una escoria en el baño metálico, que al poseer menor densidad sube hacia la superficie y protegen a la unión de la influencia del nitrógeno y oxígeno. Además, estas escorias moderan el enfriamiento y provocan un mayor desprendimiento de gases, logrando que la unión sea más compacta. Después del enfriamiento esta escoria puede ser removida fácilmente (26),(29),(30).

El tipo de revestimiento del electrodo juega también un papel importante en estas propiedades, y suelen clasificarse de la siguiente manera:

a) Los que se funden e introducen un elemento de aleación en el acero por lo que se le puede mejorar la dureza, resiliencia y elasticidad en la soldadura.

b) Los que se combinan con el oxígeno transformándose en escoria.

c) Los que se volatilizan produciendo una atmósfera protectora alrededor del arco (31).

Los electrodos de carbono presentan desventajas, por lo que se prefiere el uso de electrodos metálicos, ya que estos poseen la ventaja de que volatilizan el metal del electrodo y del recubrimiento (32).

### II.1.3. ZONA AFECTADA POR EL CALOR.

La soldadura con arco implica muy altas temperaturas, lo cual provoca grandes contrastes en los resultados, ya que el metal base cercano a la soldadura presenta una temperatura menor que el metal de aporte, así pues la zona afectada por el calor dependerá de los siguientes parámetros: de la temperatura máxima

a la que esta sujeta la varilla, del tiempo de permanencia a esa temperatura, de la composición química del acero y de la velocidad de enfriamiento. Puesto que afecta la estructura de grano y por consiguiente las propiedades mecánicas (33).

Un análisis a fondo de la zona afectada por el calor, permite conocer el porque existe una estrecha relación entre las condiciones térmicas, la microestructura y las propiedades mecánicas. Para ello se han supuesto cinco zonas de acuerdo con la temperatura que se alcanza, Fig. 5.

Zona A . Es la que forma la unión, la estructura es de grano grueso ya que es característica del metal fundido.

Zona B . Esta colinda con el metal de la soldadura y es conocida como metal recalentado. Debido a la influencia térmica se forman granos grandes de austenita y como consecuencia de un enfriamiento rápido estos se transforman en gran cantidad de perlita y pequeñas cantidades de ferrita. Si los granos de austenita crecen mucho, al producirse el enfriamiento logra formarse la estructura widmanstatten, en donde la ferrita se precipita a lo largo de los planos de cristalización de la austenita, lo que disminuye la ductilidad y resistencia al impacto (34). Esta zona reduce la plásticidad y la resiliencia del acero.

Zona C . Al inicio de esta zona (límite con B), la estructura del metal base es austenítica. En esta zona no existe un crecimiento de grano y durante el enfriamiento se produce gran cantidad de perlita y escasa cantidad de ferrita. Al final de esta zona (límite con D) la temperatura está justamente arriba de

Ac<sub>3</sub> del diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C, la austenita es heterógena en cuanto al contenido de carbono. De aquí que cuando se produce el enfriamiento se obtiene ferrita y perlita de tipo gruesa y fina respectivamente.

Zona B. Se encuentra abajo de la línea de transformación BS, esto es entre los puntos A<sub>1</sub> y A<sub>3</sub> del diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C. En esta área únicamente se transforma la perlita en austenita y debido al lento enfriamiento se obtiene perlita gruesa.

Zona E. Por encontrarse abajo de la línea A<sub>1</sub> no se logra alcanzar la recristalización del acero, por lo que no existen modificaciones estructurales y solamente la cementita de la perlita logra una pequeña globulización.

Podemos observar que, entre la zona A y C, la influencia térmica modifica grandemente las propiedades de la unión (32), (26).



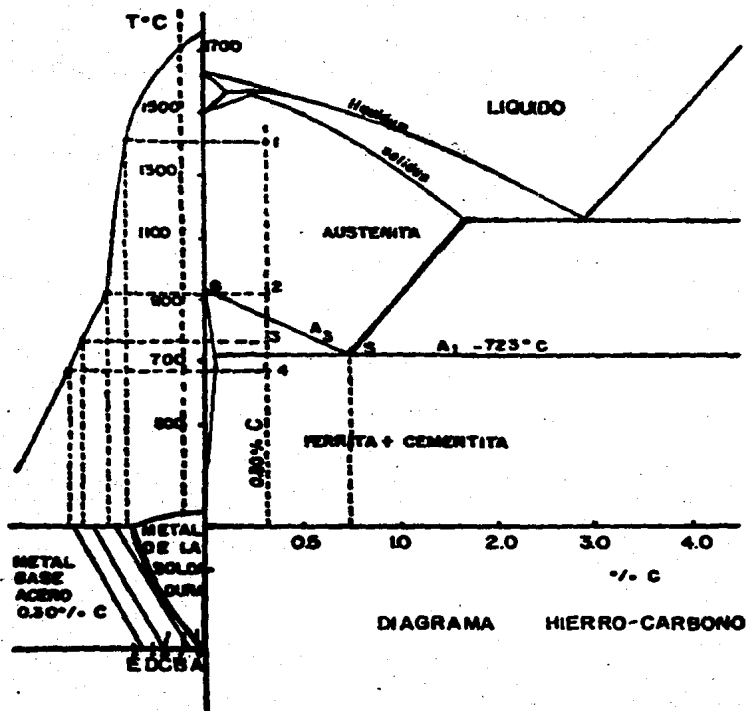


DIAGRAMA HIERRO-CARBONO

Fig. ZONA AFECTADA POR EL CALOR EN UNA VARILLA SOLDADA.

#### II.1.4. DEFECTOS EN LAS UNIONES SOLDADAS.

Una soldadura puede ser considerada como un proceso de fusión, refinación, colada y solidificación en pequeña escala y en esta pueden encontrarse defectos como los producidos en la colada de un lingote.

**POROSIDADES.**-Los poros surgen porque la solubilidad del gas decrece cuando ocurre el enfriamiento, este gas puede ser hidrógeno y es proveniente de diversas fuentes como, humedad de las piezas de trabajo, recubrimiento de los electrodos, etc.. El hidrógeno se absorbe en el metal y después se expulsa en el enfriamiento, si esto no ocurre, la burbuja queda atrapada en el metal. La porosidad puede también ocurrir como resultado de la reacción de hidrógeno con inclusiones de azufre en el metal base.

Cuando el recubrimiento de los electrodos contiene carbonatos, estos pueden disociarse por efecto de las altas temperaturas y promover la formación de gas. Si el recubrimiento cae dentro de la soldadura, al quemarse este se producen descargas súbitas de gas, las cuales producen sopladuras. Con las altas temperaturas las soldaduras generan incrementos en los límites de solubilidad y agitación del baño, quedando en solución gran cantidad de oxígeno y nitrógeno causando el deterioro de la soldadura.

La oxidación que rodea los granos debilita grandemente las propiedades de resistencia al impacto y resistencia a la fatiga en la unión. El nitrógeno puede formar nitruro de hierro que al precipitarse fragiliza a la soldadura.

Uno de los principales factores que favorece la formación de porosidades es el enfriamiento rápido de la soldadura y puede

disminuirse si el enfriamiento se modera.

**INCLUSIONES NO METÁLICAS.**- Las inclusiones no metálicas en una soldadura son originadas de la escoria derivada del recubrimiento del electrodo y de los procesos de desoxidación. Los posteriores tipos de inclusiones son de pequeña consecuencia ya que, usualmente son insignificantes y se encuentran dispersas. Dependiendo del tipo, tamaño, cantidad, interespaciamiento, distribución y orientación, de las inclusiones, se determina si la unión puede fallar (35), (Cap.I).

**FUSION Y PENETRACION.**- Son defectos que se relacionan entre si, el grado de penetración es relativo y puede ser considerado con respecto a las especificaciones requeridas. Una fusión incompleta se refiere a una condición en la cual, la interfase soldadura-metal base no logra coalescer, evitando el enlace metálico y puede ser causado por una insuficiente aplicación del calor para elevar la temperatura del metal base al punto de fusión o a impurezas de óxidos en los metales.

Una penetración inadecuada se refiere a que la fusión es correcta, sin embargo la zona fundida no se extiende dentro de la unión con suficiente profundidad.

**FRACTURA EN CALIENTE.**- La formación de fracturas en caliente en soldaduras de acero de bajo carbono depende de; el grado de limitación de la unión, la composición del acero, la razón de enfriamiento, la cantidad de energía calorífica inicial y del tipo de estructura obtenida en la solidificación.

Una unión muy estrecha ocasiona lo siguiente: aumenta la contracción térmica en la soldadura depositada, las altas

temperaturas iniciales, los rápidos enfriamientos y la formación de estructuras columnares favorecen la formación de fracturas en caliente.

Internamente, las causas principales de las fracturas son las tensiones debidas a la contracción en el metal de aporte y los efectos de segregación.

Como resultado de la segregación algunos elementos residuales, particularmente el azufre, pueden lograr considerables concentraciones en la última porción del metal al enfriarse. Si la velocidad de soldeo y la temperatura son altas, ocurre que en el baño metálico se crea una acumulación de elementos residuales a lo largo de la línea central de la soldadura y tienden a formar compuestos de bajo punto de fusión, Estos son débiles relativamente ya que, incrementan la tendencia a la formación de fracturas bajo tensión.

La susceptibilidad a la fractura se incrementa cuando, aumenta el contenido de carbono y decrese la relación manganeso-azufre.

Las fracturas en caliente típicamente son orientadas en forma longitudinal o pueden ser fracturas de crater en forma de estrella, estas no son muy peligrosas pero pueden actuar como núcleos para la formación de fracturas por fatiga.

**DANO POR HIDROGENO.**- Además de la producción de porosidades y sopladuros ocasionadas por las altas concentraciones de hidrógeno, pueden también producirse fracturas, debido al establecimiento de un gradiente de concentración de hidrógeno entre el interior y la superficie de la soldadura.

El tipo de fractura es principalmente longitudinal se forman

en la zona afectada por el calor y suelen también encontrarse adyacentes a la intercara de la soldadura. Por naturaleza estas son fracturas intergranulares.

Otra de las características del daño por hidrógeno es que las fracturas producen fragilidad y, puede ocurrir en días o semanas después de que la unión fué hecha. La soldadura puede fracturarse cuando se le somete a un amplio rango de esfuerzos, por lo tanto, los esfuerzos requeridos son inversamente proporcionales a la cantidad de hidrógeno presente en solución.

Una de las formas de prevenir el daño por hidrógeno es usando los electrodos llamados de bajo hidrógeno.

**REFUERZO EXCESIVO.**- Un refuerzo excesivo es cuando el borde de la soldadura es más alto que el metal base. Su principal característica es que se disminuye la resistencia a la fatiga de la unión y es proporcional a la agudeza del ángulo. En efecto, se forma un ángulo entre el metal base y el borde de la soldadura de refuerzo y dependiendo de la agudeza de este puede resultar perjudicial, pues se elevan las tensiones.

El refuerzo excesivo puede ser removido por un pulido que disminuya lo más posible el ángulo, para evitar la disminución de las propiedades (36),(37).

**CORROSION.**- Es una reacción química o electroquímica del metal con el medio ambiente, que frecuentemente conduce a fallas durante el servicio de las partes metálicas.

La velocidad y extensión de la corrosión se ven influenciadas por la naturaleza, composición y uniformidad (o heterogeneidad) del medio ambiente y de la superficie metálica

que esta en contacto con él.

El progreso de la corrosión aumenta con la temperatura y los gradientes de temperatura existentes en la interfase metal-medio ambiente.

Normalmente la junta resistirá la corrosión lo mismo que el metal que va a ser soldado. Por lo tanto, algunas veces habrá que hacer excepciones en ambas partes, porque se presentan variaciones en la composición química y cambios metalúrgicos y mecánicos por efecto del proceso de soldadura.

Existe una variedad de formas de corrosión localizada, sin embargo, solo algunas son particularmente relevantes en las uniones soldadas.

**CORROSION GALVANICA.**- Esta puede ocurrir cuando dos metales diferentes son puestos en contacto y son expuestos en una solución conductora. Existe una diferencia de potencial eléctrica entre los dos metales que aumenta la susceptibilidad a la corrosión.

**GRIETAS POR CORROSION.**- Con el tiempo, las condiciones ambientales en una grieta pueden crear verdaderas diferencias superficiales, un medio más agresivo puede desarrollarse y causar un ataque local en la grieta. Las grietas en las soldaduras pueden suceder de varias formas: por porosidades superficiales o fracturas pequeñas, escoria o escamas de soldadura depositada, penetración inadecuada de la unión y defectos de diseño.

**CORROSION INTERGRANULAR.**- Los límites de grano son algunas veces atacados preferencialmente. El ataque comúnmente esta relacionado con la segregación de elementos específicos o con la formación de compuestos en los límites de grano.

Este tipo de corrosión generalmente ocurre porque, el agente corrosivo ataca preferencialmente la fase del límite de grano o la zona adyacente a él ya que, pierde un elemento necesario para su resistencia a la corrosión.

**CORROSION BAJO TENSION.**— La acción conjunta de un esfuerzo de tensión y un agente corrosivo dará como resultado la fractura del metal. Entre más cantidad de elementos aleantes contenga el acero, más susceptible será a este problema. Afortunadamente el número de combinaciones metal-oxidante son relativamente pocas. Pero la corrosión bajo tensión es todavía el problema metalúrgico más serio a resolver en la actualidad.

Las fracturas pueden ser del tipo intergranular o transgranular, con tendencia a fracturar la unión soldada con mayor amplitud.

Las características de fracturas por corrosión bajo tensión son :

a). La corrosión bajo tensión requiere de esfuerzos tensiles continuos ( o cíclicos ).

b). La fractura frágil aparece macroscópicamente, considerando las fallas mecánicas de la misma aleación, sin embargo en ausencia de un agente oxidante específico aparecerá como una fractura dúctil.

c). Depende de las condiciones metalúrgicas de la aleación.

d). Algunos medios ambientales específicos causarán fracturas en una aleación dada, pero ~~no~~ ocurrirá lo mismo en otras aleaciones.

e). Este tipo de corrosión deja de ser uniforme cuando

ocurre la fractura.

f). Largos periodos de tiempo pueden pasar antes de que las fracturas sean visibles y, cuando estas se propagan rápidamente, resultan fallas inesperadas (36), (37), (38).

#### II.1.5. PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA.

La experiencia acumulada de muchos años ha permitido la integración de manuales, y reglamentos en muchos casos, que indican los procedimientos que deben seguirse en la soldadura eléctrica, para obtener uniones con propiedades óptimas, y de buena calidad.

En Estados Unidos de Norteamérica se cuenta con el Código de Soldura Estructural para Acero de Refuerzo elaborado por la American Welding Society, Inc. ( AWS D14-79 ), (39). En México la empresa Petroleos Mexicanos, tiene la norma No. 3.203.01 llamada Construcción de Estructuras de Aceros, que rige únicamente dentro de sus instalaciones (40). Sin embargo en México no existe un manual, reglamento o código de soldaduras por parte de la Dirección General de Normas, para la construcción de estructuras gubernamentales o particulares.

Existe el manual para diseño y construcción de estructuras de concreto reforzado patrocinado por la Comisión Coordinadora de la Industria Siderurgica en 1979 (11), en donde se hacen una serie de recomendaciones para soldar barras de acero de refuerzo de concreto de diferentes calibres. Su contenido se apega al código de AWS y a la norma de PEMEX.

Los procedimientos para soldar de estos manuales y de los reglamentos se resumen en seguida:



a) Asegurarse de la composición química de las piezas que se van a soldar. La soldabilidad de los aceros es muy susceptible al contenido de carbono.

b) Las piezas que se van a soldar deben prepararse mediante la ampliación de la superficie de amarre. Por ejemplo, la soldadura de varillas corrugadas debe prepararse haciendo los cortes que se indican en la Figura 6, llamados biseles y que deben estar libres de óxidos y materia orgánica. Las Figuras 7a y 7b muestran como deben colocarse los cordones de soldadura en varillas que tienen corte de bisel.

c) La selección apropiada de electrodos debe hacerse tomando en cuenta cual es el material que va a soldarse; la dimensión de la sección preparada para la soldadura; la clase de corriente eléctrica disponible, directa o alterna; la posición horizontal o vertical de la pieza; y las propiedades esperadas del material soldado. Como no existe un electrodo universal que de buenos resultados en todo tipo de condiciones, se debe proveer a los soldadores con los electrodos indicados en cada caso.

d) La certeza en la calificación profesional de los soldadores. En las obras de construcción, un número importante de soldaduras deben hacerse en el sitio de manera manual. El soldador debe seguir fielmente los procedimientos de soldadura. Por ejemplo el orden en que se aplican los cordones de soldadura deben seguirse tal y como se indica en las Figuras 7a y 7b para soldaduras horizontales y verticales.

e) La supervisión continua del proceso de soldadura. Debe designarse personal calificado que verifique la composición

químico de las varillas corrugadas, los cortes preparativos a la soldadura y las soldaduras terminadas.

f) La inspección de las soldaduras. En uniones de varillas de alto calibre cada soldadura debe radiografiarse con fuentes de rayos gama. De manera selectiva deben hacerse pruebas mecánicas y metalográficas. Una buena soldadura, por ejemplo, debe resistir una prueba de flexión ( ensayo de doblez ), en un mandril, a 180° sin romperse. La localización de una falla de soldadura durante la inspección es, en algunos países, motivo de suspensión de operación de la obra y de revisión completa de los procesos de soldadura (39), (40) .

La ejecución y el control de soldeo en obra con las características anteriormente señaladas se practica en México. Destaca el ejemplo de Petroleos Mexicanos, donde se han formado soldadores de la más alta calificación y se cuenta con gran experiencia en supervisión de soldeo en obra. Aunque son varias las empresas que se rigen internamente con procedimientos estrictos de soldadura, desgraciadamente no existe en México una reglamentación general.

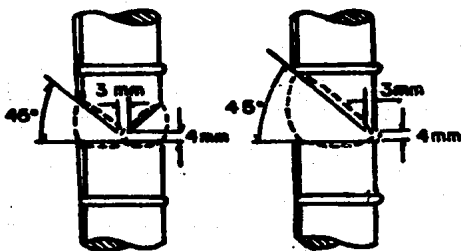


Bisel en V sencilla



Bisel en V doble

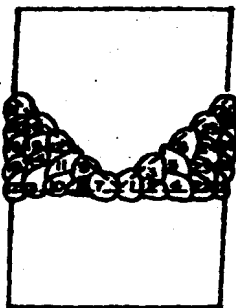
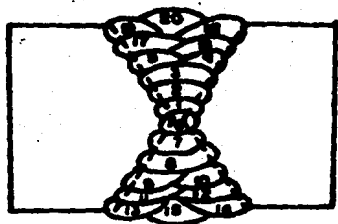
Preparación empleada normalmente para barras en posición horizontal.



Bisel en V sencilla      Bisel en V doble

Preparación empleada normalmente para barras en posición vertical.

Fig. 6. PREPARACION DE LOS EXTREMOS DE LAS BARRAS.



Varillas en posición horizontal.

Varillas en posición vertical.

Fig. 7a. SECUELA PARA LA COLOCACION DE LOS CORDONES DE SOLDADURA.

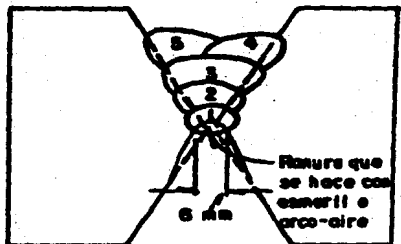


Fig. 7b. PREPARACION DE LA RAIZ DE LA JUNTA ANTES DE EMPEZAR A SOLDAR POR EL SEGUNDO LADO.

### II.1.6. INSPECCION DE PIEZAS SOLDADAS.

La inspección juega un papel muy importante para la obtención de una buena soldadura. La inspección debe realizarse, antes de iniciarse los empalmes, proseguirse durante todo el tiempo que dure el trabajo y concluirse cuando éste terminada.

Para asegurar que las uniones sean de alta calidad, se sugieren los siguientes pasos: 1) establecer buenos procedimientos de soldadura (II.1.4), 2) tener soldadores precalificados y 3) emplear inspectores competentes de taller y de campo.

La calificación de los soldadores debe realizarse de acuerdo con las pruebas que establece el código AWS-D1.4-79 (American Welding Society) (39), considerando que la calificación del soldador debe ser hecha por un inspector calificado.

Los problemas que presenta el soldeo y los defectos de una mala aplicación de la soldadura, ha hecho que sea necesario contar con métodos de prueba que garanticen que la unión es aceptable (Fig 12). (29),(42). Clasificación de las pruebas:

Pruebas no destructivas

Líquidos penetrantes.  
Radiografía.  
Ultrasonido.  
Partículas magnéticas.

Pruebas destructivas

Observación macroscópica.  
Observación microscópica  
Resistencia a la tracción.  
Ensayo de dureza.  
Ensayo de doblez.

Las pruebas no-destructivas sirven principalmente para detectar fallas y permiten la inspección total ( hasta un 100% ). Las pruebas destructivas ayudan a determinar las causas que las originan. Las dos pruebas califican el comportamiento que tendrá la junta (32).

## II.2. SOLDABILIDAD.

El definir la soldabilidad como la factibilidad de hacer soldaduras resistentes y bien acabadas (41), resulta un concepto relativo, ya que, puede suceder que una soldadura sea factible desde el punto de vista metalúrgico, pero irrealizable desde el punto de vista de diseño. Por lo tanto debe considerarse una definición global tal como la siguiente: " La soldabilidad es la capacidad de un metal o combinación de metales a ser soldados bajo adecuadas condiciones de fabricación de una estructura y el poder desarrollarse satisfactoriamente en el servicio en condiciones normales ".

La soldabilidad de una pieza se refiere a que el metal base y el metal de aporte pueden ser combinados dentro del grado de dilución apropiado, sin la producción de constituyentes o fases indeseables (38), (37).

Las proporciones de los elementos químicos y los elementos residuales (estos no están especificados), logran un profundo efecto en la soldabilidad.

### II.2.1. SOLDABILIDAD METALURGICA.

SOLDABILIDAD METALURGICA.- Esta, está referida a materiales

que pueden ser templables o no templables.

a) Materiales templables. - Estos materiales ejercen gran influencia en la soldabilidad, ya que, la zona afectada por el calor resulta diferente.

El análisis de estos sucesos ha llevado a muchos autores a relacionar la templabilidad (con respecto a la composición química) con las transformaciones microestructurales, creando el término Carbono Equivalente (43) el cual se da por la fórmula siguiente (ANSI/ASTM A 706- 76), (44) :

$$C.E. = \%C + \%Mn/6 + \%Cu/40 + \%Ni/20 + \%Cr/10 - \%Mo/50 - \%V/10 \quad (1)$$

donde los elementos se describen de acuerdo con la notación internacional y los porcentajes están expresados en masa, el carbono equivalente además de poder determinar la temperatura Ms, nos indica el índice de templabilidad. Aunque se han creado varias expresiones sobre este término todas dan resultados aproximados.

b) Materiales no templables. Los materiales que no sufren transformaciones del tipo estructural, también resultan afectados por el calor, ya que provocan modificaciones de carácter metalúrgico en la unión, alterándose las propiedades mecánicas. Estas modificaciones pueden ser, de fases por cambios de solubilidad o por modificaciones de la estructura sin cambios de fase. En el primer caso suceden cambios de solubilidad de algunos elementos químicos, ocurriendo la formación o desaparición de precipitados, cambios en la composición del precipitado o cambios de fase. En el segundo caso, esto puede presentarse cuando los

materiales han sufrido deformación y cualquier calentamiento puede modificar la disposición de los granos.

Otro de los factores que tienen fuerte influencia sobre la soldabilidad metalúrgica es la geometría de la junta, ya que ella puede influir en la velocidad de enfriamiento, pues entre mayor sea la masa de las piezas a unir, mayor será la cantidad de calor que se suministre, aumentando la velocidad de enfriamiento (32).

#### II.2.2. EFEECTO DE LOS ELEMENTOS ALEANTES EN LA SOLDABILIDAD.

En general los elementos pueden ser mezclados en estado líquido y no causar dificultades cuando se produce la solidificación.

Cuando el rango de solubilidad es grande, los elementos pueden ser diluidos en grandes porcentajes, sin que exista la formación de fases secundarias indeseables, sin embargo cuando el límite de solubilidad se excede, puede ocurrir fragilidad, puede presentarse también una sobresaturación debido a la lentitud de las reacciones en el estado sólido y por lo tanto ocurrir precipitación cuando el metal sea recalentado a elevadas temperaturas (endurecimiento por envejecimiento).

La soldabilidad resulta afectada por la formación de fases eutécticas de bajo punto de fusión entre los metales, lo cual puede provocar fracturas en caliente.

Ciertos sistemas metálicos tienen la habilidad de cambiar la estructura cristalográfica, produciendo cambios abruptos de volumen y de solubilidad (de gases principalmente), logrando la formación de fases frágiles y mayores cambios en las propiedades mecánicas.



En algunas ocasiones se adicionan intencionalmente algunos elementos aleantes, para determinar las características metalúrgicas de la unión.

Los contenidos de aleantes como carbono y manganeso son determinantes en gran medida de la soldabilidad, esto es, la soldabilidad disminuye grandemente cuanto menor es la relación Mn/C (5).

En menor medida influyen aleantes como cromo, silicio, cobre, níquel, molibdeno, vanadio. Los contenidos de fósforo y azufre también son importantes, al igual que gases tales como nitrógeno, hidrógeno y oxígeno.

En general estos elementos ejercen su influencia en la microestructura y en las propiedades físicas a través de la unión soldada por medio de lo siguiente:

- 1) Endureciendo las soluciones sólidas en la ferrita.
  - 2) Formando carburos.
  - 3) Formando compuestos intermetálicos.
  - 4) Oxidando o desoxidando el metal fundido.
  - 5) Incrementando o decrementando la dureza de la zona afectada por el calor.
  - 6) Controlan el tamaño de grano.
  - 7) Minimizando el fenómeno de la segregación.
  - 8) Incrementando o decrementando la temperatura de transformación del comportamiento frágil-dúctil (37), (42).
- CARBONO. Los aceros de bajo carbono, con menos del 0.25% en peso, son fácilmente soldables, ya que las uniones no requieren tratamientos térmicos previos o posteriores a la soldadura. Los

Aceros de medio carbono (entre 0.25 y 0.5 %) se pueden soldar satisfactoriamente con arco eléctrico, pero debido a la formación de mayores cantidades de martensita, en muchos casos se requiere de tratamientos térmicos antes y después de soldar. Los aceros de alto carbono, de contenidos mayores de 0.5% en peso, son difíciles de soldar debido a la gran susceptibilidad de formación de grietas y a la introducción de dureza y fragilidad excesivas (26),(43).

**NITROGENO.** El nitrógeno muestra una fuerte tendencia a formar nitruros simples o complejos con otros elementos aleantes del acero, estos nitruros pueden ser particularmente responsables del envejecimiento y de la fragilidad. Cuando el nitrógeno está por encima de 0.008% el acero puede ser soldable pero con condiciones especiales.

**HIDROGENO.** Es conocido que el hidrógeno contribuye a la formación de fracturas frías llamadas también ojo de pescado. Algunos investigadores atribuyen este fenómeno a un efecto combinado del hidrógeno disuelto en la austenita retenida, la razón de calentamiento y enfriamiento, la composición química y la estructura, y la tensión del metal base.

El hidrógeno puede difundirse en el acero a través de los granos y no preferencialmente en los límites de grano como en otros metales. El hidrógeno combinado con el hierro y un esfuerzo de tensión puede actuar como un agente fragilizante.

Aunque solo una pequeña fracción de hidrógeno es soluble en el acero a altas temperaturas (aproximadamente 1371 °C), existe un fuerte manejo de fuerzas para su retención entre el metal de la soldadura y la zona afectada durante el enfriamiento. Si el

hidrógeno atómico disuelto puede escapar se difundir hacia la superficie y se reformará como hidrógeno molecular (gas), favoreciendo a la soldabilidad.

**OXIGENO.** Tiende a formar CO en el enfriamiento y de esta manera formar burbujas en las soldaduras, a menos que los excesos de oxígeno sean convertidos en óxidos por medio de desoxidadores tales como Mn, Si, Al y Ti.

El fenómeno de envejecimiento-deformación en aceros de bajo carbono es atribuido a la precipitación de óxidos, nitruros o carburos en los planos de deslizamiento inducido por la deformación. El fenómeno del envejecimiento esta acompañado generalmente por un incremento en la resistencia a la tracción, pero posiblemente disminuyen la resistencia al impacto y la ductilidad.

**AZUFRE.** Es muy perjudicial cuando existe excesiva segregación, o cuando se forman inclusiones complejas de azufre, este tipo de comportamientos van acompañados de severas fracturas, disminuyendo la soldabilidad de los aceros.

**FOSFORO.** La principal fuente de fósforo en los aceros es el mineral. De una cantidad de 0.05% resulta un notorio incremento en el esfuerzo de cedencia pero un correspondiente decremento en ductilidad. El fósforo tiende a segregarse rápidamente. Este también puede difundirse lentamente permitiéndose la homogenización cuando se realiza un tratamiento térmico o un proceso de soldadura. Esto causa un efecto dómimo en forma de banda y no se permite la difusión del carbono en las áreas de alta concentración de fósforo, causando fragilidad en la unión y

disminuyendo por lo tanto la soldabilidad (24).

### II.2.3. EFECTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS EN LA SOLDABILIDAD.

Para obtener condiciones soldables es necesario que los metales posean una conductividad térmica relativamente alta, una pequeña contracción y un insignificante coeficiente de dilatación lineal. Si el material a unir es de baja conductividad térmica, éste creará dificultades ya que, se presentan concentraciones de calor en una zona limitada. Si además el coeficiente de dilatación lineal y la contracción son mayores, el surgimiento de tensiones aumentará los problemas de soldabilidad.

Si el acero contiene hasta un 0.25% de carbono se logra una buena soldabilidad, sin embargo, cuando este porcentaje se incrementa la conductividad térmica del acero empeora y se aumentan las tensiones internas. Esto es, los aceros de baja aleación y de bajo contenido de carbono son soldables, pero cuando se aumenta el contenido de elementos especiales se empeora la conductividad térmica, se logra una nociva influencia de la tendencia al autotemple, se ven aumentadas las tensiones estructurales de la unión y se contribuye a la formación de grietas (26).

### II.2.4. PROBLEMAS DE METALES CON DIFERENTE COMPOSICION QUIMICA.

Este tipo de problemas surge cuando se combinan metales de diferente composición química ( y diferentes propiedades mecánicas ). a) Cuando los metales base son de la misma composición química y el metal de aporte es de diferente composición, pueden crearse problemas ya que el metal de la

soldadura puede ser más resistente a altas temperaturas que el metal base, logrando la producción tensiones en la zona afectada por el calor del metal base.

b) Cuando los puntos de fusión de los dos metales a unir y el punto de fusión del metal de relleno son diferentes, pueden utilizarse técnicas que minimizen las tensiones de contracción y prevenir las fallas en caliente en el metal base que tenga bajo punto de fusión (38).

CAPITULO III

CASO DE ESTUDIO: LA SOLDABILIDAD DE LA VARILLA EN SEIS EDIFICIOS  
DERRUMBADOS.

### CAPITULO III. CASO DE ESTUDIO : LA SOLDABILIDAD DE LA VARILLA EN SEIS EDIFICIOS DERRUMBADOS.

En este capítulo se hace un análisis de la soldabilidad, de aceros de varilla encontrados en las ruinas de varios edificios localizados en las colonias Roma y Doctores y en el Centro.

Es conocido que muchas especificaciones y normas de varilla de refuerzo de concreto no contemplan la soldabilidad. De hecho la mayoría de la varilla que se usa en las construcciones no es soldable. Las normas nacionales con las que trabaja la industria fabricante de varillas para construcción en México no consideran la soldabilidad la cual queda como responsabilidad del constructor (13),(14).

La unión de varillas corrugadas puede hacerse de manera mecánica, mediante traslapes o abrasaderas, o por soldadura. Aunque las uniones por traslape se aplican en gran cantidad de casos, las uniones soldadas a tope son necesarias para varillas de grueso calibre, aproximadamente de 34 milímetros en adelante. Existen uniones mecánicas a tope para estos calibres, sin embargo, en muchas ocasiones se prefiere la soldadura con arco eléctrico por su menor costo ( CAP.II ).

Se han generado especificaciones industriales de acero de baja aleación para refuerzo de concreto que garantizan la posibilidad de ejecutar soldaduras apropiadamente. Un ejemplo de este tipo de especificaciones es la ANSI/ASTM A706-76 utilizada en Estados Unidos de Norteamérica (44) ( la cual se tomara como base en este trabajo) y la que establece los límites para los contenidos de carbono, manganeso, fósforo, azufre, silicio y carbono equivalente, que se muestran en la Tabla II.

ELEMENTO	LIMITE MAXIMO COMPOSICION (% EN PESO)
CARBONO	0.33
MANGANESO	1.55
FOSFORO	0.043
AZUFRE	0.053
SILICIO	0.65
CARBONO EQUIVALENTE	0.55

TABLE II. COMPOSICION QUIMICA ADECUADA PARA EFECTUAR SOLDADURA.

### III.1. PROCEDIMIENTO.

Dos semanas después de ocurrido el sismo se recolectaron 60 muestras de varilla en seis edificios derrumbados. Los diámetros de las varillas se distribuyen entre 9 y 38 milímetros. La década aproximada de construcción de los edificios se encuentra entre 1950 y 1980.

El análisis químico de las varillas fue realizado mediante un espectrómetro de emisión atómica. En la Tabla III se registran los resultados de los análisis de las varillas recolectadas. El noventa por ciento de las varillas analizadas está dentro de la Norma Oficial Mexicana NOM-B6-1983 (13), en lo que se refiere a composición química.



Núm. de muestra	Década	C	Mn	P	S	Si	Cu	Cr	C.E.
1	70	0.230	1.05	0.025	0.030	0.31	0.330	0.200	0.433
2	70	0.190	0.92	0.030	0.039	0.44	0.350	0.200	0.372
3	70	0.340	1.30	0.038	0.044	0.35	0.330	0.260	0.591
4	70	0.370	1.23	0.031	0.034	0.25	0.460	0.250	0.611
5	70	0.240	0.83	0.012	0.029	0.40	0.280	0.200	0.405
6	70	0.150	1.24	0.020	0.049	0.40	0.320	0.240	0.289
7	70	0.160	0.94	0.030	0.049	0.26	0.300	0.370	0.361
8	70	0.300	1.34	0.025	0.038	0.32	0.260	0.180	0.548
9	70	0.280	1.32	0.020	0.038	0.27	0.250	0.210	0.527
10	70	0.150	0.52	0.017	0.050	0.24	0.310	0.140	0.258
11	70	0.310	1.20	0.019	0.060	0.37	0.300	0.240	0.541
12	70	0.230	0.86	0.018	0.045	0.32	0.230	0.140	0.393
13	70	0.190	0.83	0.019	0.038	0.21	0.290	0.270	0.363
14	60	0.390	0.76	0.064	0.045	0.03	0.070	0.080	0.526
15	60	0.160	0.46	0.048	0.051	0.08	0.320	0.140	0.259
16	60	0.370	0.96	0.056	0.045	0.25	0.060	0.080	0.539
17	80	0.080	0.48	0.074	0.060	0.02	0.110	0.080	0.171
18	60	0.360	0.94	0.054	0.0564	0.03	0.060	0.070	0.525
19	60	0.100	0.34	0.078	0.050	0.03	0.110	0.130	0.172
20	70	0.310	1.56	0.040	0.040	0.20	0.280	0.280	0.605
21	70	0.230	0.147	0.027	0.033	0.34	0.210	0.250	0.505
22	70	0.310	1.35	0.017	0.023	0.15	0.190	0.180	0.558
23	70	0.290	1.51	0.120	0.026	0.26	0.100	0.290	0.573
24	70	0.310	1.34	0.039	0.032	0.18	0.210	0.120	0.551
25	80	0.460	0.92	0.029	0.043	0.23	0.290	0.220	0.643
26	80	0.370	1.36	0.011	0.025	0.24	0.070	0.080	0.606
27	80	0.450	0.92	0.027	0.041	0.21	0.290	0.230	0.634
28	80	0.500	1.05	0.027	0.040	0.26	0.330	0.200	0.703
29	80	0.450	0.97	0.029	0.042	0.22	0.290	0.230	0.642
30	80	0.440	0.91	0.038	0.038	0.19	0.330	0.280	0.628

TABLA III. RESULTADOS DEL ANALISIS DE 60 VARILLAS.

Núm. de muestra	Década, C	Mn	P	S	Si	Cu	Cr	C.E.	
31	60	0.140	0.65	0.023	0.034	0.17	0.320	0.180	0.274
32	60	0.400	1.35	0.018	0.022	0.23	0.250	0.200	0.651
33	60	0.360	1.54	0.036	0.021	0.32	0.300	0.160	0.640
34	60	0.280	1.35	0.028	0.028	0.18	0.260	0.180	0.529
35	50	0.350	1.66	0.018	0.024	0.31	0.200	0.220	0.654
36	50	0.330	1.33	0.016	0.025	0.20	0.220	0.140	0.571
37	50	0.300	1.47	0.021	0.022	0.19	0.220	0.130	0.563
38	50	0.360	1.41	0.016	0.024	0.22	0.230	0.140	0.615
39	50	0.370	1.45	0.019	0.025	0.25	0.230	0.150	0.632
40	50	0.410	1.62	0.160	0.039	0.09	0.120	0.090	0.692
41	50	0.410	1.65	0.019	0.033	0.09	0.120	0.090	0.697
42	50	0.320	1.42	0.023	0.032	0.25	0.240	0.250	0.588
43	50	0.320	1.59	0.013	0.017	0.31	0.250	0.250	0.616
44	50	0.400	1.72	0.020	0.037	0.14	0.120	0.100	0.700
45	60	0.080	0.46	0.042	0.054	0.01	0.450	0.130	0.181
46	60	0.260	1.48	0.057	0.049	0.01	0.460	0.160	0.368
47	60	0.120	1.54	0.006	0.036	0.09	0.380	0.120	0.232
48	60	0.190	1.56	0.048	0.028	0.16	0.360	0.220	0.314
49	60	0.100	0.84	0.024	0.060	0.30	0.450	0.240	0.275
50	60	0.080	0.63	0.047	0.016	0.01	0.170	0.070	0.176
51	60	0.040	0.24	0.032	0.016	0.01	0.110	0.080	0.091
52	60	0.050	0.64	0.007	0.016	0.04	0.090	0.080	0.167
53	60	0.080	0.62	0.021	0.064	0.35	0.280	0.120	0.202
54	60	0.100	0.96	0.042	0.075	0.13	0.450	0.160	0.287
55	60	0.130	0.47	0.008	0.037	0.08	0.390	0.150	0.233
56	60	0.300	0.65	0.066	0.022	0.01	0.080	0.080	0.418
57	60	0.070	0.92	0.022	0.024	0.30	0.100	0.090	0.235
58	60	0.040	0.53	0.045	0.046	0.01	0.010	0.080	0.137
59	60	0.660	0.52	0.024	0.031	0.32	0.070	0.090	0.757
60	60	0.100	0.69	0.008	0.056	0.28	0.400	0.160	0.241

TABLA III. RESULTADOS DEL ANALISIS DE 60 VARILLAS

### III.2. ANALISIS.

Las distribuciones de las composiciones de carbono, manganeso, fósforo, azufre, silicio, cobre, cromo y carbono equivalente dado por la ecuación (1) se grafican en las Figuras 8 a 15, respectivamente. En cada gráfico se indica el límite máximo de composición por elemento de acuerdo con la Tabla II. Asimismo, se proporciona el porcentaje de muestras que exceden el límite en cada caso. La Figura 16 resume los porcentajes de las muestras que están por arriba del límite máximo de composición por elemento.

Como los criterios de la Tabla II deben cumplirse simultáneamente en una muestra dada, en la Figura 17 se distribuye el porcentaje de muestras en función del número de excesos de la Tabla II por muestra. La columna de cero fallas tiene una altura de 30 por ciento. Esto quiere decir que un poco menos de la tercera parte de las varillas encontradas hubieron sido recomendables para ser soldadas de acuerdo con la especificación de referencia en este trabajo (44). El setenta por ciento restante falla en uno o más criterios de la Tabla II.

Del análisis anteriormente desarrollado se puede distribuir en el tiempo de manufactura en un intervalo de cuatro décadas aproximadamente. Sin embargo, debe mencionarse que, al distribuirse el número de muestras por década, este resulta reducido, lo cual limita la precisión de las inferencias que de ahí se extraigan. La gráfica de la Figura 18 representa la evolución temporal del porcentaje de muestras que exceden los límites de la Tabla II para carbono, manganeso, azufre, fósforo y carbono equivalente, respectivamente. El límite del silicio no se

excede por ninguna muestra. En la Figura 19 se presenta la evolución del porcentaje de muestras que de manera simultánea cumple todos los requisitos de la Tabla II.

Aunque es apreciable una mejoría en los controles de azufre y fósforo, no se aprecia ninguna tendencia a incrementar la soldabilidad en general.

### III.3. DISCUSION.

Del análisis anterior se deduce que aunque aproximadamente el 70% de los aceros estudiados tienen la composición química dentro de las normas mexicanas actuales, el contenido de elementos aleantes se excede en el 70% del total de las muestras de acuerdo con las especificaciones de un acero de baja aleación, que se requiere para aceros de refuerzo de concreto recomendables para ser soldables. Esto presenta una problemática fuerte a la industria de la construcción la cual se ve obligada a verificar la soldabilidad de las varillas para refuerzo de concreto en los casos que así se requiera.

El resultado del análisis indica que la probabilidad de encontrar al azar un lote de varilla soldable es baja del orden del 30% (en la actualidad). Por lo que entonces, los constructores en principio, deberían tratar directamente con las empresas siderúrgicas para obtener lotes de varillas soldables.

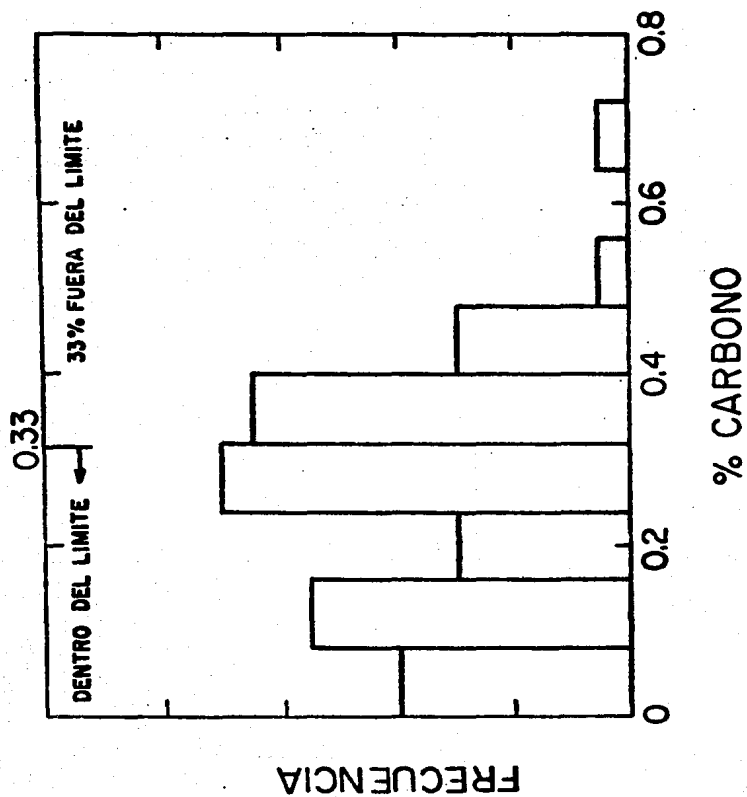


FIG. 8 . LA GRAFICA MUESTRA EL PORCENTAJE DE MUESTRAS QUE ESTA FUERA DEL LIMITE DEL % DE CARBONO.

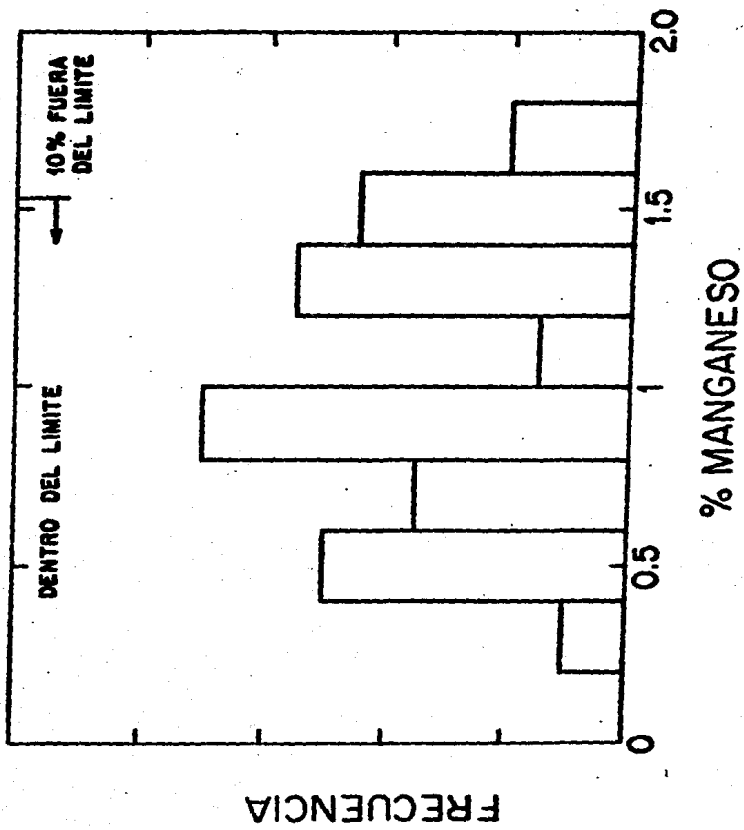


Fig. 9. SE MUESTRA EL % DE MANGANESO VS FRECUENCIA.

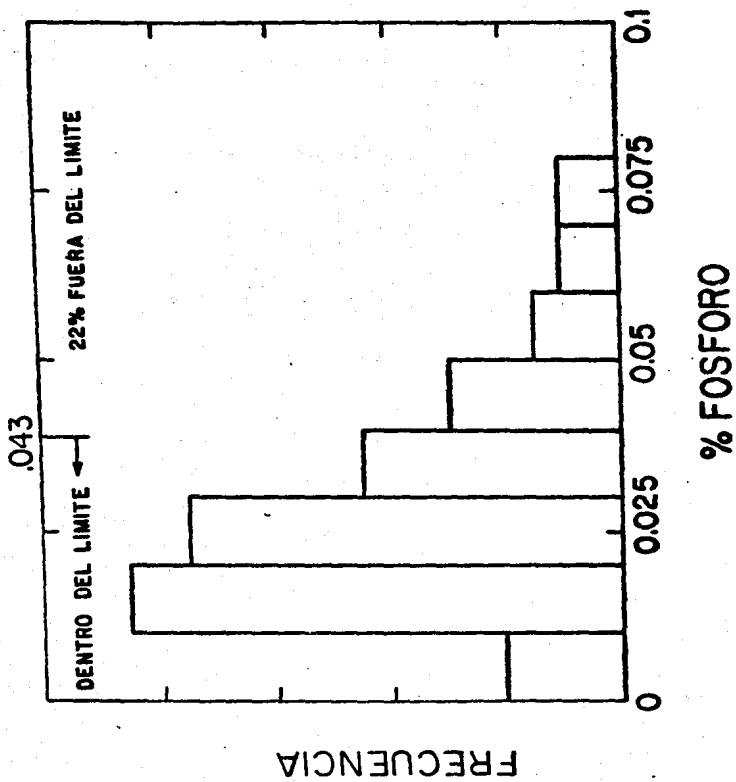


Fig. 10. EL 22% DE LAS 60 VARILLAS EXCEDE EL PORCENTAJE DE FOSFORO MAXIMO.

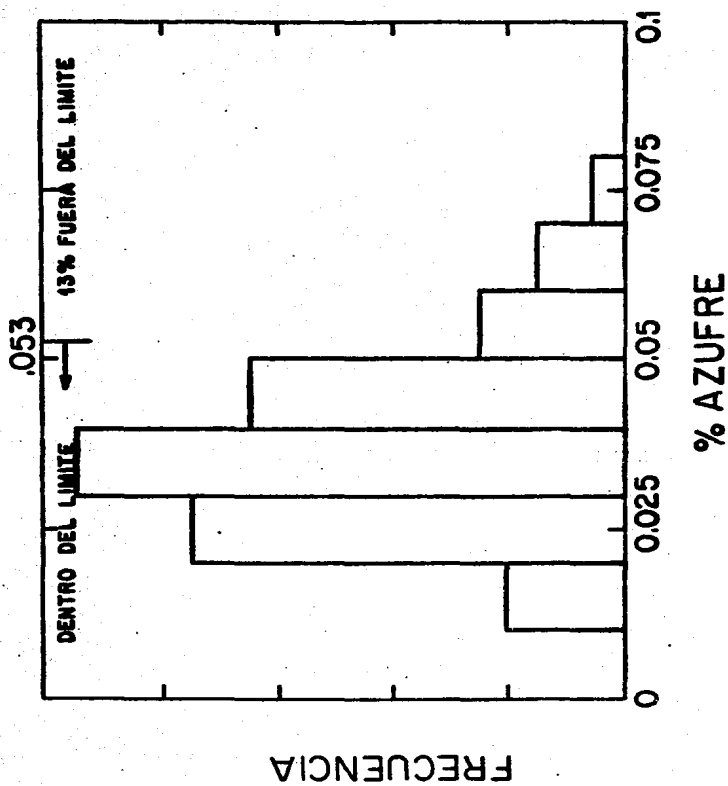


Fig. 11. DISTRIBUCION DE FRECUENCIA DEL AZUFRE.



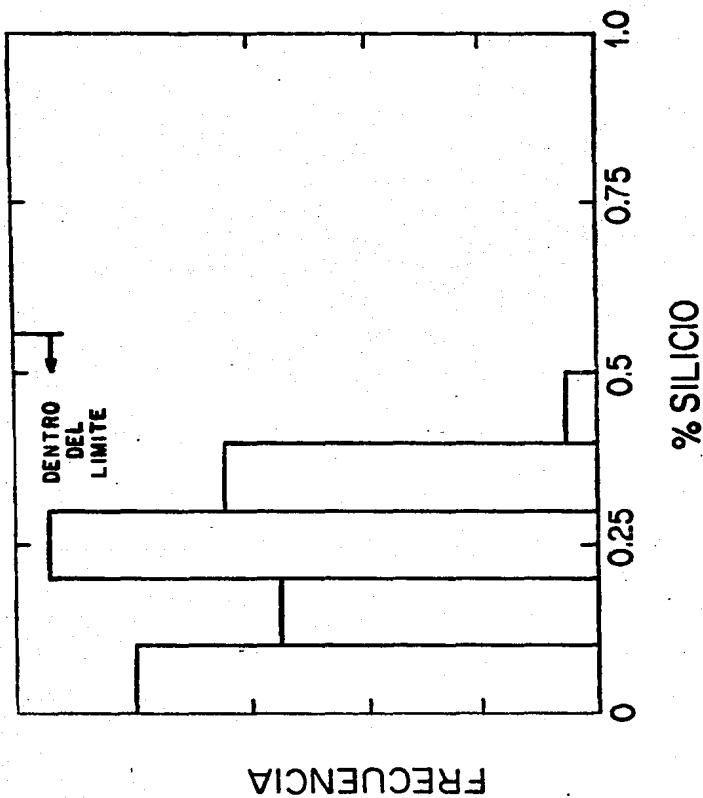


Fig .12. TODAS LAS MUESTRAS SE ENCUENTRAN DENTRO DEL PORCENTAJE DE SILICIO ESPECIFICADO.

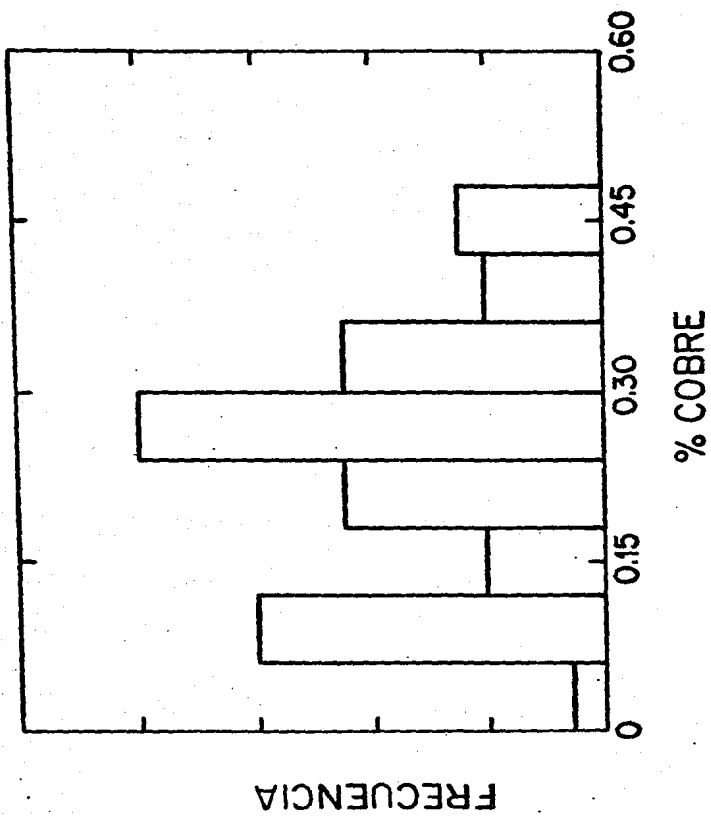


Fig.13. DISTRIBUCION DE FRECUENCIA DEL COBRE.

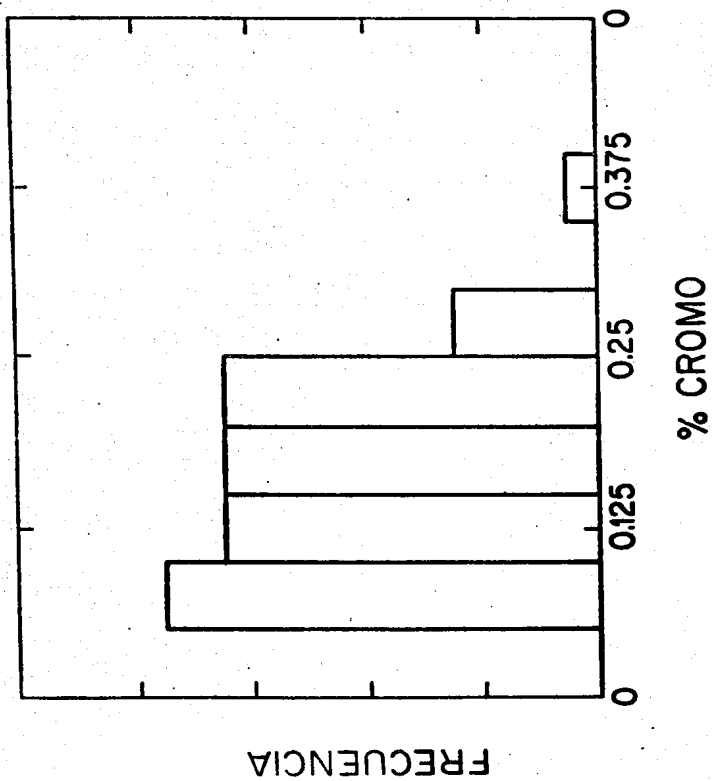


Fig. 14. GRAFICA DE % DE CROMO CONTRA FRECUENCIA.

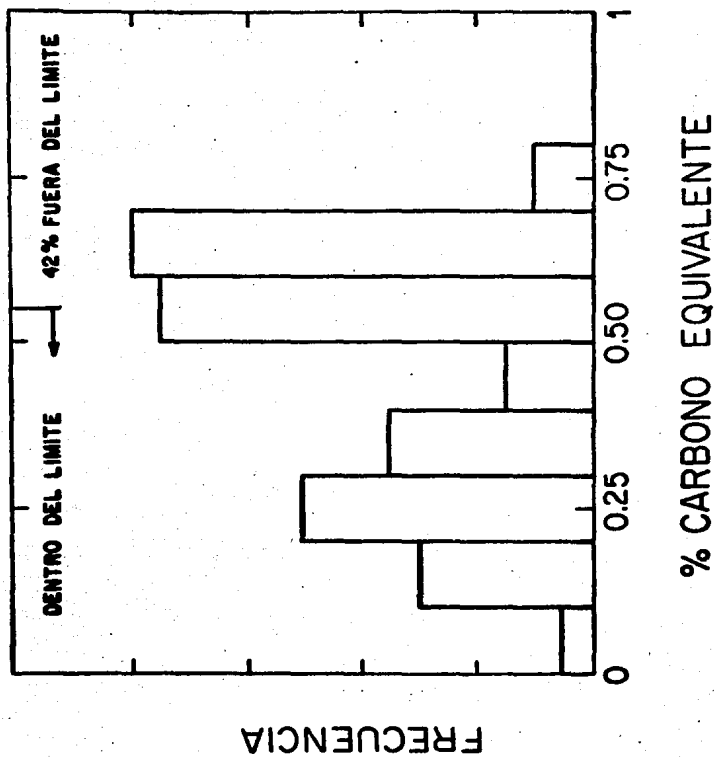


Fig. 15. EN ESTA GRAFICA SE OBSERVA QUE EL 42% DE LAS MUESTRAS EXCEDE EL % DE CARBONO EQUIVALENTE ESPECIFICADO.

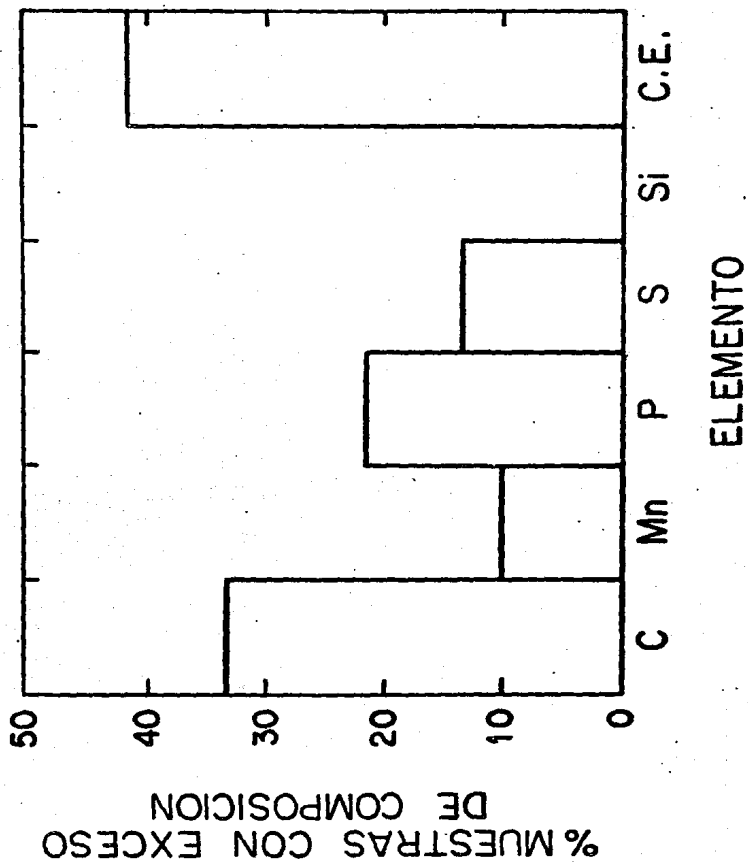


Fig. 16. % DE MUESTRAS CON EXCESO DE COMPOSICION POR ELEMENTO.

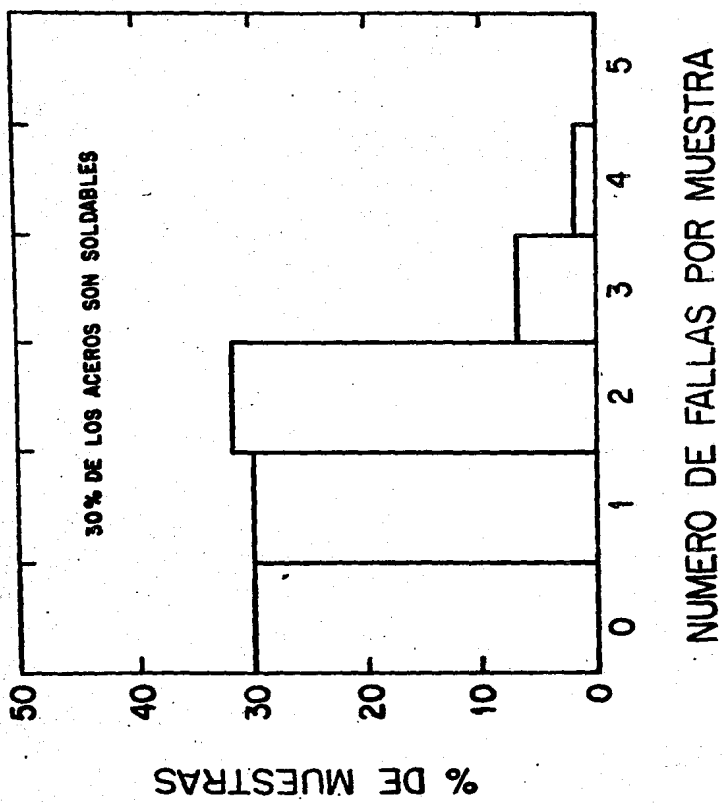


Fig. 17. LA GRAFICA MUESTRA QUE SOLAMENTE EL 30% DE LOS ACEROS SON SOLDABLES.

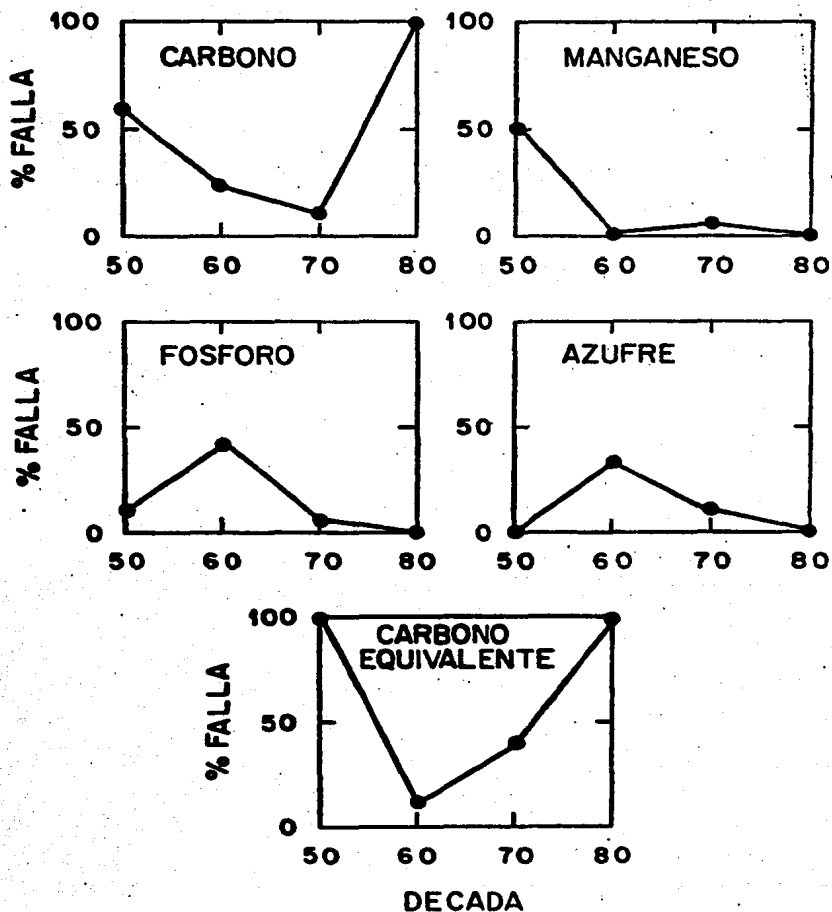


Fig. 18. EN LAS GRAFICAS SE OBSERVAN LOS PORCENTAJES DE MUESTRAS QUE ESTAN FUERA DE ESPECIFICACION EN LOS ELEMENTOS C, Mn, P, S Y CARBONO EQUIVALENTE POR DECADAS.

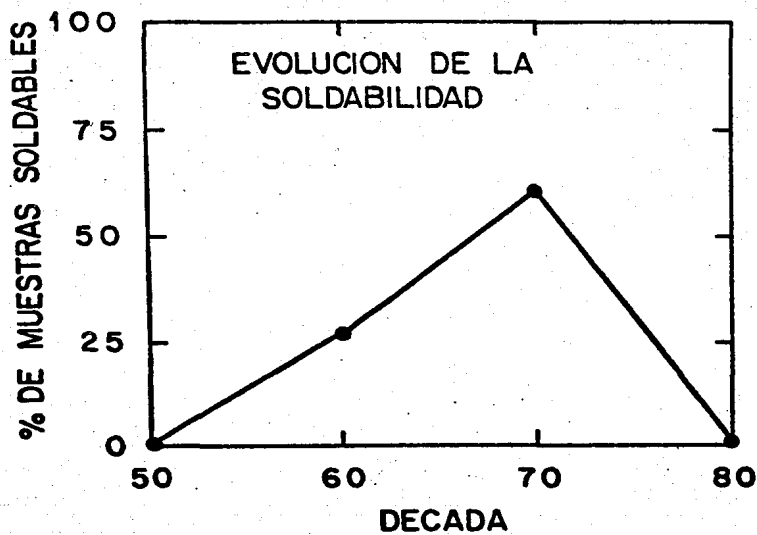


Fig.19. EN LA GRAFICA SE OBSERBA LA EVOLUCION DE LA SOLDABILIDAD POR DECADA.



CAPITULO IV

CASO DE ESTUDIO: PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA EN UN EDIFICIO  
DERRUMBADO.

#### CAPITULO IV. CASO DE ESTUDIO: PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA EN UN EDIFICIO DERRUMBADO.

Se hizo un estudio del comportamiento del acero de varillas para concreto reforzado encontradas en las ruinas de un edificio derrumbado. Aunque el estudio, en proceso, pretenda hacer un análisis general de un conjunto amplio de muestras recolectadas en diferentes sitios afectados por el sismo, en este capítulo únicamente se hace un análisis de fallas encontradas en soldaduras de varillas corrugadas. Las varillas corrugadas que tienen estas soldaduras son entre 32 y 38 milímetros de diámetro.

Las soldaduras y uniones en general, en aceros de estructuras de concreto reforzado han sido preocupación de los especialistas en estructuras y en metalurgia en muchos países, incluyendo a México.

En su diseño las estructuras de concreto reforzado se consideran como si tuvieran un comportamiento completamente monolítico (43). El análisis estructural de la resistencia a las fuerzas externas se predice con la suposición de que todos los elementos separados de concreto reforzado se comportan como una unidad. Por limitaciones prácticas la estructura real de un edificio se construye pieza a pieza y piso por piso. Sin embargo, uno de los elementos principales de la técnica de construcción es alcanzar un comportamiento monolítico de la estructura acabada. Así como es imposible colar toda la estructura de concreto de manera continua, también es imposible integrar toda la estructura de acero con una varilla corrugada continua. Las uniones de varillas corrugadas son inevitables y la realización apropiada de

las uniones es la clave para la ejecución acertada de un diseño estructural.

**IV.1 ANALISIS.**

El análisis químico de los aceros de las varillas soldadas se indica en la Tabla IV. La calidad del acero es aceptable y está dentro de la actual norma mexicana (13,14). La carga que resisten las varillas encontradas oscila entre 30 y 60 toneladas según su diámetro y proceso de fabricación (13,14).

<b>Barra</b>	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>S</b>	<b>P</b>	<b>Si</b>	<b>Cu</b>	<b>Cr</b>
<b>HJ-14 (T.F)</b>	<b>0.15</b>	<b>0.82</b>	<b>0.06</b>	<b>0.017</b>	<b>0.24</b>	<b>0.31</b>	<b>0.14</b>
<b>HJ-14 (L.C)</b>	<b>0.31</b>	<b>1.2</b>	<b>0.06</b>	<b>0.019</b>	<b>0.37</b>	<b>0.30</b>	<b>0.24</b>
<b>HJ-15</b>	<b>0.23</b>	<b>0.86</b>	<b>0.045</b>	<b>0.016</b>	<b>0.32</b>	<b>0.23</b>	<b>0.14</b>
<b>HJ-5</b>	<b>0.34</b>	<b>1.30</b>	<b>0.044</b>	<b>0.038</b>	<b>0.35</b>	<b>0.33</b>	<b>0.28</b>
<b>HJ-12</b>	<b>0.30</b>	<b>1.34</b>	<b>0.038</b>	<b>0.025</b>	<b>0.32</b>	<b>0.26</b>	<b>0.18</b>

**Tabla IV .. Analisis de las varillas soldadas.**

La descripción del análisis del total de uniones encontradas es la siguiente:

#### MUESTRA H.J-14.

En la Figura 20 aparece una pieza de 35 cm compuesta de dos trozos de varilla corrugada unidos con una soldadura. Una de las varillas tiene 38 mm de diámetro y la otra 32 mm de diámetro (calibres 12 y 10 respectivamente (13,14)). La fotografía del macroataque de un corte longitudinal de la muestra, Figura 21, revela que la soldadura no tuvo preparación de corte de biseles, recomendados, como el de la Figura 6. El ángulo de corte del bisel, entre 21 y 23 grados, es casi la mitad del que se recomienda. En la intercara del material de aporte de la soldadura y la varilla de 38 mm se dejaron porosidades, una de ellas se muestra en la Figura 22 y suman en el corte una longitud de 5 milímetros aproximadamente. La presencia de estas cavernas puede atribuirse al estrecho margen para la extracción de escoria dejado por el bisel. Las cavernas no fueron detectadas con rayos X, como se muestra en la Figura 23.

El dibujo del corrugado es diferente en las dos barras correspondiendo a dos procesos distintos de fabricación. El dibujo en forma helicoidal, en la varilla de 32 mm de diámetro es del proceso de deformación por torsión en frío, el cual se da para incrementar su resistencia mediante un aumento sustancial de la densidad de dislocaciones en el acero. La varilla de 38 mm de diámetro tiene un dibujo de corrugado simple, y fue laminada en caliente. La soldadura de varillas torcidas en frío requiere de cuidados especiales para evitar un calentamiento excesivo que provoque una disminución en la densidad de dislocaciones por recuperación o inclusive por recristalización.

Para efectuar soldaduras de mejor calidad se recomienda el uso de una placa de soporte para disipar rápidamente el calor. Además es necesario aplicar los cordones de soldadura de manera alternada sobre un conjunto de varillas de manera que ocurra un intervalo de varios minutos entre cada aplicación.

En la Figura 24 se presenta el perfil de dureza Rockwell B a lo largo de cinco centímetros aproximadamente donde están contenidas la soldadura y las varillas adyacentes. En la Tabla IV se muestra que la varilla torcida en frío es de bajo carbono y la deformada en caliente es de medio carbono. Por un lado se aprecia que el material de aporte de la soldadura tiene una dureza notablemente inferior a la de las varillas. La práctica recomendada indica sin embargo que el esfuerzo de cedencia de la soldadura debe ser al menos 25 por ciento superior al de las varillas (43). Esto debería traducirse en un máximo, y no en un mínimo, de dureza en la soldadura. La disminución en dureza en la soldadura por el lado de la varilla torcida en frío indica que hubo un calentamiento excesivo. Precisamente la grieta que se observa en las Figuras 21 y 25 ocurrió en la zona blanda. En esa zona el sitio más favorable para la formación de la grieta fue el punto de alta concentración de esfuerzos originado por la unión del cono de soldadura con la varilla más delgada. La grieta parece ser previa al terremoto porque su avance en zig-zag corresponde probablemente a una propagación combinada de corrosión y esfuerzo (corrosión bajo tensión) como se muestra en la Figura 26.

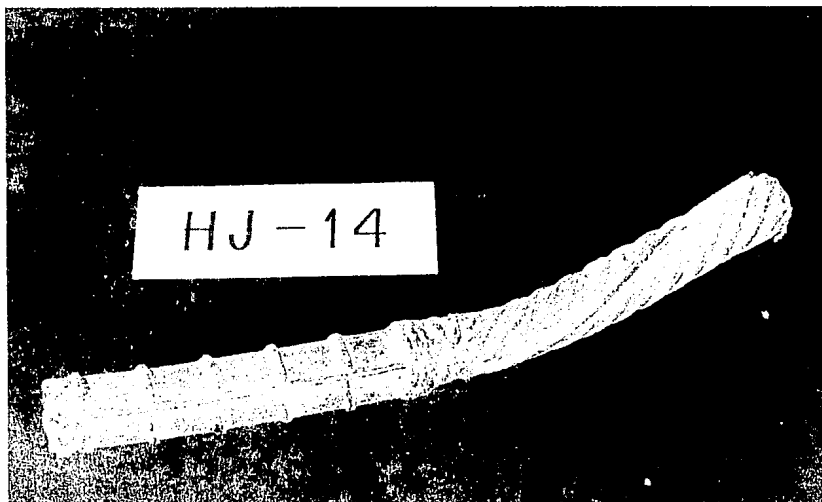


Fig. 20 MUESTRA HJ-14, UNION DE DOS VARILLAS CORRUGADAS DE  
DIFERENTE: DIAMETRO, FABRICACION Y COMPOSICION QUIMICA.

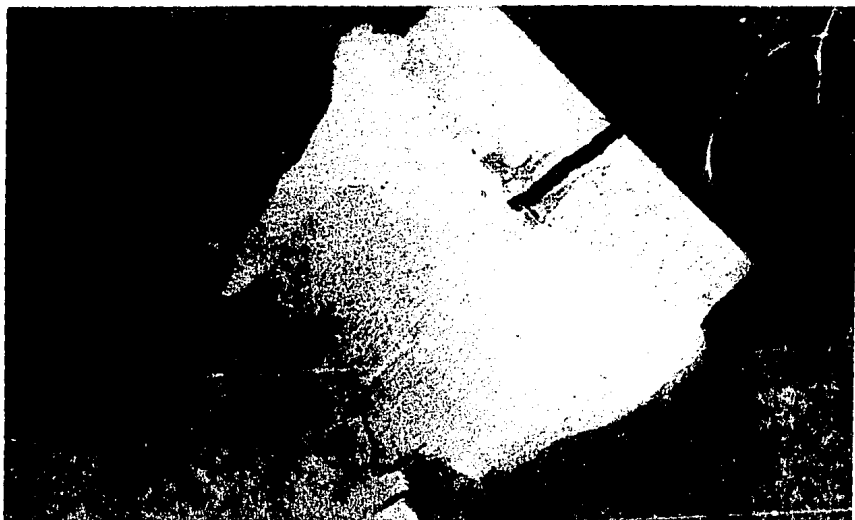


Fig. 21 MACRODATOQUE DE LA MUESTRA HJ-14, LOS BISELES SE REALIZARON EN LA VARILLA TORCIDA EN FRIO, LOS ANGULOS QUE FORMAN CON LA VARILLA LAMINADA EN CALIENTE SON MENORES A 45°.

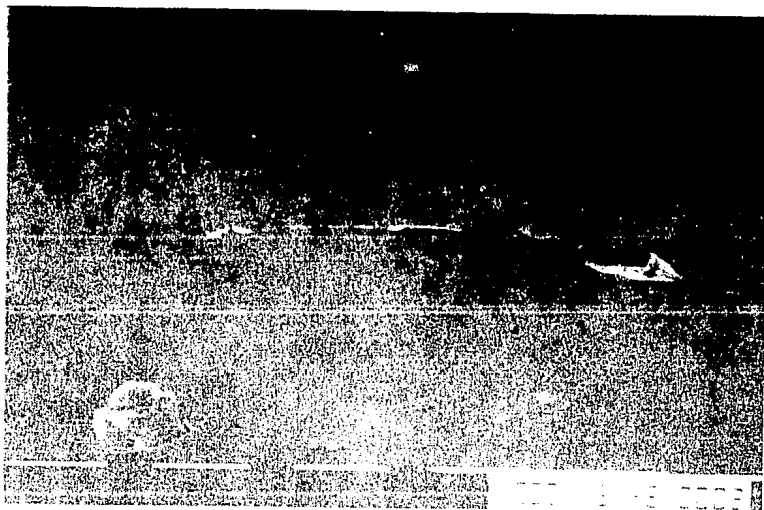


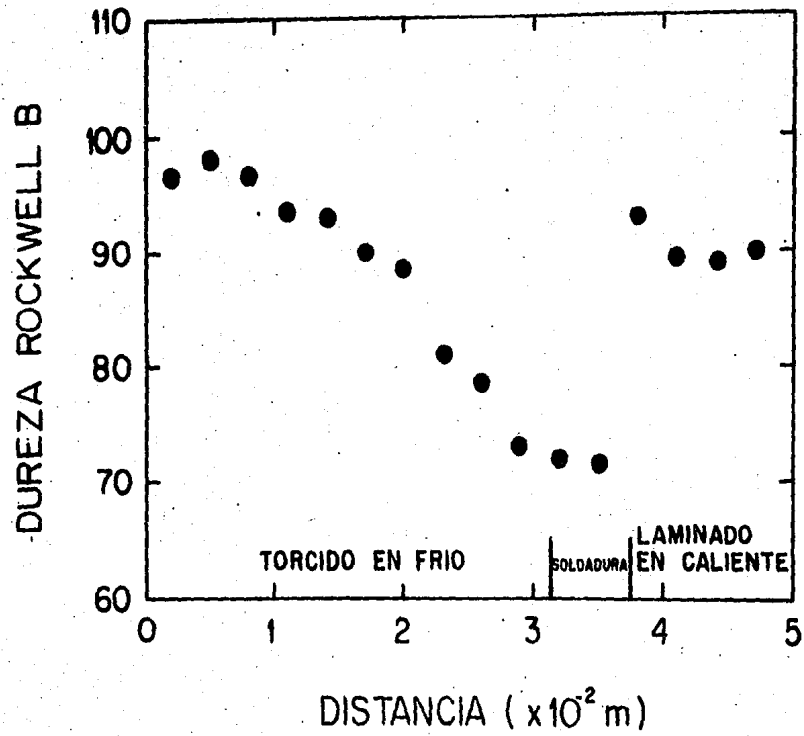
Fig. 22. CAVERNAS EN LA INTERCARA DEL MATERIAL DE APORTE Y LA VARILLA LAMINADA EN CALIENTE.



Fig. 23 . RADIOGRAFIA DE LA MUESTRA HJ-14.

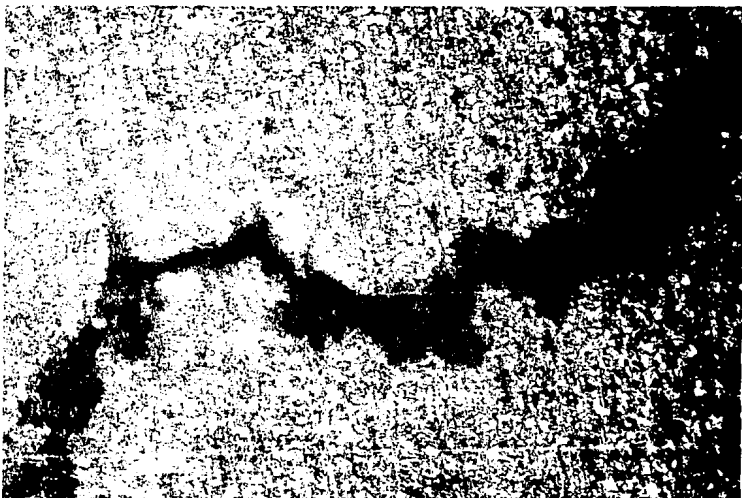


Fig. 24. GRAFICA DE DUREZA HRB VS DISTANCIA (mm) DE LA MUESTRA  
HJ-14.





**Fig. 25. LA MUESTRA SE FRACTURO POR EL EXTREMO MAS DELGADO DE LA UNION.**



**Fig. 26. FOTOGRAFIA DE LA GRIETA EN LA MUESTRA HJ-14 SU AVANCE ES  
DEBIDO A CORROSION BAJO TENSION.**

**MUESTRA HJ-15.**

La Figura 27 muestra un trozo de varilla corrugada deformada en frío de 73 cm de largo y 32 mm de diámetro nominal (calibre 10). En el extremo inferior izquierdo se observa una soldadura fracturada. La zona cercana a la fractura no muestra deformación por tensión o por flexión. La Figura 28 muestra una vista perpendicular a la superficie de fractura que muestra el hueco que dejó la otra varilla unida por esta soldadura. Al centro de la soldadura se aprecian residuos de escoria, huecos y material de aporte. La Figura 29 muestra un corte a lo largo del eje de simetría de la varilla. Con un ataque químico fue posible revelar el material de aporte de soldadura y escoria atrapada. En la fotografía se observa que no hubo cortes para preparar la soldadura, que el material de aporte del electrodo fue mínimo y que la escoria atrapada prácticamente nulificó el amarre.

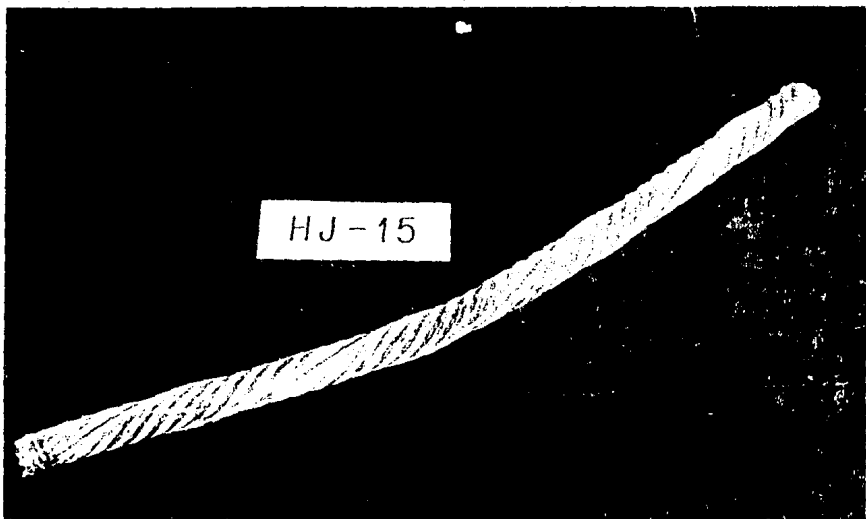


Fig. 27. MUESTRA HJ-15, LA SOLDADURA SE ENCUENTRA EN EL EXTREMO INFERIOR IZQUIERDO DE LA FOTOGRAFIA.

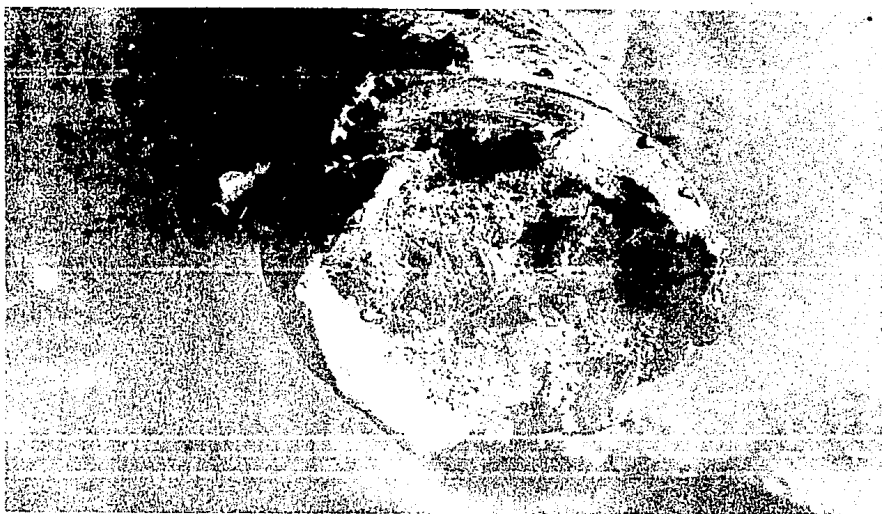


Fig. 28. SUPERFICIE DE LA FRACTURA DE LA MUESTRA HJ-15, PRESENTA RESTOS DE ESCORIA, MATERIAL DE APORTE Y HUECOS.



Fig. 29. MACRODATAQUE DE UN CORTE DE SOLDADURA DE LA MUESTRA HJ-15  
SE OBSERVA UNA CAVERNA EN LA PARTE SUPERIOR DE MAS DE UN  
CENTIMETRO DE LONGITUD QUE TAMBIEN CONTIENE ESCORIA.

MUESTRA HJ-5

En la Figura 30 se muestra un trazo de barra corrugada laminada en caliente de 118 cm de largo y de 38 mm de diámetro (calibre 12). La muestra fue cortada del extremo superior derecho de los restos de una columna. En el extremo inferior aparece una superficie de fractura que contiene un poco de material de aporte. En la cercanía de la superficie fracturada de la barra no se observan rasgos de deformación por flexión o corte. En la Figura 31 se observa el área reducida que cubrió el material de aporte, que es porosa, y el área central con escoria. La Figura 32 muestra el macroataque de un corte en dirección paralela al eje de simetría que cruzo la zona donde el material de aporte es máximo.

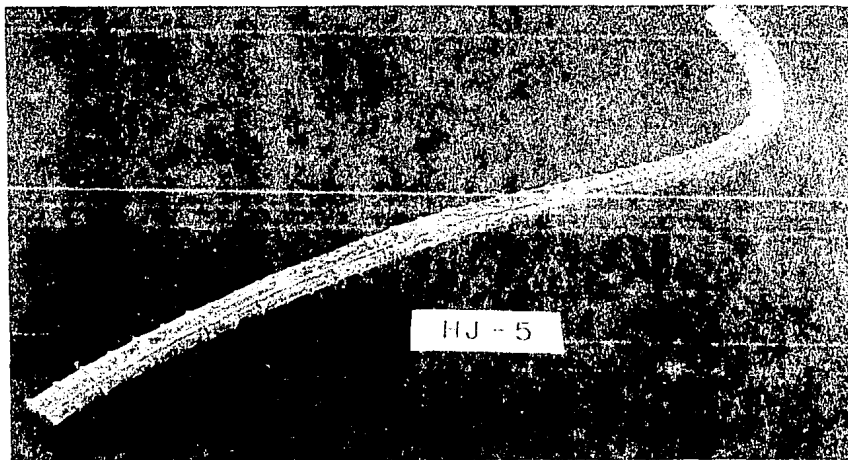


Fig. 30. MUESTRA HJ-5, LA FRACTURA SE ENCUENTRA EN LA PARTE INFERIOR IZQUIERDA DE LA FOTOGRAFIA.





Fig. 31. DETALLE DE FRACTURA DE LA SOLDADURA EN LA MISMA MUESTRA, SE OBSERVA LA PRESENCIA DE ESCORIA HUECOS Y MATERIAL DE APORTE.

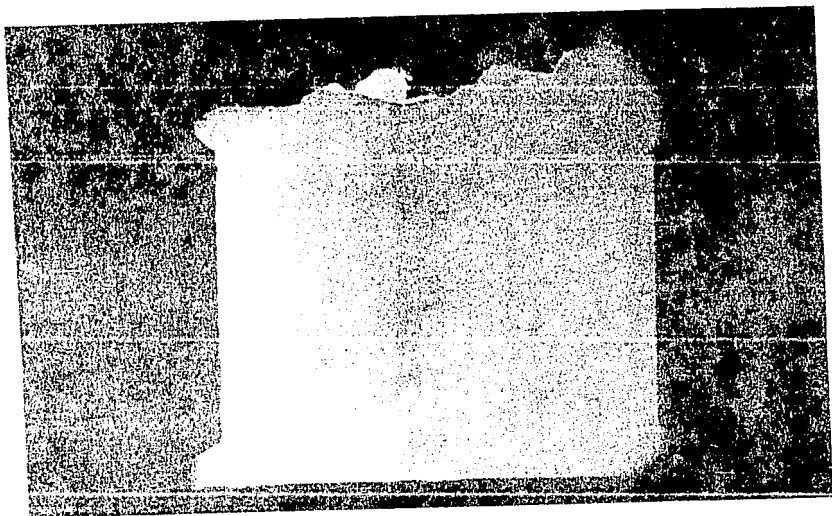


Fig. 32. MACROATAQUE DE LA MUESTRA HJ-15, ES UN CORTE EN DIRECCION PARALELA AL EJE DE SIMETRIA QUE CRUZA LA ZONA DONDE SE ENCUENTRA MATERIAL DE APORTE.

MUESTRA HJ-12.

La Figura 33 muestra una varilla corrugada de 69 centímetros de largo y 32 milímetros de diámetro, en el extremo inferior de la fotografía se observa una soldadura que se fracturó. Cerca de la soldadura no se observan señales de deformación por flexión o por torsión. La Figura 34 no muestra rasgos de deformación al corte. En el cuadrante inferior izquierdo de la superficie fracturada se observa concreto que se fraguó en ese sitio. Es decir, previamente a la colada la soldadura ya tenía una grieta de dimensiones considerables. Asimismo, se observan residuos de escoria en la parte central y huecos. En la Figura 35 se muestra el macroataque de un corte en la dirección del eje de simetría donde se distinguen el material de aporte y el de la varilla. La varilla no tuvo corte de bisel y la soldadura es solamente un anillo alrededor de la varilla.

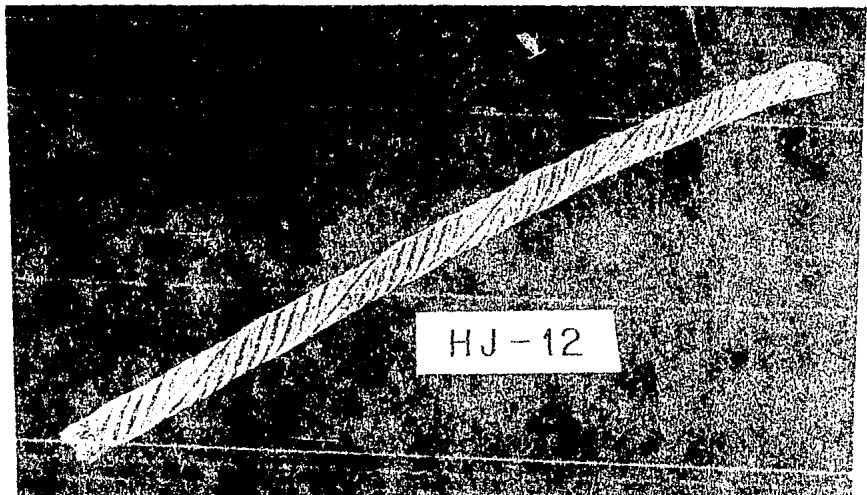


Fig. 33. MUESTRA HJ-12, SE OBSERVA LA FRACTURA EN LA PARTE INFERIOR IZQUIERDA, AL PARECER NO EXISTIO FLEXION.



Fig. 34. DETALLE DE LA SUPERFICIE DE LA FRACTURA, EL CONCRETO SE FRAGUO EN UNA GRIETA EN LA SOLDADURA, SE APRECIAN RESIDUOS DE ESCORIA, MATERIAL DE APORTE Y POROSIDADES.

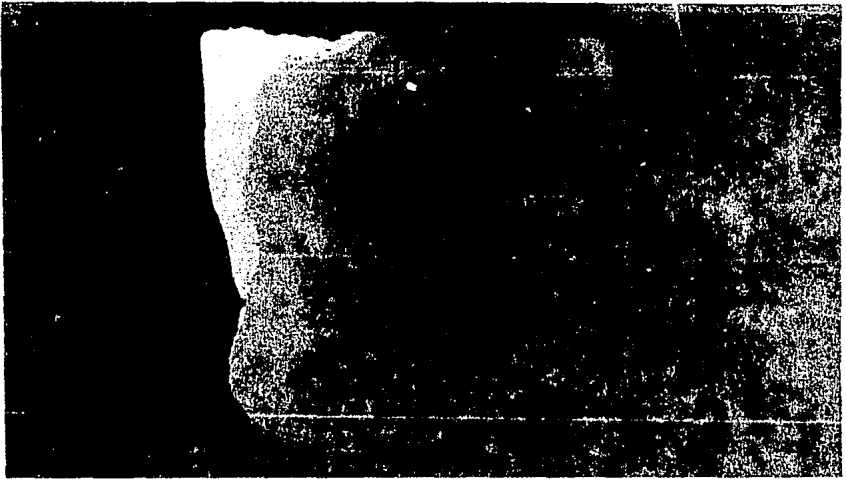


Fig. 35. MACROATAQUE DE LA MUESTRA HJ-12, LA SOLDADURA UNICAMENTE FORMO UN ANILLO ALREDEDOR DE LA VARILLA.

## INFERENCIAS.

Del análisis metalográfico anterior se concluye que los errores encontrados pueden recaer en varios niveles de responsabilidad relacionados con la operación de soldeo, es decir, no se respetaron los códigos de procedimientos de soldadura, probablemente debido a la falta de personal técnico capacitado, para realizar biseles y las aplicaciones correctas de la soldadura, pues como se pudo observar cada muestra tiene defectos que corresponden a más de una omisión en los procedimientos de soldadura citados en el capítulo II.

El personal de inspección y supervisión probablemente no efectuó su labor durante ni posteriormente a la realización de las uniones soldadas encontradas.

Para evitar este tipo de problemas, es recomendable que una vez que se haya efectuado la unión de las varillas, se realice la inspección y si se detectan defectos, estas uniones deben ser rechazadas para posteriormente ser soldadas adecuadamente.

CAPITULO V

INFLUENCIA DE LOS ELEMENTOS EN LAS PROPIEDADES DE RESISTENCIA.



## CAPITULO V. INFLUENCIA DE LOS ELEMENTOS EN LAS PROPIEDADES DE RESISTENCIA MECANICA.

La mala desoxidación durante el proceso de fabricación del acero provoca la formación de mayor cantidad de inclusiones, que logran modificar el comportamiento mecánico del acero.

La Figura 36 muestra el mapeo composicional de una muestra de acero con alto contenido de azufre y fósforo realizado en el Microscopio electrónico de barrido, en la fotografía puede observarse alta contaminación del acero por impurezas, en donde se aprecia la distribución de aluminio, azufre y manganeso en las inclusiones.

Estudios realizados acerca de la influencia de las inclusiones no metálicas en el ensayo de tracción, se ha observado que las inclusiones de forma elongada y perpendiculares a la dirección del esfuerzo aplicado crean una alta concentración de tensiones (27), por lo que suficientes cantidades de MnS disminuirán la resistencia del acero que las contenga, Fig. 37.

La Figura 38 muestra la segregación del fósforo en el hierro, que como sabemos es un elemento que disminuye la plasticidad de la ferrita, también se produce fragilidad en frío.

El reactivo para revelar segregaciones de fósforo fue el siguiente; 4 g de cloruro cuprico, 20 cc de ácido clorhídrico, 40 cc de agua y 20 cc de alcohol etílico (45). Para una mejor apreciación de la segregación, se realizaron dos cortes en la muestra uno longitudinal y otro transversal, puede observarse que la segregación se presenta en el centro (Figura 39) y en forma de bandas (Figura 40). El ataque químico de este reactivo es

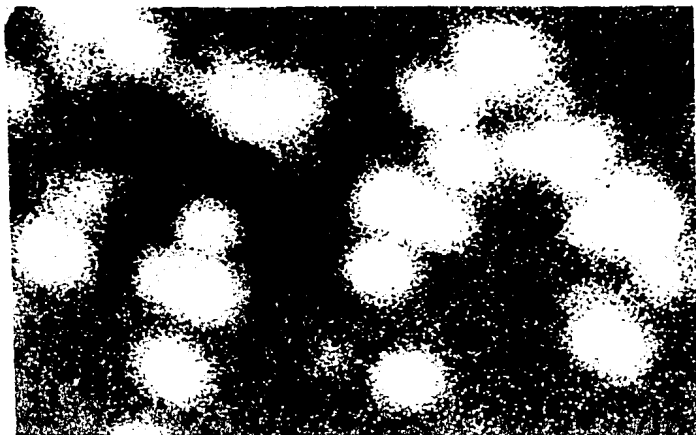


Fig. 36. MAPA COMPOSICIONAL DE MANGANESO EN UN ACERO CONTAMINADO.

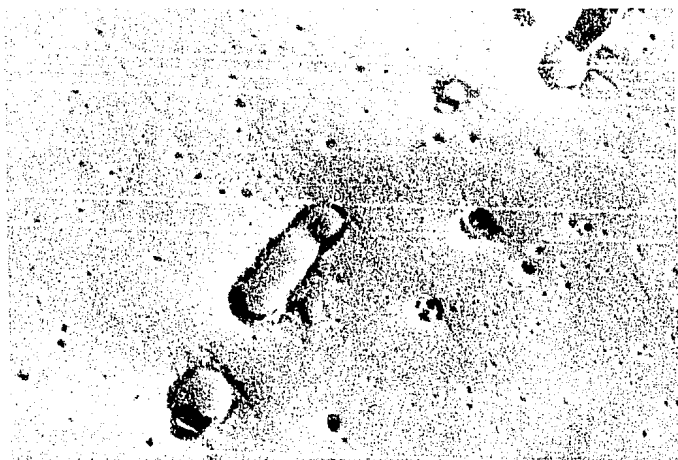


Fig. 37. INCLUSIONES DE SULFURO DE MANGANESO.

selectivo, ya que el fósforo rechaza al cobre y por ende este se distribuye donde no se encuentra el fósforo ( parte clara de las fotografías ) observandose claramente la segregación (parte oscura de los fotografías ).

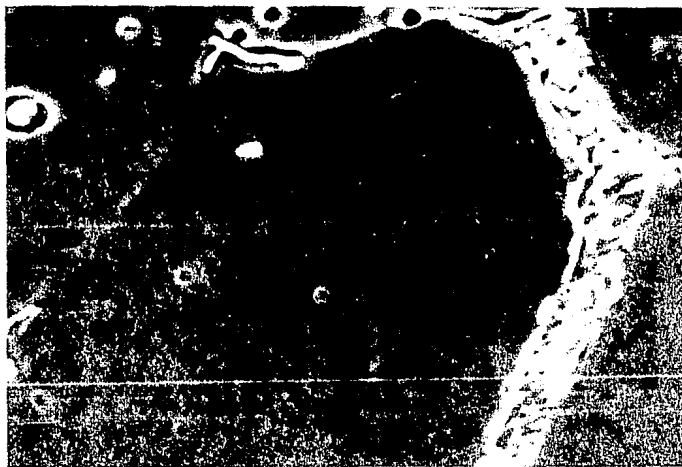
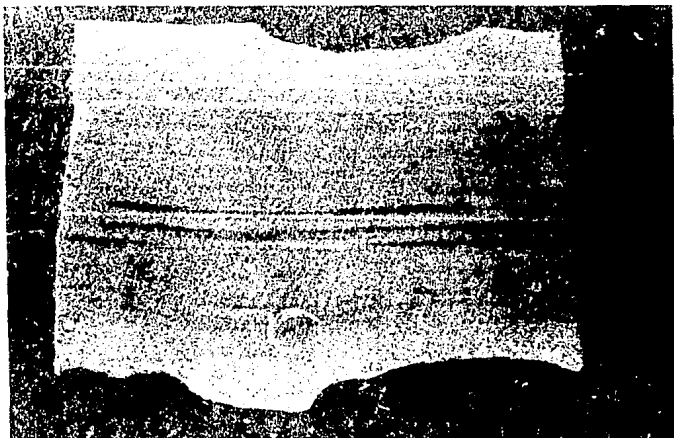
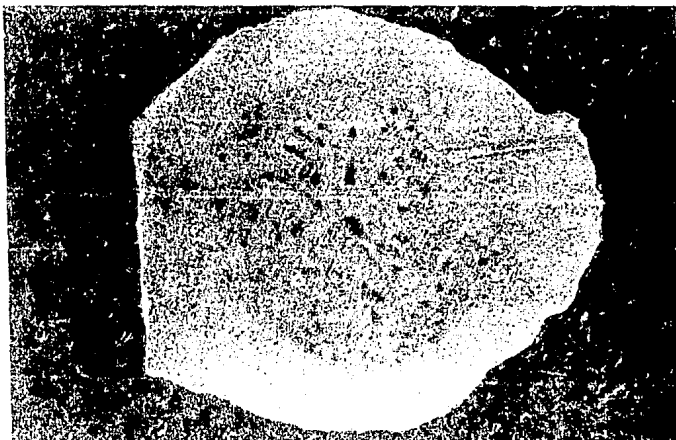


Fig. 38. ENGROSAMIENTO DE BORDES DE GRANO DEBIDO A LA SEGREGACION DE FOSFORO.



Figuras 39 y 40. SE MUESTRA LA SEGREGACION DEL FOSFORO.

## V.1 PROCERIMIENTO.

Debido a la cantidad de muestras y por no ser el objetivo de este trabajo, no se vio la necesidad de realizar un conteo de inclusiones, además de la obvia cantidad presente.

Los porcentajes de elementos presentes en el acero, ejercen distinta influencia en las propiedades mecánicas. Algunos de las muestras tenían diámetros pequeños lo cual limitaba la realización de probetas para ensayos de tracción, por tal razón se optó por conocer el esfuerzo de cedencia por medio del ensayo de compresión.

Una parte del ensayo de compresión se realizó en muestras que presentaban altos contenidos de carbono, azufre y fósforo, la otra parte se realizó en probetas en las cuales la composición química podría considerarse recomendable para aceros de refuerzo de concreto.

## V.2. ANALISIS.

Las probetas ensayadas se muestran en la Tabla V, puede observarse, que el elemento que ejerce mayor influencia en el esfuerzo de cedencia, en el ensayo de compresión, es el carbono como se muestra en la Figura 41.

Para una mejor apreciación de los resultados se realizarán gráficas de esfuerzo de cedencia en  $\text{Kg} / \text{mm}^2$  contra porcentaje en peso de los elementos, azufre, manganeso, silicio, fósforo, cobre, cromo y carbono. En general no se observó ninguna tendencia a incrementar o decrementar la propiedad del esfuerzo de cedencia, a excepción del elemento carbono.

En la Figura 41 se observa que algunos de los puntos de la gráfica no tienden hacia una linealidad, sino a ser una curva,

esto puede deberse a la presencia de las inclusiones, o de posibles segregaciones de fósforo y azufre.

Aunque las varillas con menos contenido de fósforo y azufre presentan un esfuerzo de cedencia más alto, esto es debido al carbono y no necesariamente implica que sean recomendables para refuerzo de concreto, ya que el carbono les proporciona dureza pero no la ductilidad y la tenacidad adecuada, a pesar de ser soldables.

No. de Muestra	% C	% S	% Mn	% Si	% P	% Cu	% Cr	Punto de Cedencia (Kg/mm <sup>2</sup> )
20	0.31	0.040	1.56	0.20	0.040	0.28	0.28	87.012
21	0.23	0.033	1.47	0.34	0.027	0.21	0.25	82.434
22	0.31	0.023	1.36	0.18	0.017	0.19	0.18	87.048
23	0.36	0.021	1.54	0.32	0.038	0.30	0.16	86.349
34	0.28	0.028	1.36	0.18	0.028	0.26	0.18	86.617
Muestras que no cumplen con la tabla I								
14	0.39	0.045	0.76	0.03	0.054	0.07	0.08	74.163
56	0.30	0.022	0.65	0.01	0.066	0.08	0.08	77.905
16	0.37	0.045	0.96	0.25	0.086	0.06	0.08	72.111
59	0.66	0.031	0.82	0.32	0.024	0.07	0.09	113.350
32	0.40	0.022	1.35	0.23	0.018	0.25	0.20	82.776
49	0.10	0.059	0.84	0.39	0.024	0.46	0.24	61.920
18	0.36	0.056	0.94	0.03	0.084	0.06	0.07	69.298
53	0.08	0.064	0.62	0.36	0.021	0.28	0.12	44.566
17	0.08	0.06	0.48	0.02	0.074	0.11	0.08	55.689
54	0.10	0.075	0.86	0.13	0.042	0.45	0.16	61.412
19	0.10	0.050	0.34	0.03	0.076	0.076	0.13	46.479
60	0.10	0.056	0.69	0.28	0.068	0.40	0.16	48.316
31	0.14	0.034	0.65	0.17	0.023	0.32	0.18	52.392
15	0.16	0.051	0.46	0.08	0.046	0.32	0.14	43.868

Tabla V. Reporte del punto de cedencia de muestras ensayadas.

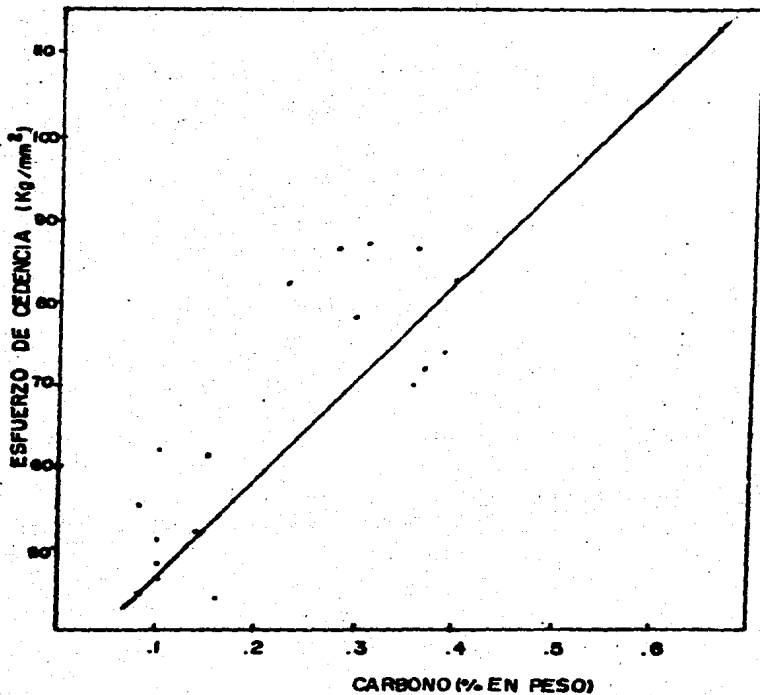


Fig. 41. GRAFICA DE ESFUERZO DE CEDENCIA ( $\text{Kg/mm}^2$ ) CONTRA PORCENTAJE DE CARBONO EN PESO.



## CONCLUSIONES.

- 1) El 90% de las varillas analizadas cumple con la normas oficiales mexicanas vigentes para acero de refuerzo de concreto ( NOM B-6-1983, NOM B-294-1986 ), sin embargo, solamente el 30 de estas es recomendable para soldadura.
- 2) El 70 % de las 60 varillas no cumple con la composición química especificada por los estandares de ANSI/ASTM A706-76 que es adecuada para efectuar soldadura con arco eléctrico en aceros para refuerzo de concreto, sin hacer uso de tratamientos térmicos anteriores o posteriores al proceso de soldadura.
- 3) El estudio de análisis de soldabilidad realizado, muestra que durante décadas ésta no ha experimentado evolución a la fecha.
- 4) Se encontró que existen grandes limitaciones de los aceros estudiados, no solamente en cuanto a soldabilidad, sino también en cuanto a las propiedades de ductilidad y tenacidad.
- 5) En las fractografías efectuadas en las soldaduras, se encontró que éstas carecían de limpieza adecuada ya que contienen considerables cantidades de escoria, concreto y porosidades.
- 6) Del análisis metalográfico efectuado en las soldaduras, se establece que la falta de conocimientos fundamentales de los procedimientos de soldadura con arco eléctrico y la falta de técnicos especializados produjo fallas considerables en las uniones.

7) Se encontraron grandes cantidades de inclusiones, fisuras y porosidades en los aceros estudiados.

8) Del ensayo de compresión se establece como ya es conocido, que el elemento que proporciona mayor punto de cedencia es el carbono.

## APENDICE.

La Siderurgica Lázaro Cárdenas - Las Truchas y el Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México, promueve el establecimiento de una norma oficial mexicana de varilla de acero microaleado, recomendable para construcción de estructuras en las zonas sísmicas. La resistencia antisísmica de estos aceros radica en tener altos niveles de ductilidad, tenacidad y soldabilidad.

El diseño de la aleación se basa en el control estricto de los elementos que contiene un acero de bajo carbono, asegurándose una alta resistencia con elementos microaleantes (Nb y V en bajas proporciones), a la cual se le ha concedido el nombre de varilla Sismo-Resistente .

SICARTSA desarrolló a escala industrial la tecnología para la producción de la varilla sismo-resistente obteniendo en una primera colada resultados sumamente satisfactorios.

La varilla sismo-resistente por norma tiene un límite superior de carbono equivalente de 0.55, los límites máximos de composición de carbono, manganeso, fósforo, azufre, silicio se muestran la Tabla II.

Las varillas sismo-resistentes deben tener un límite de fluencia mínimo de  $42 \text{ Kgf/mm}^2$  y no rebasar de  $55 \text{ Kgf/mm}^2$ . Esta varilla tiene una resistencia a la tracción superior a  $56 \text{ Kgf/mm}^2$ . La ductilidad, expresada en los porcentajes de elongación que es capaz de soportar la varilla hasta llegar a la fractura, no debe ser inferior a 14 en los calibres 2 a 6, ni a 12 en los calibres 7 al 12. La ductilidad y tenacidad de la varilla sismo-resistente

de SICARTSA es muy superior a la de la norma propuesta.

La soldabilidad de la varilla sismo-resistente es buena. Las primeras pruebas demuestran que las soldaduras se comportan de acuerdo con lo que establecen los códigos internacionales.

## BIBLIOGRAFIA.

1. B.H. Amstead, Manufacturing Processes, pp 333-338, Jhon Willey & Sons, 7a. Edición, 1979.
2. H.Wright Baker, Técnicas Modernas de Taller, pp 1-31, River S.A., 2a. Edición, 1964.
3. Lawrence E.D., Manufacturing Processes and Materials For Engineers, pp 55-68, 233-245, Prentice-Hall, Inc., 1961.
4. Harold E.Mc.G., The Making Shaping and Treating of Steel, pp 820-881, 788-791, USS, 9a Edición, 1971.
5. J.M. Lasheras, Tecnología del Acero, pp 250-268, 74-76, 35-39, CEDEL, 3a Edición, 1978.
6. A.T. Peters, Ferrous Production Metallurgy, pp 148-167, John Wiley & Sons, 1982.
7. R.A. Higgins, Tecnología de los Procesos Metalurgicos, Tomo II, pp 165-193, CECSA, 1963.
8. B.V. Linchevski, etal, Metalurgia de Metales Ferrosos, pp 319-320, 349-354, MIR. Moscú, 1980.
9. Apraiz B. J, Hierros Aceros y Fundiciones, pp 132-141, 35-37, Vol. I, URMO, 1971.
10. M.L.Begeman, etal, Procesos de Fabricación, pp 35-47, CECSA, México 1980.
11. Loera P.S., etal, Manual para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto Reforzado, pp 224-252, Comisión Coordinadora de la Industria Siderurgica, Noviembre 1976.
12. J. Genesca/J. Avila, Más allá de la Herrumbre, pp 21-23, FCE, 1a Edición, 1986.

13. Norma Oficial Mexicana : "Varillas Corrugadas y Lisas de Acero, Procedentes de Lingote o Palanquilla , para Refuerzo de Concreto". NOM E-6-1983, Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, México 1982.
14. Norma Oficial Mexicana : "Varillas Corrugadas de Acero, Torcidas en Frio, Procedentes de Lingote o Palanquilla, para Refuerzo de Concreto". NOM-B-294-1972, Secretaría de Industria y Comercio, México 1972.
15. Norma Oficial Mexicana : "Varillas Corrugadas de Acero, Torcidas en Frio, Procedentes de Lingote o Palanquilla, Para Refuerzo de Concreto". NOM-B-294-1986, Secretaría de Industria y Comercio, México 1986.
16. Norma Oficial Mexicana: "Malla Electrosoldada de Alambres Lisas Estirados en Frio". NOM B-253 1974, "Malla de Alambre de Acero Soldado, Para Refuerzo de Concreto". México 1975. Secretaría de Industria y Comercio.
17. Dieter G.E., Mechanical Metallurgy, pp 3-13, McGraw Hill, 2a Edición, 1976.
18. Manriquez G.F. Estudio sobre el Origen de las Inclusiones no metálicas base Al, Ca, Si, O, S y Mn en Aceros, pp 10-13, Tesis 1986.
19. L.H. Vanvlack, Materiales para Ingenieria, pp 498, CECSA, 1a Edición, 1977.
20. W.O. Philbrook, Oxide Inclusions in Steel, pp 187-188, Int.Met.REV., Sep 1977.
21. Juárez B. F., Estudio de las Inclusiones de Sulfuro de Manganeso en Aceros, Tesis, 1978.

22. P.A. Thornton, The Influence of Nonmetallic Inclusions on the Mechanical Properties of steel, PP 347-356, Journal of Materials Science, Vol 6, New York, 1971.
23. R. Kiessling and Lange, Non-Metallic Inclusions in Steel, pp - , ISI Soc.Rep., London, 1977.
24. R. Calvo R., El Acero su Elección y Selección pp- 271-278, Madrid, 1956.
25. Metals Handbook, Metallography, Structures Phase Diagrams, Vol 8, 8th Edition, pp 275-350, ASM, 1973.
26. A. Malishev, etal., Tecnologia de los Metales, pp 291-321, Mir Moscú, 1975.
27. W.J. Patton, Ciencia y Tecnologia de la Soldadura pp 31-41, URMO SA, 1979.
28. G.E. Linnert, Welding Metallurgy Carbon and Alloy Steel, pp 74-75, Vol 1, AWS, N. York, 1965.
29. Jack C. McCormac, Structural Steel Design, pp 253-269, 2a. Edición 1971.
30. P. Shimpke etal., Tratado General de Soldadura, Tomo II, pp 179-192, 4a Edición, G. Gill SA, 1969.
31. J.M. Rivas A., Intraducción a la Soldadura Eléctrica, pp 29-32, 121-132, Madrid, 1972.
32. Principios Metalurgicos de la Soldadura, Curso de PEMEX, 14 de Enero de 1986.
33. G. Fernández F., Soldadura y Metalurgia, pp 137- 156, CECSA, 1a Edición, 1966.
34. R.E. Reed-Hill, Principios de Metalurgia Física, pp 337-338, CECSA, 2a Edición, 1972.

35. Metals Handbook, Failures Analysis and Prevention, Vol 10  
pp 33-369, 337-370, ASM, 1973.
36. V.J. Calangelo et al, Analisis of Metallurgical Failures,  
pp 323-355, 1974.
37. Welding Handbook, Fundamentals of Welding, Vol. 1, 7th  
Edition, pp 137-142, 201-205, AWS, 1976.
38. K.G. Richards, Weldability of Steel, pp 20-22, The  
Welding Institute, 1972.
39. Structural Welding Code- Reinforcing Steel, AWS D 1.4-  
79, American Welding Society, Miami Fla., 1979.
40. Normas Para Construcción de Obras : "Soldadura de  
Varillas para Refuerzo de Concreto". Norma No. 3.135.05,  
Petroleos Mexicanos, México, 1986.
41. Metals Handbook, Properties and Selection of Metals,  
Vol 1, pp 99-101, 561, ASM, 1978.
42. R.D. Stout, et al., Soldabilidad de Aceros, pp 3, 91-97,  
2a. Edición, 1981.
43. Martínez G.L. et al, "Estudio de fracture de soldaduras  
En un Edificio Derrumbado por el Sismo", Reporte Téc-  
nico, Instituto de Física, UNAM, 1986.
44. Low Alloy Steel Deformed Bars for Concrete Reinforcement  
ANSI/ ASTM A 706-76, A.S.T.M. EE.UU., pp. 735-739.
45. G.L. Kehl, The Principles of Metallographic Laboratory  
Practice, pp 443-447, 3th Edition, Mc Graw Hill Book  
Company, 1949.