



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ARAGÓN

ANÁLISIS DE SOLDADURA EN VARILLAS PARA LA INDUSTRIA
DE LA CONSTRUCCIÓN

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
I N G E N I E R O C A N I C O

AREA MECANICA

P R E S E N T A:

AMADO JAVIER RODRIGUEZ ASABAY

ASESOR: DR. MARIO E. RODRIGUEZ RODRIGUEZ

MEXICO D. F. 2006





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta 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.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a Pablo, a mis Padres, herman@s y sobrin@s.

Agradecimientos

Los fondos para esta investigación provinieron de un premio que en el año 2003 otorgó la CANACERO al Instituto de Ingeniería de la UNAM por una investigación previa del Doctor Mario E. Rodríguez.

A la Residencia Autónoma del Estudiante Guerrerense (RAEG) en el D. F.

A mis padres, herman@s, cuñad@s, a la familia completa, a mi amigo Lalo y a Verónica por su ejemplo y solidaridad.

INDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	2
1.1 <i>Antecedentes</i>	2
1.2 <i>Objetivo</i>	4
2. DESCRIPCION DEL PROBLEMA	5
2.1 <i>Introducción</i>	5
2.2 <i>Aceros</i>	8
2.3 <i>Diagrama de fases Fe-C</i>	13
2.4 <i>Tratamientos térmicos</i>	16
2.7 <i>El proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodo protegido</i>	18
2.6 <i>Soldabilidad de los aceros</i>	22
2.7 <i>Requisitos del código ANSI/AWS D1.4-98 para la soldadura del acero de refuerzo ASTM A615 grado 60</i>	24
3. DESCRIPCION DE LA INVESTIGACION	25
3.1 <i>Metodología y Materiales</i>	25
4. ESTUDIOS EXPERIMENTALES	30
4.1 <i>Resultados de la investigación experimental</i>	30
4.2 <i>Análisis de resultados</i>	49
5. CONCLUSIONES	54
6. BIBLIOGRAFÍA	55

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Es práctica común que para darle continuidad a barras de acero de diámetros grandes para refuerzo de concreto se tenga que recurrir a técnicas como el traslape. Cuando el traslape no es una solución práctica o no lo permitan los reglamentos de construcción, se recurre a técnicas como los conectores mecánicos y la soldadura con arco eléctrico con electrodo protegido.

La seguridad de las construcciones en las cuales se utilizan barras de refuerzo no sólo depende de la resistencia de éstas, sino también de las uniones soldadas, por lo que es relevante conocer las propiedades mecánicas de las barras de refuerzo soldadas.

En México se emplea prácticamente sólo el acero de refuerzo ASTM A615 grado 60 (ASTM, 1992), el cual, en la mayor parte de los casos se suelda con arco eléctrico sin tomar en cuenta las recomendaciones de las normas existentes al respecto, como son el precalentamiento del metal base, el esmerilado de las superficies a unir, el resecado de los electrodos, etc. Es necesario tomar en cuenta este tipo de recomendaciones, particularmente porque la norma mexicana NMX-C-407-ONNCCE-2001 (Norma Oficial Mexicana, 2001) para este acero de refuerzo no establece un límite de contenido de carbono en la composición química, este elemento es el responsable de los cambios en la microestructura en la zona afectada por el calor y de la dificultad para la operación de soldadura. Otro problema es la baja calificación de los soldadores y la deficiente supervisión del proceso, que se realiza comúnmente en el lugar de la obra.

En este trabajo se estudian las propiedades mecánicas de barras de refuerzo del tipo ASTM A615 grado 60 (ASTM, 1992) fabricadas en México, las cuales fueron soldadas a tope directo por arco eléctrico con electrodo protegido. Se toma en

cuenta variables como el tipo de electrodo empleado, tipo de bisel con el que se forma la soldadura, así como el precalentamiento requerido por la normativa existente. Con base en el análisis de resultados de ensayos a tensión de barras soldadas y del análisis de algunas características de la composición del acero de estas barras, se evalúan el efecto de tres variables importantes del proceso de soldadura: el precalentamiento, el bisel y el electrodo.

Para la realización de este estudio se efectuaron ensayos a tensión de barras de acero de refuerzo soldadas a tope directo fabricadas en México bajo la norma ASTM A615 grado 60 (ASTM, 1992). Los diámetros seleccionados fueron 1", 1-1/4" y 1-1/2" con números de designación 8,10 y 12, respectivamente.

1.2 Objetivo

El objetivo principal del presente trabajo es conocer el comportamiento a tensión de barras de acero soldadas producidas en México bajo la norma ASTM A615 grado 60 (ASTM, 1992). Los ensayos a tensión se efectuaron en barras continuas de acero y barras unidas mediante soldadura a tope directo en posición vertical y horizontal, para lo cual se siguieron procedimientos usuales de campo, así como los establecidos por normativas específicas que aquí se describen. Se analizaron los parámetros de ductilidad, esfuerzo de fluencia y resistencia a tensión de las barras estudiadas.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

2.1 Introducción

Existen normas internacionales y nacionales para la soldadura del acero de refuerzo, como El Código de Soldadura Estructural - Acero de Refuerzo ANSI/AWS D1.4-98 (AWS, 1998) y el Procedimiento de soldadura Estructural - Acero de Refuerzo NMX-H-121-1988 (Norma Oficial Mexicana, 1988) que reconocen la soldabilidad del acero de refuerzo ASTM A615 grado 60 (ASTM, 1992). Sin embargo, la soldadura del acero de refuerzo en México se realiza en la mayor parte de los casos, sin tomar en cuenta las recomendaciones especificadas por dichas normas. En general, el proceso de soldadura de barras de refuerzo se realiza en el lugar donde se desarrolla la obra, con una supervisión deficiente para el proceso y una baja calificación de los soldadores. En la mayoría de los casos no se precalienta el metal base y en las superficies a unir no se eliminan las imperfecciones después de ser cortadas con oxicorte, además el ángulo de unión es inadecuado, el resecado de los electrodos no es el especificado, etc.

La figura 2.1 muestra un proceso típico de soldadura de barras de refuerzo con arco eléctrico con electrodo protegido.



Fig. 2.1 Soldadura de varillas

El arco eléctrico genera una gran cantidad de calor para fundir el electrodo, este calor crea transformaciones en la microestructura del metal base adyacente al metal fundido creando una región conocida como “Zona Afectada por el Calor” (ZAC). Los factores que influyen en los cambios de temperatura en la soldadura al arco son la energía de entrada, la temperatura inicial del metal base, la geometría de la soldadura, las características térmicas del metal a soldar y el tamaño del electrodo (AWS, 1968). Las características de esta región dependen del contenido de carbono del metal base, del proceso y del procedimiento de soldadura utilizados. La Figura 2.2 muestra una barra cortada después de haber sido soldada en esta investigación, con el objeto de mostrar la zona de la barra afectada por el calor en el proceso de soldadura.

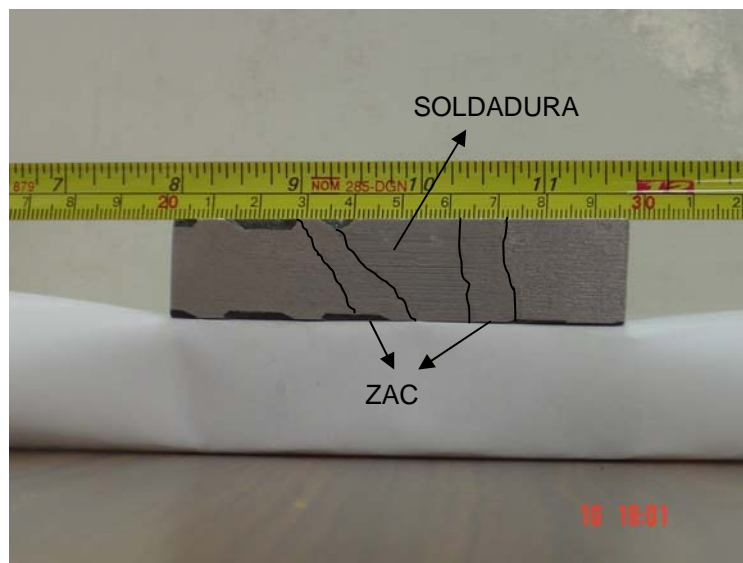


Fig. 2.2 Zona Afectada por el Calor (ZAC) en una varilla soldada

Es necesario el precalentamiento de las varillas antes de soldarlas para reducir la velocidad de enfriamiento, evitar la contracción y la formación de una estructura llamada martensita, la cual confiere al acero una gran dureza, a costa de otras propiedades mecánicas como la ductilidad (AWS, 1968). El esmerilado de las superficies a unir cortadas con oxígeno-acetileno garantiza una mejora en la unión entre el metal base y la soldadura. El resecado de los electrodos contribuye a

minimizar el agrietamiento de la soldaduras por la acción del hidrógeno. La figura 2.3 muestra este proceso como se hace en algunos casos en nuestro país, lo que se logra de manera poco eficiente ya que se utilizan lámparas sin control de temperatura, como se aprecia en la referida figura. El Código de soldadura para acero de refuerzo ANSI/AWS D1.4 (AWS, 1998), señala que los electrodos deberán ser resecados a una temperatura no menor de 370°C durante por lo menos 2 horas, si estos han estado expuestos a la atmósfera por más de 5 horas.



Fig. 2.3 Horno improvisado para el resecado de los electrodos

Generalmente se acepta que la región soldada es más resistente que el metal base. En los aceros con menos del 0.25% de carbono, esto ocurre precisamente por el bajo contenido de carbono y en general el calentamiento no provoca cambios importantes en el metal base. Durante el proceso de soldadura el metal base adyacente a la soldadura se calienta por encima de 727°C provocando cambios en la microestructura del acero y al enfriarse estos cambios pueden llevar a la creación de nuevas estructuras perjudiciales para el acero, dependiendo de la velocidad de enfriamiento y el contenido de carbono. Como los aceros de bajo carbono tienen una baja templabilidad rara vez aumentan su dureza en el proceso de soldadura. Los problemas de poca soldabilidad generalmente aparecen en los aceros con un contenido de carbono mayor de 0.45%, ya que en este caso se requiere generalmente un precalentamiento o un postcalentado para reducir los

efectos provocados por el calor en las propiedades mecánicas del acero. La alta templabilidad de un acero reduce su soldabilidad, lo que permite la formación de martensita y hace frágil la soldadura (Askeland, 2004).

Otro aspecto importante que influye en la calidad de barras de refuerzo soldadas es que la norma ASTM A615 grado 60 (ASTM, 1992), con la cual se fabrican las barras empleadas en nuestro país, no tiene algún requisito relacionado con la soldadura, principalmente, esta norma no establece límites de contenido de carbono en este tipo de barras. Por el contrario, las barras construidas bajo la norma ASTM A706 (ASTM, 1992) especifica que estas barras son de calidad soldable y para ello limita el contenido de carbono en la composición química hasta 0.30% y el carbono equivalente hasta 0.55% como máximo.

Las propiedades mecánicas finales de la varilla soldada dependen de las propiedades finales de la soldadura y de la “Zona Afectada por el Calor”. Para entender el proceso complejo de soldadura con arco eléctrico en los aceros, es necesario comprender la naturaleza de éstos. En lo que sigue, se describen algunas propiedades mecánicas y químicas de los aceros.

2.2 Aceros

El acero es principalmente una aleación de hierro y carbono. El contenido de carbono le da al acero las características mecánicas importantes como resistencia, ductilidad, dureza, etc.

Los aceros se pueden clasificar por su fabricación, por su composición química, por su uso, por su contenido de carbono; por la forma final del producto, por el método final de terminado, etc. (Avner, 1979).

Por su contenido de carbono los aceros se clasifican en aceros de bajo carbono, que son los que tienen hasta 0.30% de carbono, medio carbono, desde 0.30% hasta 0.60% de carbono y alto carbono con mas de 0.60% de carbono (ASM, 1990).

La tabla 2.1 muestra la clasificación SAE para aceros al carbono y aceros aleados, en la cual los dos primeros dígitos indican el tipo de acero y los dos últimos indican el contenido de carbono (Grinberg, 1989).

Tabla 2.1 Clasificación de los aceros de “Society of Automotive Engineers” (SAE)

Tipo SAE	Nombre	Aleantes
10XX	Aceros al carbono	
11XX	Aceros al carbono	Altos en Azufre y bajos en Fósforo
13XX	Aceros al carbono	Altos en Azufre y altos en Fósforo
23XX	Aceros al Mn	1.6 1.9% Mn
25XX	Aceros al Ni	3.5% Ni
31XX	Aceros al Ni-Cr	1.2% Ni y 0.60% Cr
32XX	Aceros al Ni-Cr	1.75% Ni y 1.00% Cr
33XX	Aceros al Ni-Cr	3.50% Ni y 1.50% Cr
40XX	Aceros al Mo	0.35% Mo
41XX	Aceros al Cr-Mo	1.00% Cr y 0.20% Mo
43XX	Aceros al Cr-Ni-Mo	
46XX	Aceros al Ni-Mo	1.75% Ni y 0.25% Mo
48XX	Aceros al Ni-Mo	3.50% Ni y 0.25% Mo
51XX	Aceros al Cr	0.80% Cr
52XX	Aceros al Cr	1.50% Cr
61XX	Aceros al Cr-V	
86XX	Aceros al Ni-Cr-Mo	0.55% Ni, 0.50% Cr y 0.20% Mo
87XX	Aceros al Ni-Cr-Mo	0.55% Ni, 0.50% Cr y 0.20% Mo
92XX	Aceros al Mn-Si	0.80% Mn y 2.00% Si

2.2.1 Aceros aleados

Los aceros aleados son aquellos que tienen propiedades mecánicas superiores a los aceros al carbono debido a efectos de los elementos de aleación que se les agregan para conseguir características determinadas (Aguilar, 1997).

Los elementos de aleación en los aceros se agregan con la finalidad de:

- Proporcionar un endurecimiento en solución sólida de la ferrita.
- Causar la precipitación de carburos de aleación en vez de la cementita.
- Mejorar la resistencia a la corrosión.
- Mejorar la templabilidad o capacidad de endurecimiento.

En la tabla 2.2 se listan los elementos aleantes principales, así como sus efectos más importantes en las características finales de los aceros

Tabla 2.2 Elementos aleantes principales de los aceros y sus efectos.

Elemento	Funciones Principales
Aluminio	<ul style="list-style-type: none">• Desoxida eficazmente• Restringe el crecimiento de grano
Cromo	<ul style="list-style-type: none">• Aumenta la resistencia a la corrosión y a la oxidación• Aumenta la templabilidad• Añade resistencia a altas temperaturas• Resiste la abrasión y el desgaste
Cobalto	<ul style="list-style-type: none">• Contribuye a conservar la dureza a altas temperaturas• Contrarresta la fragilidad debida al azufre• Aumenta la templabilidad
Manganeso	<ul style="list-style-type: none">• Contrarresta la fragilidad debida al azufre• Aumenta la templabilidad
Molibdeno	<ul style="list-style-type: none">• Eleva la temperatura del inicio del crecimiento de grano• Favorece el endurecimiento desde la superficie hacia el interior del material• Contrarresta la tendencia a la fragilidad• Aumenta la resistencia, a la fluencia y la dureza a altas temperaturas,• Mejora la resistencia a la corrosión en aceros inoxidables• Forma partículas resistentes a la abrasión
Níquel	<ul style="list-style-type: none">• Hace resistentes a los aceros no templados o recocidos

Tabla 2.2 Continuación

Elemento	Funciones Principales
Fósforo	<ul style="list-style-type: none"> • Aumenta la resistencia de los aceros de bajo carbono • Aumenta la resistencia a la corrosión • Mejora la maquinabilidad en los aceros de cortado libre
Silicio	<ul style="list-style-type: none"> • Desoxidador de propósito general • Elemento de aleación para láminas eléctricas y magnéticas • Mejora la resistencia a la corrosión • Hace resistentes a los aceros de baja aleación
Tungsteno	<ul style="list-style-type: none"> • Forma partículas duras y resistentes a la abrasión en aceros para herramientas • Promueve la dureza y la resistencia a altas temperaturas
Vanadio	<ul style="list-style-type: none"> • Eleva la temperatura de inicio del crecimiento de grano • Aumenta la templabilidad • Produce endurecimiento

2.2.2 Varillas de acero de refuerzo en elementos de concreto

Las varillas son barras de acero fabricadas especialmente para usarse como refuerzo del concreto y cuya superficie está provista de salientes llamadas corrugaciones, las que tienen el objeto de lograr una adherencia adecuada entre los dos materiales, con lo cual se consigue que no haya movimientos relativos entre ellos. Las varillas de refuerzo se colocan en las cimbras antes de colar el concreto. Éstas generalmente se fabrican en un gran intervalo de diámetros, que van desde 3/8 hasta 1-1/2 pulgadas.

Las varillas se identifican por grados, con base a su esfuerzo de fluencia mínimo, por ejemplo, una varilla de grado 42, indica una resistencia de fluencia mínima de 42,000 Kg/cm². La norma mexicana NMX-C-407-ONNCCE-2001 (Norma Oficial Mexicana, 2001), clasifica a las varillas de grado 30, 42 y 52.

2.2.3 Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas determinan el comportamiento de los aceros bajo cargas aplicadas. Las propiedades mecánicas de los aceros se especifican por la

resistencia a la tensión, resistencia de fluencia, dureza, elongación, reducción de área y la resistencia a la compresión. Cuando un acero es sometido a una carga de tensión, sufre inicialmente una deformación elástica, y si la carga sigue aumentando después de la fluencia, sufrirá una deformación plástica. La diferencia entre ellas es que la primera desaparece cuando deja de aplicarse la carga y la deformación plástica es una deformación permanente aún cuando se retire la carga.

Con un ensayo de tensión es posible determinar algunas propiedades mecánicas en los aceros mencionadas anteriormente. Este ensayo consiste en colocar una probeta en una máquina de prueba para someterla a una carga axial por medio de un sistema de carga.

Las propiedades que se pueden determinar son las siguientes:

El límite de proporcionalidad. En el diagrama esfuerzo-deformación obtenido en un ensayo a tensión se puede visualizar que existe una parte del diagrama en el cual el esfuerzo es proporcional a la deformación. El esfuerzo en el límite del punto de proporcionalidad se conoce como el límite de proporcionalidad.

Si la carga se eleva por encima de determinado valor, la deformación será permanente. Por lo tanto podemos hablar aquí de un límite elástico, el cual se define como el esfuerzo mínimo al que ocurre la primera deformación plástica permanente.

Para un aumento de carga más allá del límite elástico, se alcanza un esfuerzo para el cual el material continúa deformándose sin que haya incremento de la carga. El esfuerzo en este punto se le conoce como punto de cedencia o punto de fluencia (F_y). Para materiales como los aceros de alta resistencia la máxima resistencia útil corresponde a la resistencia de fluencia. Por lo general este valor se determina por el “método de la deformación permanente”. En el diagrama esfuerzo-deformación se marca en el eje de las abscisas un valor de deformación de 0.002. Con este valor se traza una paralela a la recta donde el esfuerzo es proporcional a la deformación hasta cruzar la curva, este es el punto conocido como resistencia de fluencia (F_y), al 0.2%.

La tenacidad es la capacidad de un material para deformarse permanentemente sin romperse cuando se le aplica una fuerza. Ésta se mide con la elongación porcentual y la reducción de área. La tenacidad es de gran importancia para la soldadura, puesto que si es considerable esto indicará que la soldadura tendrá menos probabilidades de romperse durante el uso.

La dureza es una propiedad que no está definida con precisión. Dependiendo del contexto, puede representar resistencia al rayado o penetración y una medida cualitativa de la resistencia del material. Los ensayos de dureza más comunes son el de Brinell, Rockwell y Vickers (Avner, 1979).

2.3 Diagrama de fases Fe-C

Toda la información acerca de las diferentes fases que pueden tener los aceros en un intervalo amplio de temperaturas que incluye los estados sólido y líquido se resume en el diagrama de fases que se presenta en la figura 2.4.

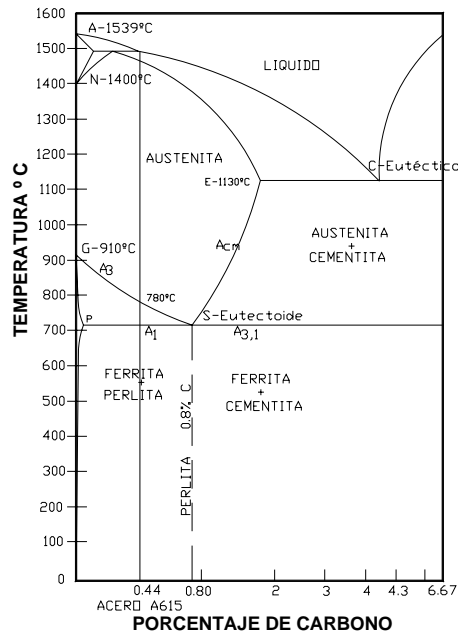


Fig. 2.4. Diagrama de equilibrio Hierro-Carbono

En el diagrama hierro-carbono de la figura 2.4, el carbono en equilibrio no aparece como carbono libre, sino en la forma de carburo, conocido como cementita. En la escala inferior se indica el porcentaje en peso del carbono. En el extremo izquierdo la aleación se reduce a hierro puro. En la escala vertical se indica la temperatura. Las curvas en el diagrama delimitan los campos donde pueden existir las fases.

El hierro puro tiene diferentes formas alotrópicas, es decir, existe en 3 formas diferentes. A temperatura ambiente, el hierro tiene una estructura cúbica centrada en el cuerpo con propiedades magnéticas, llamado hierro α . Si se aumenta la temperatura hasta 910°C , toma lugar un cambio, una estructura cúbica centrada en las caras, llamado hierro γ . El hierro nuevamente toma la forma de estructura cúbica centrada en el cuerpo a una temperatura de 1400°C y es llamado hierro δ .

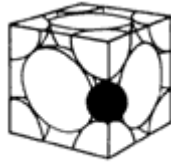
El punto S del diagrama se refiere a la reacción eutectoide, la que ocurre a una temperatura de 727°C , en la cual una fase sólida, al enfriarse, se convierte en dos sólidos íntimamente mezclados. Al producto de esta reacción se le da el nombre de perlita, con una composición de 0.80% de carbono.

El diagrama se divide en dos secciones principales, aleaciones que tienen menos del 2% de carbono son llamados aceros; y las aleaciones que contienen más del 2% de carbono son llamadas hierros fundidos.

2.3.1 Estructuras que aparecen en el diagrama

Cementita. Conocido también como carburo de hierro es un compuesto duro y frágil de baja resistencia tensil, pero de alta resistencia compresiva. Contiene 6.67% de C en peso. Su estructura cristalina es ortorrómbica.

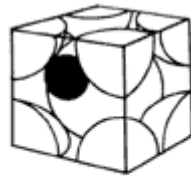
Austenita. Es el nombre dado a la solución sólida γ . Generalmente no es estable a la temperatura ambiente. Bajo ciertas condiciones, es posible obtener austenita a la temperatura ambiente y su estructura cristalina se muestra en la figura 2.5.



AUSTENITA

Fig. 2.5 La austenita es una fase del acero con una red cristalina centrada en las caras.

Ferrita. Es una solución sólida intersticial de una pequeña cantidad de carbono disuelto. Tiene una estructura cúbica centrada en el cuerpo, como se muestra en la figura 2.6. Es la estructura más suave que aparece en el diagrama.

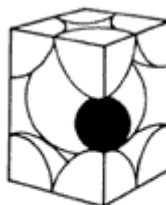


FERRITA

Fig. 2.6 Red cristalina de la fase ferrita.

Perlita. Producto de la reacción eutectoide que contiene 0.80% de carbono a una temperatura de 727° C y se forma a un enfriamiento muy lento.

Martensita. La martensita no es una fase de equilibrio. Este es el motivo por el cual no aparece en el diagrama de fases. La martensita confiere al acero alta dureza a costa de otras propiedades como la ductilidad, es decir, es una estructura bastante frágil. Por eso no es deseable que se forme a la hora de soldar un acero(Askeland, 2004). Su estructura cristalina se muestra en la figura 2.7



MARTENSITA

Fig.2 7 Red cristalina de la martensita.

2.3.1 Temperaturas críticas

Las temperaturas críticas son aquellas en las cuales los aceros sufren cambios en su estructura cristalina, ya sea por calentamiento o enfriamiento. En la figura 2.4, las líneas A_3 y A_1 son conocidas como línea de temperatura crítica superior y línea de temperatura crítica inferior, respectivamente, para los aceros con menos del 0.8% de carbono. Para aceros con contenidos de carbono mayores a 0.8% son las líneas A_{cm} y $A_{3.1}$.

Cuando la región de la varilla adyacente a la soldadura se calienta por el calor del arco la temperatura se eleva por encima de 727°C , creando transformaciones de fase. Dentro de la región de austenita no ocurre ningún cambio en su estructura, sino hasta que se cruza la línea GS en el diagrama de la figura 2.4, a una temperatura de 780°C . Durante el enfriamiento, realizado en las condiciones ambientales de campo, la austenita de la “Zona Afectada por el Calor” se transforma en una estructura nueva, dependiendo de la velocidad de enfriamiento(Askeland, 2004).

2.4 Tratamientos térmicos

Se define el tratamiento térmico como un calentamiento y enfriamiento controlado de un metal para alterar sus propiedades mecánicas.

La parte más importante del diagrama hierro-carbono para el tratamiento térmico del acero, es la que involucra la transformación de la austenita por debajo de la temperatura crítica inferior.

2.4.1 Tipos de tratamientos térmicos

Los tratamientos térmicos más usuales son:

- a) Recocido.
- b) Temple.
- c) Revenido.

a) Recocido. El objeto principal del tratamiento térmico del recocido para aceros es para regenerar su microestructura o eliminar tensiones internas. Consiste en el calentamiento del acero a temperaturas adecuadas, seguido generalmente de un enfriamiento lento. Existen diversas modalidades de recocido, como el recocido total, el cual se consigue por encima de la temperatura crítica A_3 ó A_{cm} , de globulización, el cual se obtiene en un intervalo de temperaturas de 700° a 725° C, recocido de eliminación de tensiones internas, que se obtiene en un intervalo de temperatura de 600° a 650° C. En este tipo de tratamiento térmico, el enfriamiento desde la región austenítica debe ser lo suficientemente lento, ya sea dentro del horno o al aire, con el objetivo de obtener una estructura perlítica.

b) Temple. El objeto del tratamiento térmico del temple es endurecer y aumentar la resistencia de los aceros. El acero se calienta a una temperatura ligeramente mayor que la temperatura crítica superior y se enfría a una velocidad muy grande, mayor que la crítica, que la transformación a perlita o bainita se inhibe y el producto obtenido será martensita. El objetivo es que se logre la disolución de todos los carburos, logrado esto, se enfría el acero en el medio de temple, lo cual deberá ser lo suficientemente rápido para que el carbono no logre salir de la estructura cristalina cúbica centrada en las caras de la austenita y se logre la formación de la martensita.

La dureza de un acero depende de las características de enfriamiento del medio de temple. La velocidad de enfriamiento depende principalmente de tres factores:

- El calor específico y el poder de conducción de calor del acero.
- La masa, la forma y el estado de la superficie de la pieza.
- El poder de enfriamiento del medio de temple.

El medio de temple deberá mostrar una alta rapidez de enfriamiento inicial, para evitar la transformación de la austenita y luego una velocidad de enfriamiento menor para minimizar las posibilidades de distorsión y agrietamiento de la pieza. Los medios de temple más usuales, enlistados en orden de disminución de la severidad de poder de enfriamiento son:

- I. Solución acuosa al 10% de cloruro de sodio (salmuera).
- II. Agua.

III. Sales fundidas.

IV. Aceites.

V. Aire.

c) Revenido. El tratamiento térmico del revenido es el que se le da a las piezas de acero que han sido previamente templadas. Consiste en un calentamiento a una temperatura inferior a la crítica, para disminuir la dureza y las tensiones internas de los aceros templados. Los intervalos de temperaturas para este tratamiento térmico están entre 35° y 200° C, 200° y 400° C, 400° y 650° C y 650° y 725° C, dependiendo siempre de las características deseadas en el acero. En general, se puede decir que a medida que aumenta la temperatura en este tipo de tratamiento disminuye la dureza y aumenta la tenacidad del acero (Grinberg, 1989).

2.5 La soldadura por arco eléctrico con electrodo protegido

La soldadura con arco eléctrico consiste en unir dos piezas de metal a través de una gran corriente eléctrica que pasa por una varilla de metal llamada electrodo. El intenso calor producido por la corriente eléctrica funde la punta del electrodo y la superficie de las piezas que se están soldando. El electrodo y las piezas que se están soldando forman parte de un circuito eléctrico que se ilustra en la figura 2.8.

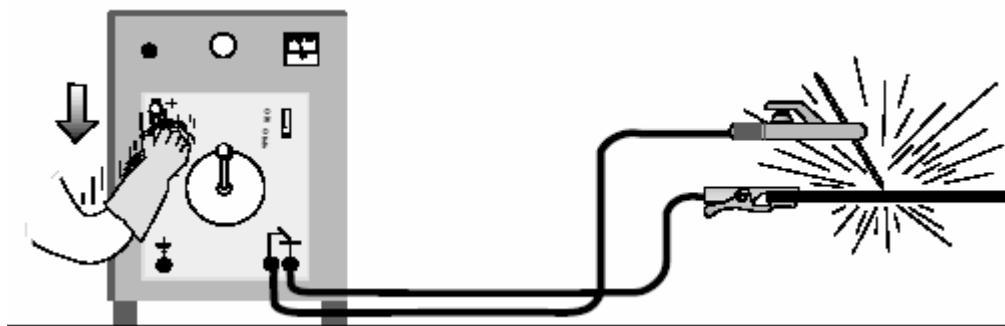


Figura 2.8 Equipo para soldadura de arco eléctrico

Este es uno de los procesos más usados debido a ciertas ventajas como:

- El equipo es portátil.

-
-
- El proceso es muy versátil respecto a la ubicación y a la operación.
 - El electrodo recubierto proporciona el metal de aporte y su protección por lo que no se requiere protección adicional ni fundentes.
 - El proceso es adecuado para la mayor parte de los metales de uso común como lo es el acero.

El equipo que se requiere para llevar a cabo la soldadura por arco eléctrico consiste de:

- Una fuente de potencia, que puede ser de corriente alterna o corriente continua, según el tipo de corriente de soldadura requerida, el intervalo de amperaje, la posición en que se soldará, etc.
- Un porta electrodo, que es un dispositivo para sostener al electrodo.
- Un dispositivo de conexión con la pieza de trabajo, que normalmente consiste en una pinza tensada con un resorte.
- Cables para soldadura, que sirven para conectar el porta electrodo y la conexión a tierra.

La práctica de la soldadura es de alto riesgo por lo que se recomienda usar siempre equipo de seguridad como:

- Máscara de soldar
- Guantes de cuero
- Coletos o delantal de cuero
- Zapatos de seguridad.

Uno de los elementos de suma importancia en el proceso de soldadura es sin duda el electrodo. Consiste en una varilla con un núcleo de metal recubierto por una capa de compuestos que sirven para proteger el arco y evitar una contaminación excesiva del metal aportado, además esta capa proporciona una escoria protectora que protege al metal del aire y en algunos casos proveer de elementos de aleación al metal depositado como se muestra en la figura 2.9.

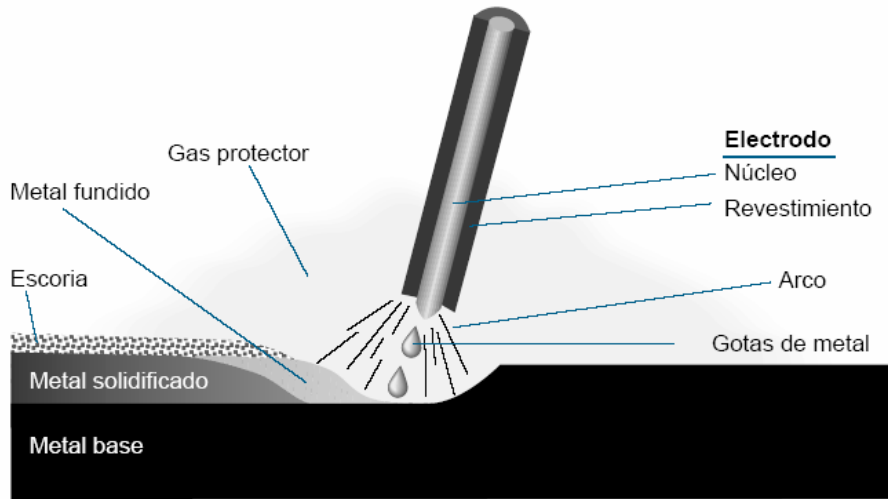


Fig. 2.9 Fundición del electrodo

Los electrodos con recubrimiento de bajo contenido de hidrógeno se clasifican de acuerdo con los requisitos de especificaciones emitidas por la “American Welding Society” (AWS), como se muestra en la tabla 2.3.

Tabla 2.3 Especificaciones de la AWS para electrodos con recubrimiento.

Tipo de Electrodo	Especificaciones
Acero al carbono	Sección A5.1
Acero de baja aleación	Sección A5.5

Para los electrodos con recubrimiento de aceros de baja aleación la sección ANSI/AWS A5.5 clasifica a los electrodos con un sufijo adicional para designar la composición química, como se muestra en la figura 2.10

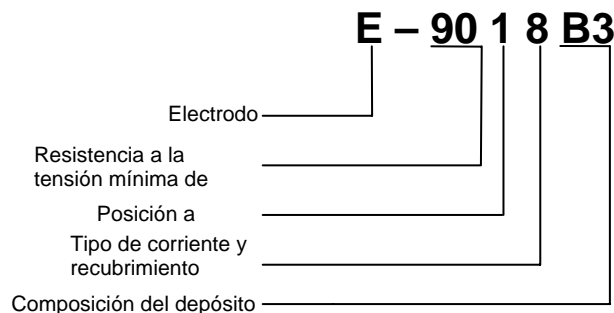


Figura 2.10 Clasificación de electrodos de baja aleación

En la tabla 2.4 se muestran los diferentes tipos de recubrimiento y tipos de corriente de los electrodos.

Tabla 2.4 Tipo de recubrimiento y tipo de corriente.

Digito	Tipo de recubrimiento	Corriente para soldar
0	Sodio celulosa	CD PI
1	Potasio celulosa	CA ó CD PI
2	Sodio titanio	CA ó CD PD
3	Potasio titanio	CA ó CD PI
4	Titanio polvo de hierro	CA ó CD PI
5	Sodio bajo hidrógeno	CD PI
6	Potasio bajo hidrógeno	CA ó CD PD
7	Óxido de hierro polvo de hierro	CA ó CD PI
8	Bajo hidrógeno polvo de hierro	CA ó CD PI

CA= Corriente Alterna

CD PI= Corriente directa polaridad invertida

CD PD=Corriente directa polaridad directa

La experiencia y la síntesis de muchas investigaciones han hecho que se establezcan procedimientos que deben observarse para tener un proceso de soldadura óptimo:

- La naturaleza del metal base, es decir, conocer su composición química, ya que la soldadura de los aceros es muy susceptible al contenido de carbono.
- Dimensiones de la sección a soldar, esto permitirá elegir el diámetro del electrodo y el tipo de corriente para producir una soldadura del tamaño requerido en el tiempo más corto posible.
- Tipo de corriente, ya que ésta junto con la polaridad afectan la rapidez de fusión de los electrodos y del metal base.
- Tipo de unión, debido a que las piezas que se van a soldar deben de tener ciertos cortes y además las superficies a soldar deben estar limpias y libres de óxido.

2.6 Soldabilidad de los aceros

La soldabilidad de los aceros se refiere a la capacidad que tiene este material para ser soldado. Este concepto está íntimamente ligado con la composición química del acero a través del Carbono Equivalente (CE); ecuación empírica desarrollada para expresar la soldabilidad de los aceros. El Código de Soldadura para aceros de refuerzo ANSI/AWS D1.4-98 (AWS, 1998) señala la fórmula para el cálculo del CE

$$C.E. = \%C + \frac{\%Mn}{6} \dots\dots\dots Ec. 1$$

y el Procedimiento de Soldadura Estructural Acero de Refuerzo NMX-H-121-1988(Norma Oficial Mexicana, 1988) señala la siguiente fórmula:

$$C.E. = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cu}{40} + \frac{\%Ni}{20} + \frac{\%Cr}{10} - \frac{\%Mo}{50} - \frac{\%V}{10} \dots\dots\dots Ec. 2$$

La soldabilidad de los aceros al carbono depende principalmente del contenido de carbono. Para los aceros de bajo carbono la soldabilidad es excelente, es buena y regular para los aceros de medio carbono y pobre para los aceros de alto carbono (AWS, 1987)

La tabla 2.5 señala la soldabilidad de aceros de acuerdo al contenido de carbono y CE.

Tabla 2.5 Soldabilidad de algunos aceros con base al contenido de carbono y CE

Acero	% de Carbono	Carbono Equivalente	Niveles de soldabilidad ^d
ASTM A36	0.10 a 0.30 ^a	0.20 a 0.50 ^a	Buena
ASTM A615 Grado 60	0.417 a 0.443 ^b	0.59 a 0.62 ^b	Regular
ASTM A706 Grado 60	Máx 0.30 ^c	Máx 0.55 ^c	Buena

a.- ASM, 1997

b.- Composición química del fabricante y CE obtenido de las varillas utilizadas en esta investigación

c.- ASTM, 1992

d. - AWS, 1987

Los aceros con un máximo de 0.30% de contenido de carbono son fáciles de soldar, en general se pueden trabajar y son los más usados por los herreros para

hacer ventanas, puertas, etc. Los aceros de medio y alto carbono son más difíciles de soldar ya que con bastante facilidad se puede formar martensita en la zona afectada por el calor, causando por lo tanto, una soldadura de poca tenacidad. Sin embargo, se han desarrollado varias estrategias para contrarrestar estos efectos como el precalentamiento del material o la minimización de la incorporación del hidrógeno que hace que el acero se vuelva frágil (Askeland, 2004).

Como el CE está íntimamente ligado con el contenido de carbono en los aceros, se suele utilizar el diagrama carbono-carbono equivalente para localizar los aceros de acuerdo a su soldabilidad, que se describe a continuación. Las coordenadas del diagrama son el contenido de carbono en la escala vertical y el carbono equivalente en la escala horizontal. En el diagrama se delimitan tres zonas. La zona I comprende a los aceros de soldabilidad óptima. Son aceros con contenidos de carbono sumamente bajos. La zona II abarca aceros de buena a regular soldabilidad, que se usan en la construcción de estructuras y edificios. La zona III comprende a los aceros con alto riesgo de falla en el caso de ser soldados. Las zonas que aquí se delimitan se muestran en la figura 2.11.

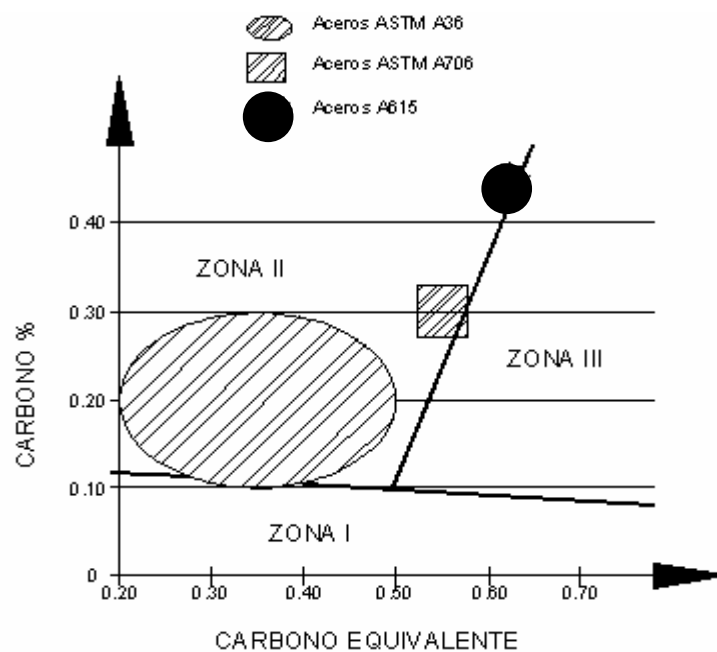


Fig. 2.11 Diagrama del carbono contra el carbono equivalente

2.7 Requisitos del código ANSI/AWS D1.4-98 para la soldadura del acero de refuerzo ASTM A615 grado 60

En esta sección se comentan dos aspectos importantes en el proceso de soldadura para aceros ASTM A615 grado 60 (ASTM, 1992) señalados por el Código de Soldadura Estructural – Acero de Refuerzo ANSI/AWS D1.4-98 (AWS, 1998): el tipo de electrodo y el precalentamiento del metal base.

Los electrodos recomendados para la soldadura del acero ASTM A615 grado 60 (ASTM, 1992) en la tabla 5.1 del Código ANSI/AWS D1.4-98 (AWS, 1998) son los de la serie E90XX-X, con un esfuerzo de fluencia (F_y) de 77 ksi y un esfuerzo último (F_{su}) de 90 ksi. Estos deben comprarse en envases herméticamente sellados o resecarse antes de ser usados. Si los electrodos permanecen expuestos a la atmósfera por periodos de tiempo mayores a los tiempos especificados en la tabla 5.3 del Código, estos deberán ser resecados de la siguiente manera:

Los electrodos de la serie E90XX-XX deberán ser resecados en un horno durante por lo menos una hora a una temperatura entre 370° y 430° C, no más de una vez. Para los electrodos de la serie E90XX-X, la tabla 5.3 de este Código señala un periodo máximo de exposición a la atmósfera de 5 horas como máximo, después de este tiempo, deberán ser resecados antes de usarse.

Las temperaturas de precalentamiento requeridas para diferentes rangos de valores del carbono equivalente (CE) se especifican en la tabla 5.2 del Código ANSI/AWS D1.4-98 (AWS, 1998). Para valores del CE de 0.55 a 0.65% la temperatura de precalentamiento mínima es de 90° C para barras del No. 7 al No. 11 y de 150° C para barras del No. 14 al No. 18. Cuando se desconozca el CE se debe precalentar a una temperatura mínima de 260° C.

Si la temperatura ambiente es de -18° C se recomienda no soldar el acero de refuerzo.

3. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL

3.1 Metodología y materiales

En esta investigación se soldaron y ensayaron a tensión un total de 54 muestras de barras de refuerzo con diámetros de 1", 1-1/4" y 1-1/2", las barras fueron soldadas a tope directo. Además, con fines de comparación se ensayaron 3 barras sin soldadura. Las muestras ensayadas tuvieron una longitud de 90 cm con una longitud mínima entre mordazas de 30 cm. De los ensayos a tensión se obtuvieron curvas esfuerzo-deformación. Para el registro de las deformaciones se utilizó un dispositivo construido en el Instituto de Ingeniería, el cual se muestra en la figura 3.1. El dispositivo cuenta con un conjunto de "strain gauges" de puente completo adheridos a una laminilla de acero que al flexionarse provoca un cambio en su resistencia eléctrica registrada por los "strain gauges", la señal registrada es amplificada y registrada en un sistema de adquisición de datos para ser capturada en una computadora personal previamente configurada para obtener una medida final en milímetros.

Las variables que se consideraron en este estudio para analizar el problema de soldadura de barras de refuerzo fueron: electrodos (E-7018 y E-9018), tipo de bisel y ejecución o no de precalentamiento.

Se utilizaron electrodos E-7018 de diámetros 1/8" y 5/32" y E-9018-B3 de 1/8" y de 5/32". Además, se empleó una máquina de soldar de corriente directa marca "Haggluns".

El corte y precalentamiento se llevó a cabo con equipo de oxígeno-acetileno y un gis térmico para medir la temperatura de precalentamiento requerida.

Los ensayos de tensión se realizaron en la Máquina Universal del Instituto de Ingeniería, la cual tiene una capacidad de 250 toneladas.



Figura 3.1. Instrumentación

Las tablas 3.1, 3.2 y 3.3 muestran la composición química de las barras No. 8, 10 y 12, respectivamente, que se emplearon en este estudio. Esta información fue proporcionada por el fabricante.

Tabla 3.1 Composición química de barras No. 8.

% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Ni	% Cu
0.417	0.156	1.011	0.013	0.024	0.139	0.084	0.289

Tabla 3.2 Composición química de barras No. 10.

% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Ni	% Cu
0.443	0.207	1.029	0.021	0.033	0.132	0.102	0.491

Tabla 3.3 Composición química de barras No. 12.

% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Ni	% Cu
0.441	0.156	1.060	0.017	0.029	0.088	0.097	0.444

Con base en la información de las tablas 3.1, 3.2 y 3.3 se calculó el parámetro CE (carbono equivalente) con la Ec. 2.1 (ANSI/AWS D1.4-98) y con la Ec. 2.2 (NMX-H-121). Los resultados al emplear estas ecuaciones se muestran en la tabla 3.4

Tabla 3.4 Carbono equivalente de las varillas No. 8, 10 y 12.

Número de varilla Grado 42	C. E. Ec. 2.1	C. E. Ec. 2.2
8	0.59	0.61
10	0.61	0.65
12	0.62	0.64

Con los resultados del carbono equivalente y empleando la tabla No 5.2 del Código ANSI/AWS D1.4-98 (AWS, 1998) se tiene que se requiere una temperatura de precalentamiento de 150° C.

En la tabla 3.5 se indican las características y número de las muestras soldadas. Las columnas (1) y (2) de esta tabla indican la denominación del grupo de varilla soldada considerada, así como su número de asignación, respectivamente. Las columnas (3) y (4) se refieren a los casos sin precalentamiento y con precalentamiento, respectivamente. La columna (5) se refiere al bisel B1, correspondiente a varillas soldadas en posición vertical, figura 3.1. La columna (6) se refiere al bisel B2, correspondiente a varillas soldadas en posición horizontal, figura 3.2. Las columnas (7) y (8) se refieren al tipo de electrodo empleado en el estudio experimental, E7018 y E9018 respectivamente. La columna (9) indica el total de muestras por diámetro.

Tabla 3.5 Características y número de barras de refuerzo soldadas y ensayadas

Grupo	No. de Barra	Sin pre-calentamiento	Con pre-calentamiento	B1	B2	E-70	E-90	Total
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
A	8	X		X		X		3
	10	X		X		X		3
	12	X		X		X		3
B	8	X		X			X	3
	10	X		X			X	3
	12	X		X			X	3
C	8		X	X		X		3
	10		X	X		X		3
	12		X	X		X		3
D	8		X	X			X	3
	10		X	X			X	3
	12		X	X			X	3
E	8	X			X		X	3
	10	X			X		X	3
	12	X			X		X	3
F	8		X		X		X	3
	10		X		X		X	3
	12		X		X		X	3
Total								54

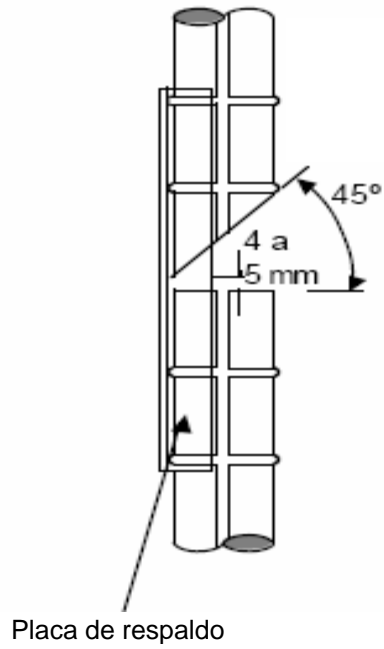


Fig. 3.2. Bisel B1 para varillas soldadas en posición vertical

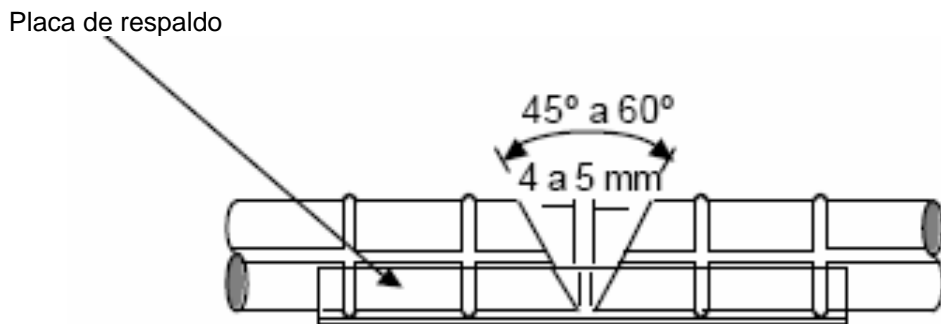


Fig. 3.3.-Bisel B2 para varillas soldadas en posición horizontal

4. ESTUDIOS EXPERIMENTALES

4.1 Resultados de la investigación experimental

Los resultados del ensayo a tensión de las barras sin soldadura se muestran en la tabla 4.1. Las columnas (2) y (3) de esta tabla muestran la carga máxima (P) y el esfuerzo máximo (Fsu), respectivamente, la columna (4) muestra el esfuerzo de fluencia (Fy), la columna (5) muestra el módulo de elasticidad (Es), la columna (6) muestra la deformación máxima (ϵ_{su}) y la columna (7) muestra la relación entre el esfuerzo máximo y el esfuerzo de fluencia especificado de 4,200 kg/cm².

Tabla 4.1 Resultados del ensayo a tensión de barras sin soldadura

No. de barra	P (kg)	Fsu (kg/cm ²)	Fy (kg/cm ²)	Es (kg/cm ²)	ϵ_{su} (%)	Fsu/Fy
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
8	35581	7017	4320	1797139	12	1.67
10	60721	7647	4367	2222990	10	1.82
12	84645	7425	4371	2121550	21.3	1.76

Considerando el efecto de la temperatura inicial del metal base, del tipo de bisel y el tipo de electrodo para las barras soldadas, los grupos definidos en la tabla 3.1 se reagrupan de acuerdo al efecto de estas variables. Se tienen 3 casos para el efecto de la temperatura inicial del metal base manteniendo fijos el bisel y el tipo de electrodo, 2 casos para el efecto del bisel manteniendo fijos la temperatura y el tipo de electrodo y 2 casos para el efecto del electrodo, manteniendo fijos la temperatura y el bisel, como se muestra en la tabla 4.2. De esta manera se tienen 7 casos por cada uno de los diámetros considerados en este estudio, los que se describen a continuación.

a) Efecto del precalentamiento

Caso I- Grupos A y C (B1, E70, sin y con precalentamiento)

Caso II- Grupos B y D (B1, E90, sin y con precalentamiento)

Caso III- Grupos E y F (B2, E90, sin y con precalentamiento)

b) Efecto del tipo de bisel

Caso IV- Grupos B y E (E90, sin precalentamiento, B1 y B2)

Caso V- Grupos D y F (E90, con precalentamiento, B1 y B2)

c) Efecto del tipo de electrodo

Caso VI- Grupos A y B (B1, sin precalentamiento, E70 y E90)

Caso VII- Grupos C y D (B1, con precalentamiento, E70 y E90)

En la tabla 4.2 se muestran los 7 casos considerados en este estudio. Las columnas (1), (2) y (3) de esta tabla se refieren a las variables mencionadas, los casos considerados del I al VII y los grupos involucrados, respectivamente, la columna (4) indica el número de asignación de las barras. Las columnas (5) y (6) se refieren a las barras sin precalentamiento y con precalentamiento, respectivamente. Las columnas (7) y (8) se refieren al bisel B1 y al bisel B2, respectivamente. Las columnas (9) y (10) se refieren al tipo de electrodo empleado en el estudio experimental, E7018 y E9018 respectivamente.

Tabla 4.2. Casos y grupos considerados de acuerdo al efecto de cada variable

Variable	Casos	Grupos	No. de Barra	Sin Pre calentamiento	Con Pre calentamiento	B1	B2	E-70	E-90
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
Efecto del precalentamiento	I	A	8	X		X		X	
			10	X		X		X	
			12	X		X		X	
		C	8		X	X		X	
			10		X	X		X	
			12		X	X		X	
	II	B	8	X		X			X
			10	X		X			X
			12	X		X			X
		D	8		X	X			X
			10		X	X			X
			12		X	X			X
	III	E	8	X			X		X
			10	X			X		X
			12	X			X		X
		F	8		X		X		X
			10		X		X		X
			12		X		X		X

Tabla 4.2. continuación

Variable	Casos	Grupos	No. de Barra	Sin Pre-calentamiento	Con Pre-calentamiento	B1	B2	E-70	E-90	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	
Efecto del bisel	IV	B	8	X		X			X	
			10	X		X		X		
			12	X		X		X		
		E	8	X			X		X	
			10	X			X		X	
			12	X			X		X	
	V	D	8		X	X			X	
			10		X	X		X		
			12		X	X		X		
		F	8		X		X		X	
			10		X		X		X	
			12		X		X		X	
	Efecto del electrodo	VI	A	8	X		X		X	
				10	X		X		X	
				12	X		X		X	
B			8	X		X			X	
			10	X		X			X	
			12	X		X			X	
VII		C	8		X	X		X		
			10		X	X		X		
			12		X	X		X		
		D	8		X	X			X	
			10		X	X			X	
			12		X	X			X	

En los casos del I al III, en los que se toma en cuenta el efecto de la temperatura inicial del metal base, se consideran los grupos en los cuales se mantienen fijos el tipo de bisel y el tipo de electrodo. En los casos IV y V, en los que se toma en cuenta el tipo de bisel se consideran los grupos en los cuales se mantienen fijos la temperatura inicial del metal base y el tipo de electrodo. En los casos VI y VII en los que se toma en cuenta el efecto del tipo de electrodo empleado, se consideran los grupos en los cuales se mantienen fijos la temperatura inicial del metal base y el tipo de bisel empleado.

Los resultados obtenidos del ensaye a tensión de las barras soldadas se promediaron por cada muestra de tres barras respectivas y se resumen en las tabla 4.3, 4.4 y 4.5, correspondientes a las barras No. 8, 10 y 12, respectivamente. La columna (1) de estas tablas, se refieren a los 7 casos mencionados anteriormente, la columna (2) se refiere a los grupos considerados por cada caso, las columnas (3) y (4) muestran la carga máxima (P) y el esfuerzo máximo (Fsu), respectivamente, la columna (5) muestra el esfuerzo de fluencia (Fy), la columna (6) muestra el módulo de elasticidad (Es), la columna (7) muestra la deformación máxima (ϵ_{su}) y la columna (8) muestra la relación entre el esfuerzo máximo y el esfuerzo de fluencia especificado de 4,200 kg/cm². De acuerdo con el Código ANSI/AWS D1.4-98 (AWS, 1998) la resistencia mínima a tensión de las barras soldadas debe ser mayor que 1.25 veces el esfuerzo de fluencia mínimo especificado.

Tabla 4.3 Resultados promedio de ensayos a tensión de barras soldadas No. 8

Casos	Grupos	P (kg)	Fsu (kg/cm ²)	Fy (kg/cm ²)	Es (kg/cm ²)	ϵ_{su} (%)	Fsu/Fy
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
I	A	23501	4635	4249	1991772	1	1,10
	C	23458	4627	4075	1668979	1,08	1,10
II	B	28631	5647	4341	2014824	2,77	1,45
	D	31890	6290	4228	1720841	3,53	1,49
III	E	35490	7000	4091	1656414	7,79	1,67
	F	33136	6536	4319	1608265	5,82	1,51
IV	B	28631	5647	4341	2014824	2,77	1,45
	E	35490	7000	4091	1656414	7,79	1,67
V	D	31890	6290	4228	1720841	3,53	1,49
	F	33136	6536	4319	1608265	5,82	1,51
VI	A	23501	4635	4249	1991772	1	1,10
	B	28631	5647	4341	2014824	2,77	1,45
VII	C	23458	4627	4075	1668979	1,08	1,10
	D	31890	6290	4228	1720841	3,53	1,49

Tabla 4.4 Resultados promedio de ensayos a tensión de barras soldadas No. 10

Casos	Grupos	P (kg)	Fsu (kg/cm ²)	Fy (kg/cm ²)	Es (kg/cm ²)	εsu (%)	Fsu/Fy
(1)	(2)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
I	A	30806	3880	-	1618812	0,5	0,92
	C	33072	4165	4279	2014166	0,73	0,99
II	B	41737	5257	4284	1733976	1,93	1,25
	D	41808	5266	4312	1859993	1,16	1,25
III	E	46902	5907	4379	2170295	1,59	1,41
	F	52194	6585	4373	2331247	2,90	1,57
IV	B	41737	5257	4284	1733976	1,93	1,25
	E	46902	5907	4379	2170295	1,59	1,41
V	D	41808	5266	4312	1859993	1,16	1,25
	F	52194	6585	4373	2331247	2,90	1,57
VI	A	30806	3880	-	1618812	0,5	0,92
	B	41737	5257	4284	1733976	1,93	1,25
VII	C	33072	4165	4279	2014166	0,73	0,99
	D	41808	5266	4312	1859993	1,16	1,25

Tabla 4.5 Resultados promedio de ensayos a tensión de barras soldadas No. 12

Casos	Grupos	P (kg)	Fsu (kg/cm ²)	Fy (kg/cm ²)	Es (kg/cm ²)	εsu (%)	Fsu/Fy
(1)	(2)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
I	A	41699	3658	3878	2119265	0,43	0,87
	C	53197	4666	4049	1514654	1,59	1,11
II	B	62156	5452	4221	2146248	1,80	1,30
	D	58579	5139	4343	2598838	1,00	1,22
III	E	62771	5487	3997	1696001	2,30	1,31
	F	71100	6237	4091	1251941	4,90	1,48
IV	B	62156	5452	4221	2146248	1,80	1,30
	E	62771	5487	3997	1696001	2,30	1,31
V	D	58579	5139	4343	2598838	1,00	1,22
	F	71100	6237	4091	1251941	4,90	1,48
VI	A	41699	3658	3878	2119265	0,43	0,87
	B	62156	5452	4221	2146248	1,80	1,30
VII	C	53197	4666	4049	1514654	1,59	1,11
	D	58579	5139	4343	2598838	1,00	1,22

En la figura 4.1 se muestra la gráfica esfuerzo-deformación de barras No. 8, 10 y 12 sin soldadura obtenidas de ensayos a tensión en esta investigación.

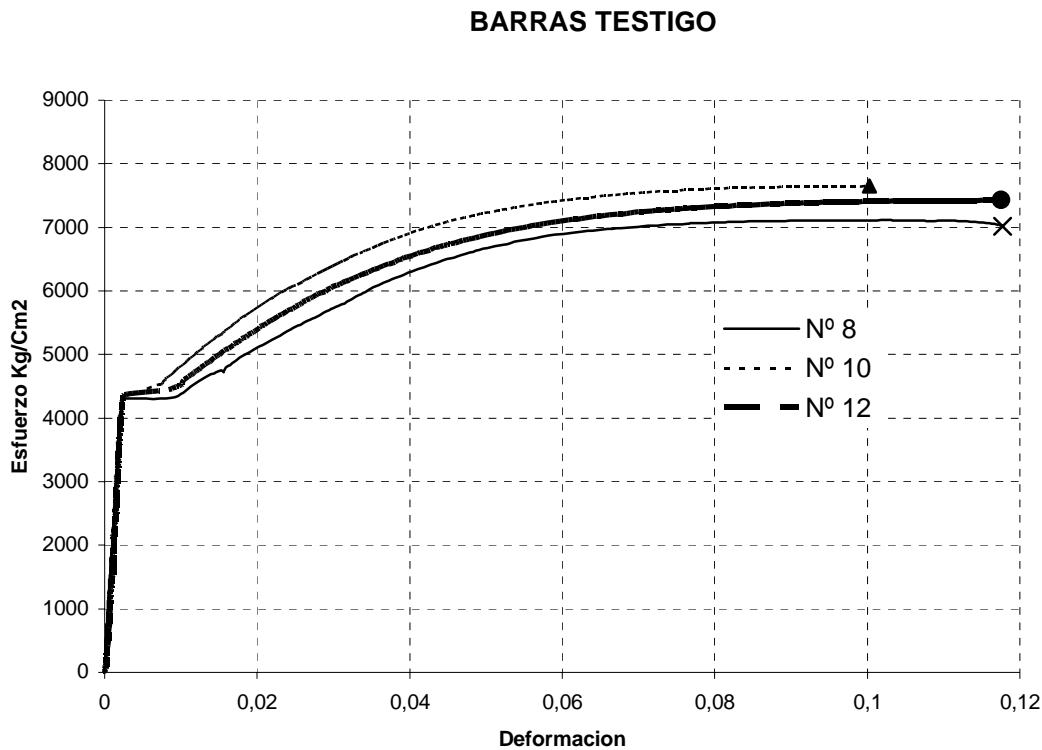


Fig. 4.1 Diagrama esfuerzo-deformación de barras No. 8, 10 y 12 sin soldadura

Para obtener la gráfica esfuerzo-deformación promedio de barras soldadas, se tomó como referencia los valores de los parámetros F_{su} y ϵ_{su} promedio de las tres barras respectivas, así como los valores de la gráfica esfuerzo-deformación más cercanos a los valores antes mencionados.

En las figuras 4.2 a 4.8 se muestran las gráficas esfuerzo-deformación promedio de las barras soldadas No. 8, considerando los casos I a VII antes mencionados. En las figuras 4.9 a 4.16, se muestran las gráficas esfuerzo-deformación promedio de las barras soldadas del No. 10, considerando los casos I a VII antes mencionados. En las figuras 4.17 a 4.24 se muestran las gráficas esfuerzo-deformación promedio de las barras soldadas del No. 12, considerando los casos I a VII antes mencionados. La leyenda "XT" y "T" en las siguientes gráficas significan, sin precalentamiento y con precalentamiento, respectivamente.

Gráficas esfuerzo-deformación promedio de barras soldadas No. 8.

CASO I EFECTO DE LA TEMPERATURA GRUPOS A y C
Barras No. 8, B1, E70

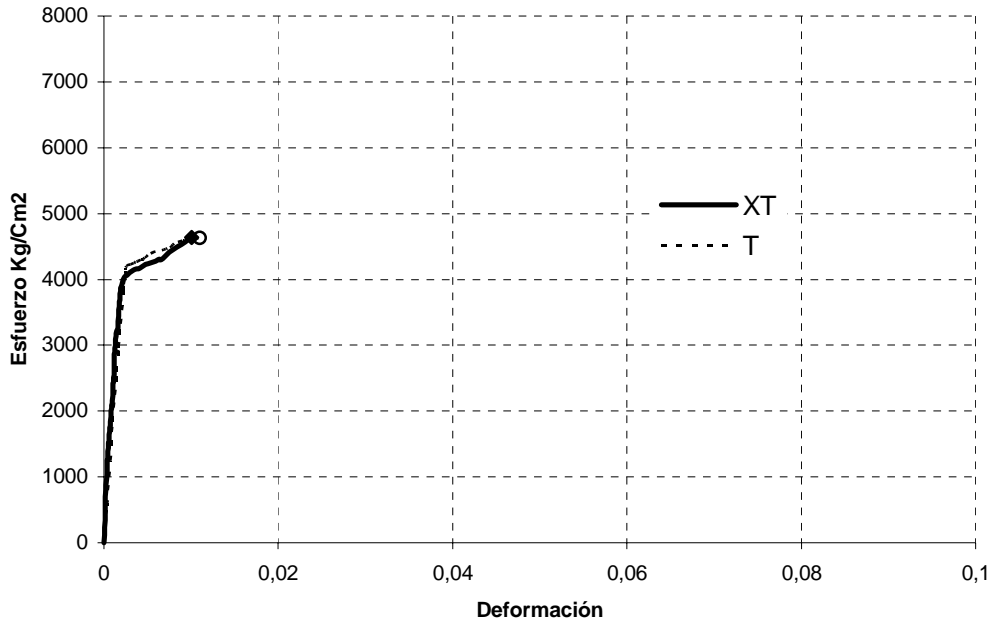


Fig. 4.2 Diagrama esfuerzo-deformación promedio de barras soldadas No. 8. Caso I

CASO II EFECTO DE LA TEMPERATURA GRUPOS B y D
Barras No. 8, B1, E90

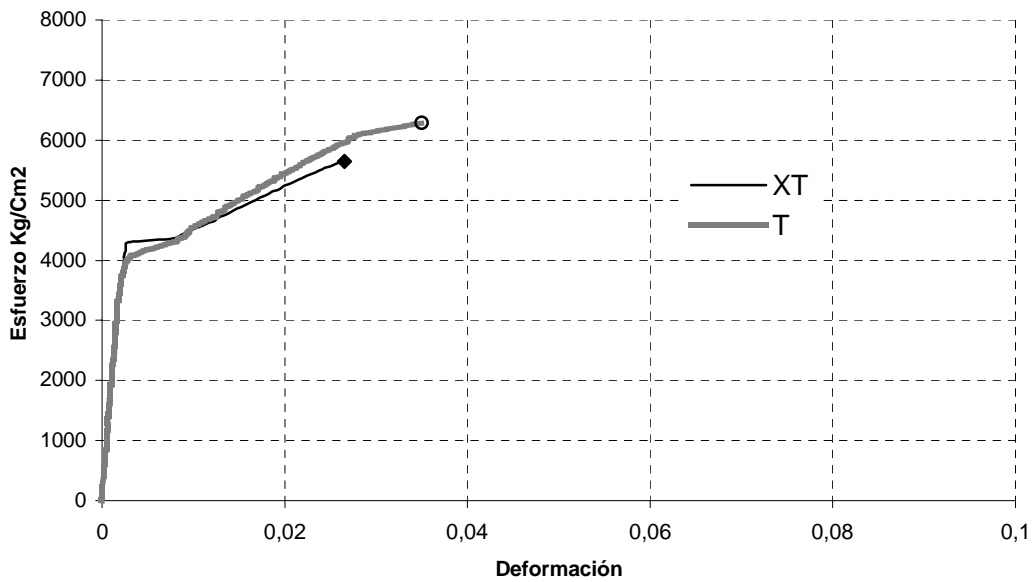


Fig. 4.3 Diagrama esfuerzo-deformación promedio de barras soldadas No. 8. Caso II

CASO III EFECTO DE LA TEMPERATURA GRUPOS E y F
Barras No. 8, B2, E90

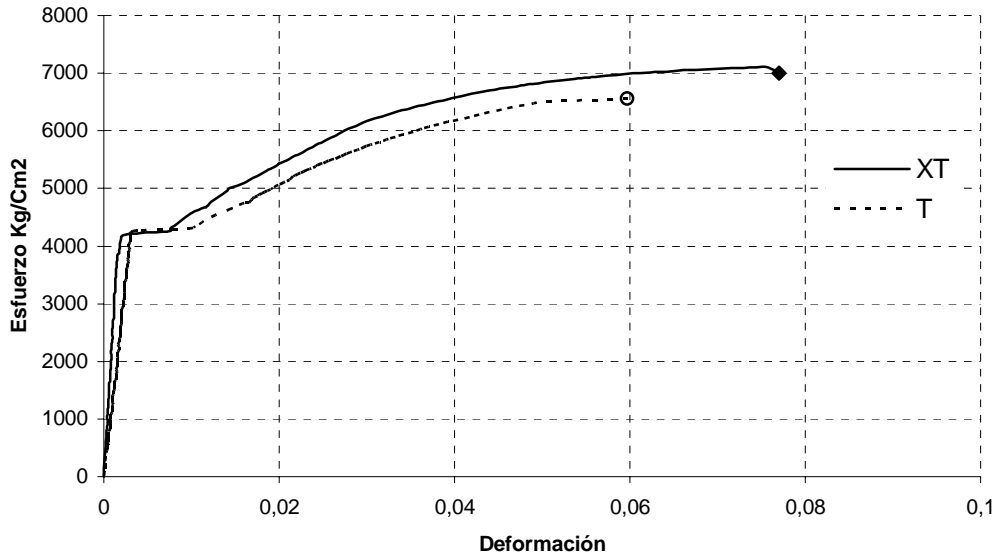


Fig. 4.4 Diagrama esfuerzo-deformación promedio de barras soldadas No. 8. Caso III

CASO IV EFECTO DEL BISEL GRUPOS B y E
Barras No. 8, XT, E90

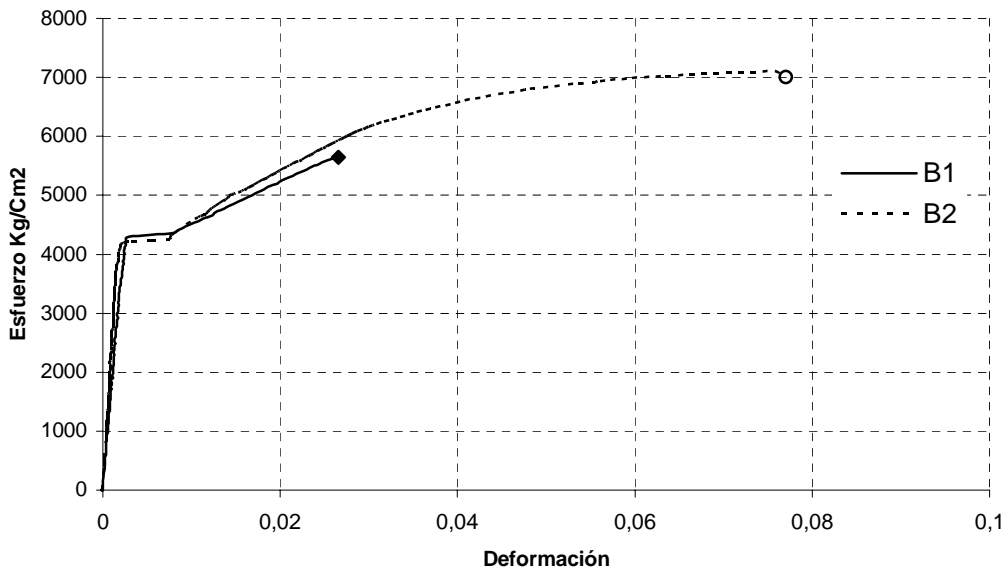


Fig. 4.5 Diagrama esfuerzo-deformación promedio de barras soldadas No. 8. Caso IV

CASO V EFECTO DEL BISEL GRUPOS D y F
Barras No. 8, T, E90

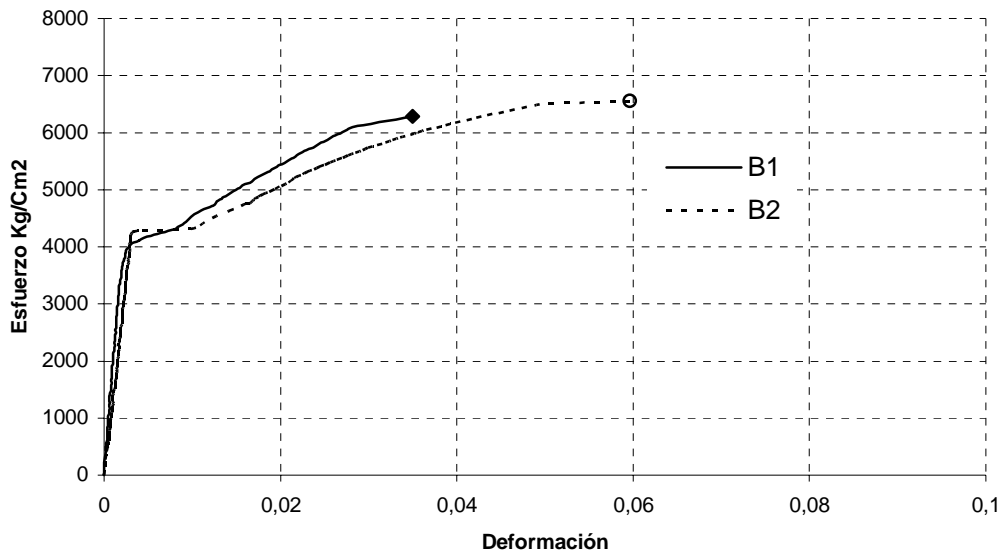


Fig. 4.6 Diagrama esfuerzo-deformación promedio de barras soldadas No. 8. Caso V

CASO VI EFECTO DEL ELECTRODO GRUPOS A y B
Barras No. 8, XT, B1

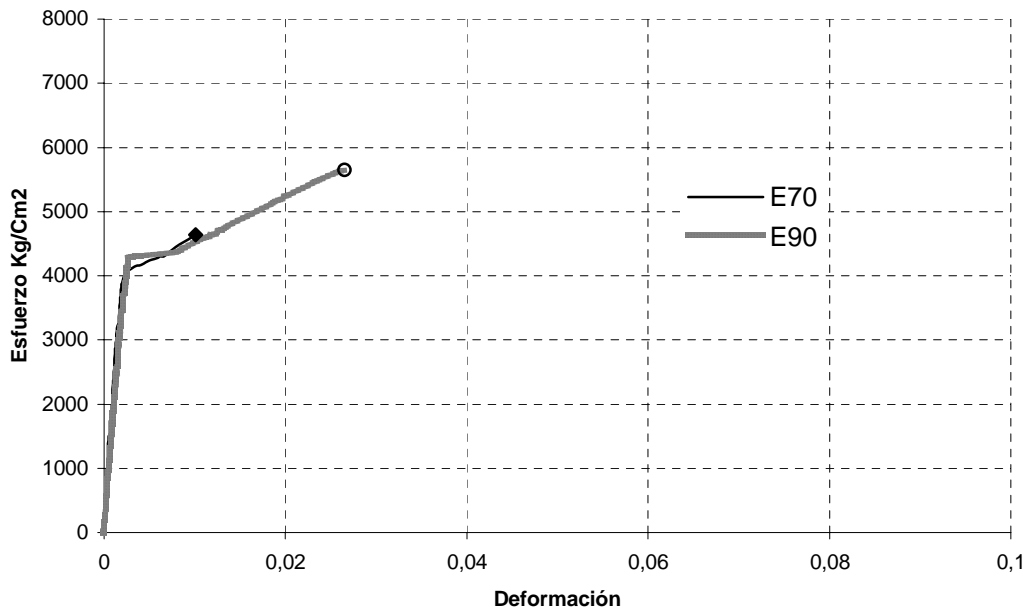


Fig. 4.7 Diagrama esfuerzo-deformación promedio de barras soldadas No. 8. Caso VI

CASO VII EFECTO DEL ELECTRODO GRUPOS C y D
Barras No. 8, T, B1

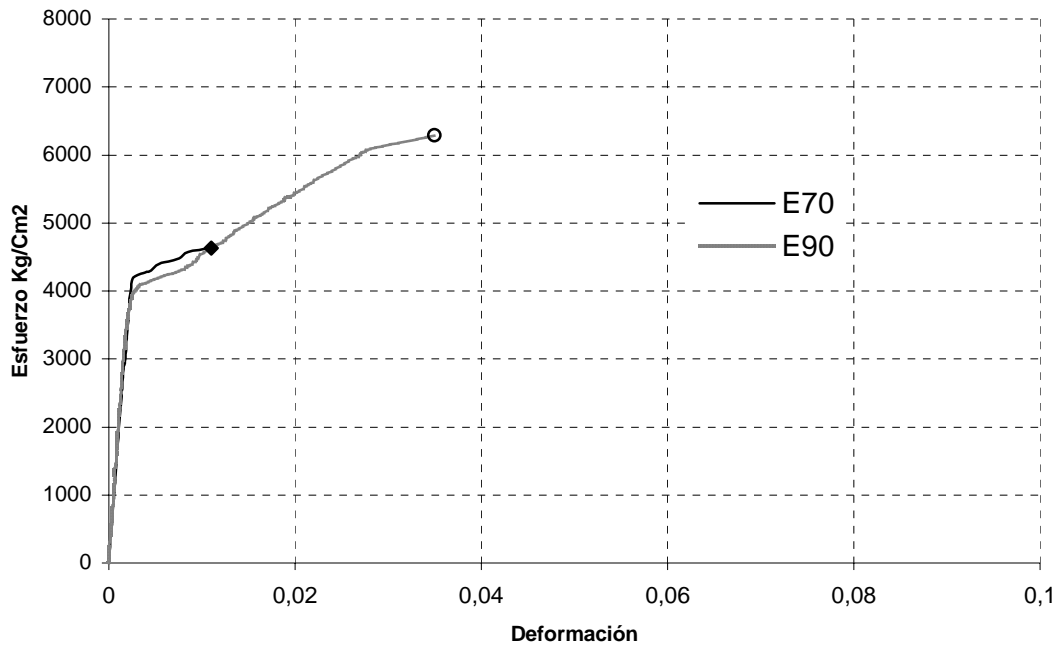


Fig. 4.8 Diagrama esfuerzo-deformación de barras soldadas No. 8. Caso VII

Gráficas esfuerzo-deformación promedio de barras soldadas No. 10.

CASO I EFECTO DE LA TEMPERATURA GRUPOS A y C
Barras No. 10, B1, E70

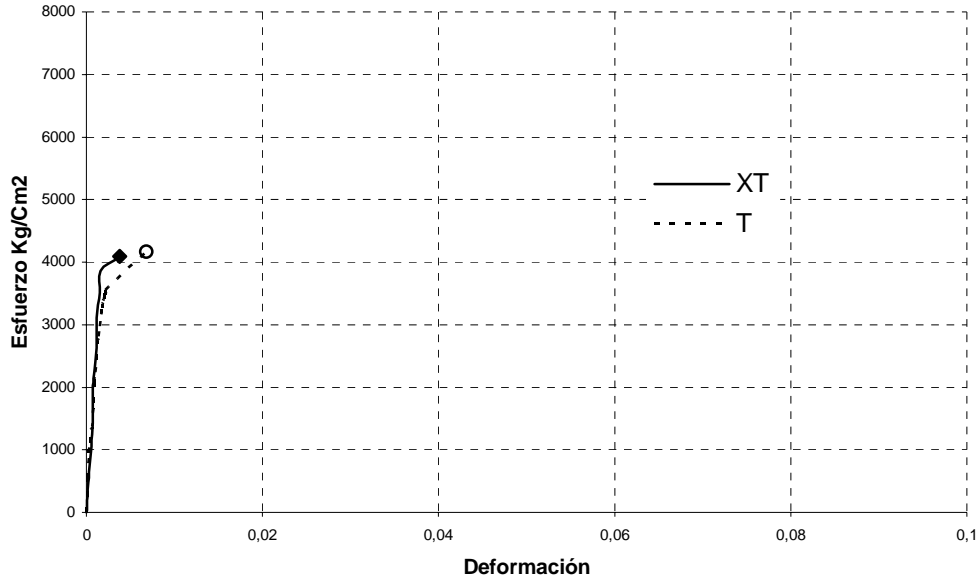


Fig. 4.9 Diagrama esfuerzo-deformación promedio de barras soldadas No. 10. Caso I

CASI II EFECTO DE LA TEMPERATURA GRUPOS B y D
Barras No. 10, B1, E90

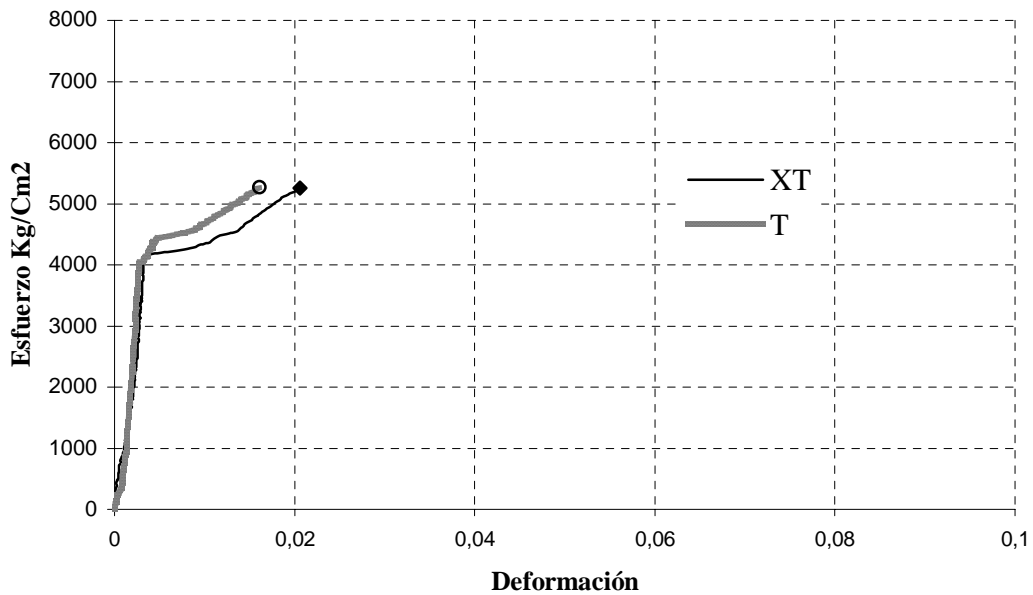


Fig. 4.10 Diagrama esfuerzo-deformación promedio de barras soldadas No. 10. Caso II

CASO III EFECTO DE LA TEMPERATURA GRUPOS E y F
Barras No. 10, B2, E90

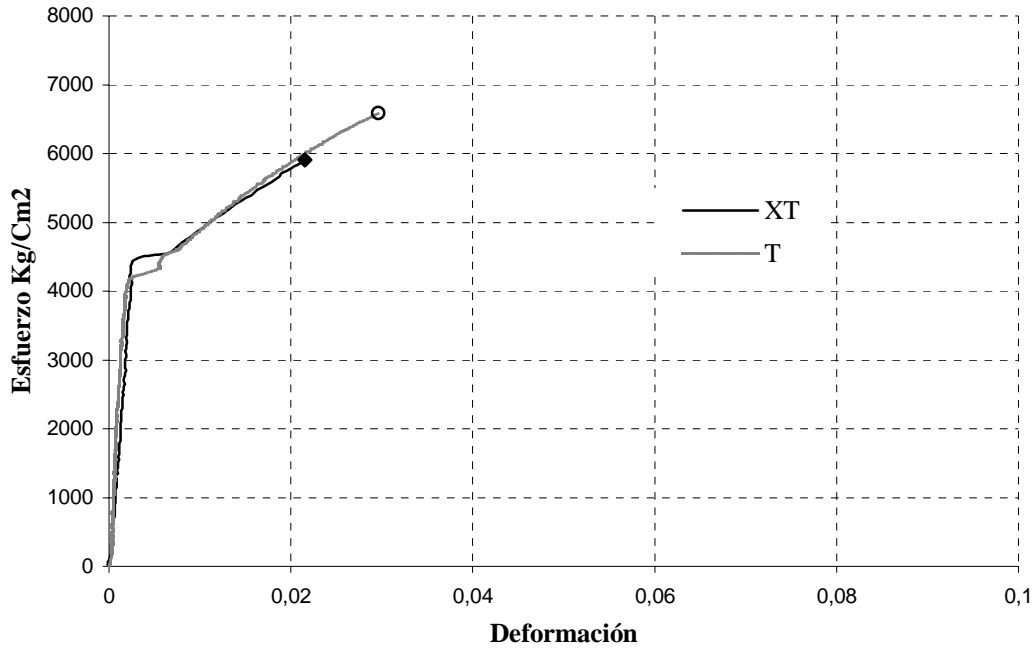


Fig. 4.11 Diagrama esfuerzo-deformación promedio de barras soldadas No. 10. Caso III

CASO IV EFECTO DEL BISEL GRUPOS B y E
Barras No. 10, XT, E90

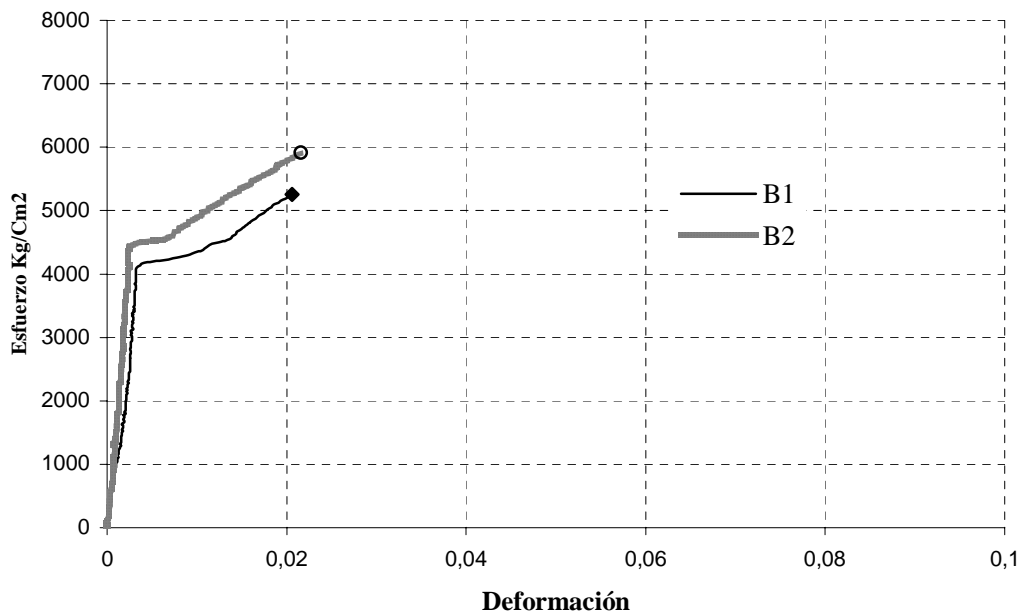


Fig. 4.12 Diagrama esfuerzo-deformación promedio de barras soldadas No. 10. Caso IV

CASO V EFECTO DE BISEL GRUPOS E y F
Barras No. 10, T, E90

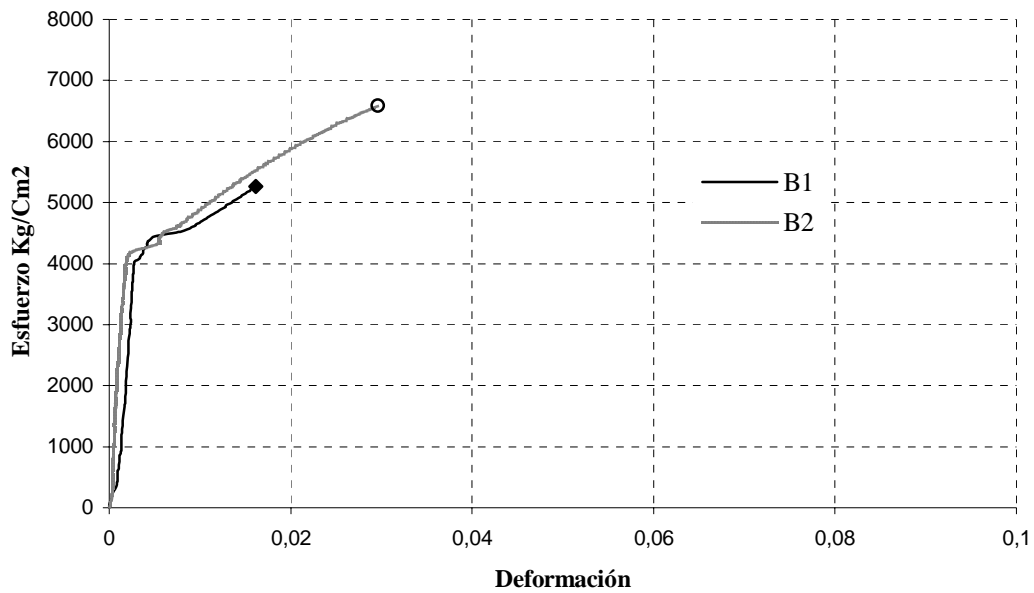


Fig. 4.13 Diagrama esfuerzo-deformación promedio de barras soldadas No. 10. Caso V

CASO VI EFECTO DEL ELECTRODO GRUPOS A y B
Barras No. 10, XT, B1

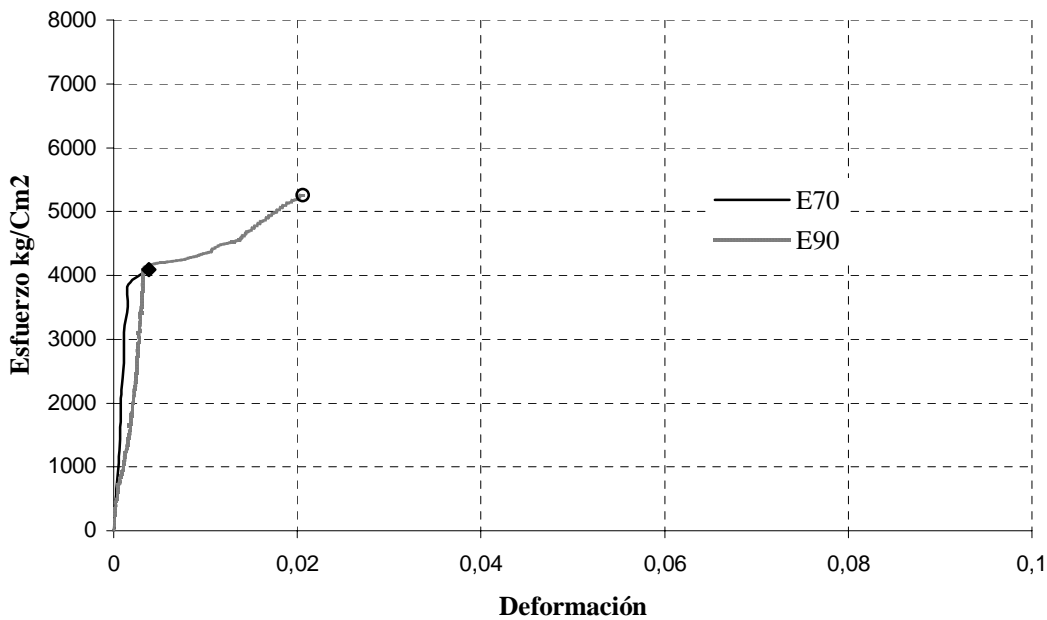


Fig. 4.14 Diagrama esfuerzo-deformación promedio de barras soldadas No. 10. Caso VI

CASO VII EFECTO DEL ELECTRODO GRUPOS C y D
Barras No. 10, T, B1

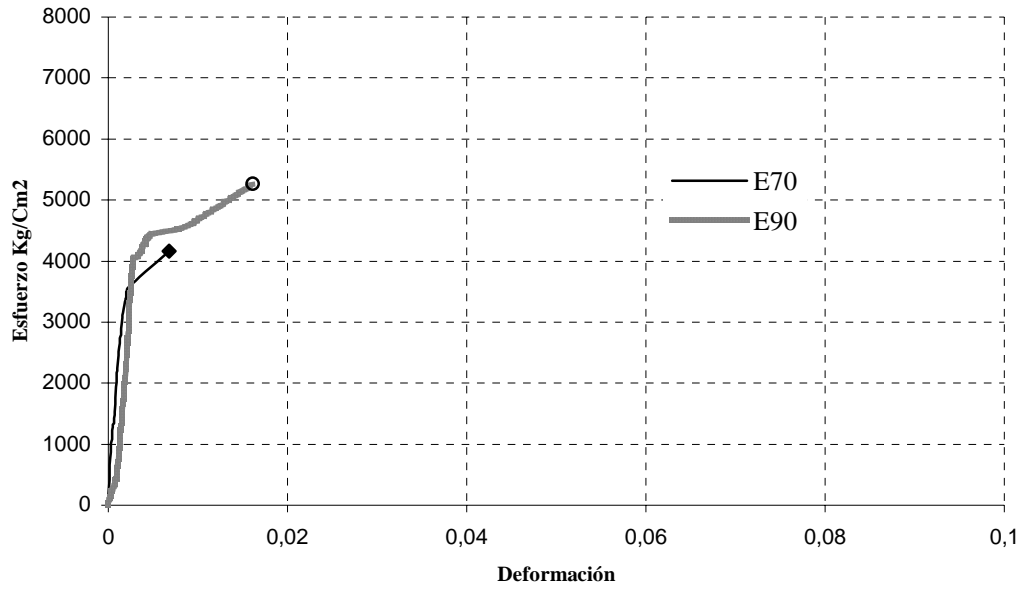


Fig. 4.15 Diagrama esfuerzo-deformación promedio de barras soldadas No. 10. Caso VII

Gráficas esfuerzo-deformación promedio de barras soldadas No. 12.

CASO I EFECTO DE LA TEMPERATURA GRUPOS A y C
Barras No. 12, B1, E70

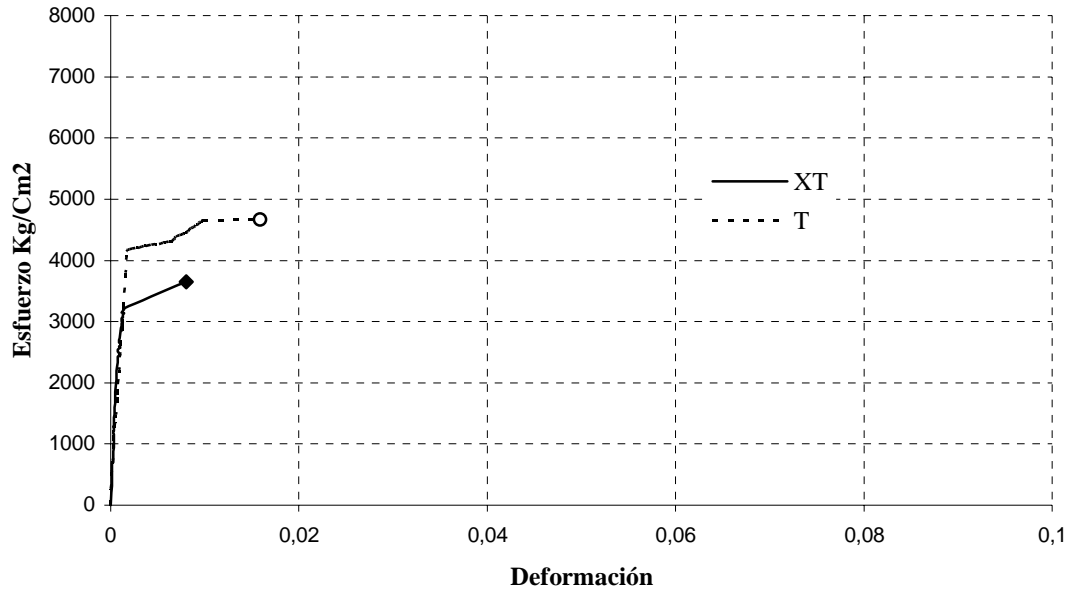


Fig. 4.16 Diagrama esfuerzo-deformación promedio de barras soldadas No. 12. Caso I

CASO II EFECTO DE LA TEMPERATURA GRUPOS B y D
Barras No. 12, B1, E90

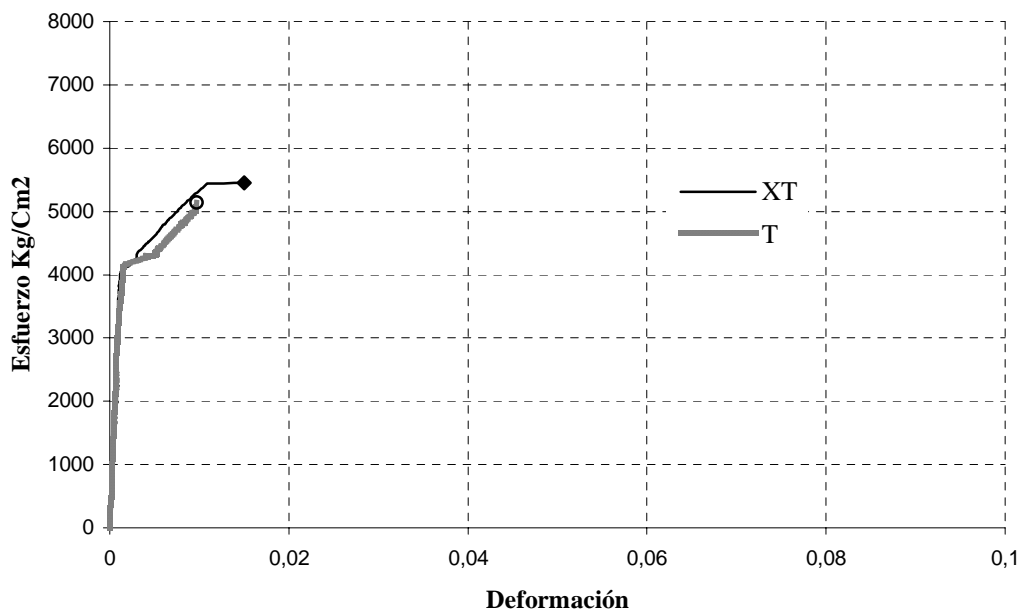


Fig. 4.17 Diagrama esfuerzo-deformación promedio de barras soldadas No. 12. Caso II

CASO III EFECTO DE LA TEMPERATURA GRUPOS E y F
Barras No. 12, B2, E90

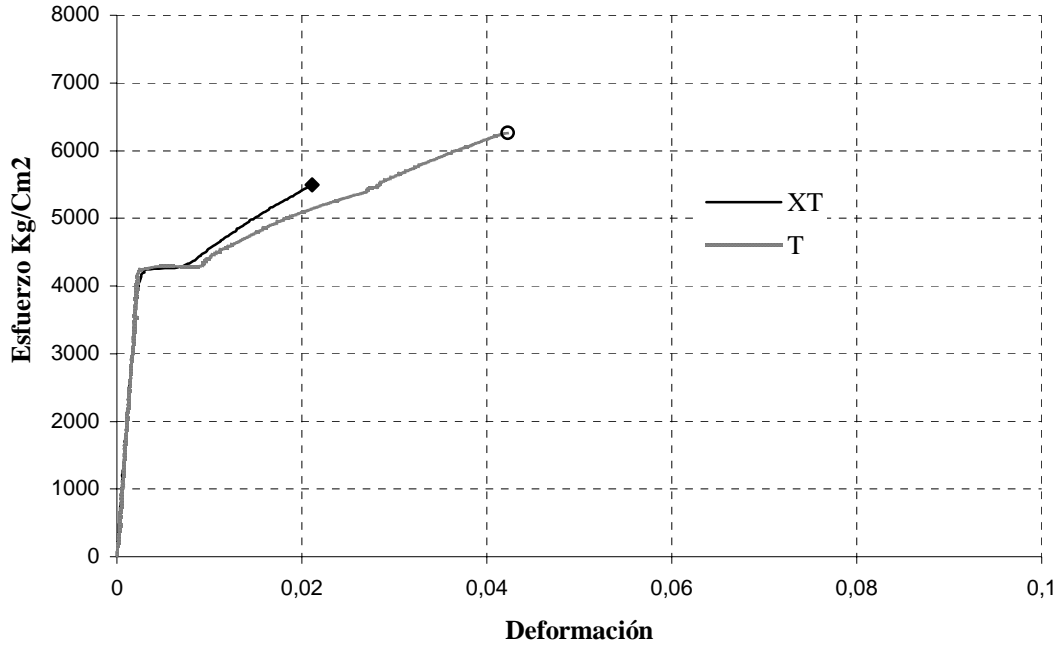


Fig. 4.18 Diagrama esfuerzo-deformación promedio de barras soldadas No. 12. Caso III

CASO IV EFECTO DEL BISEL GRUPOS B y E
Barras No. 12, XT, E90

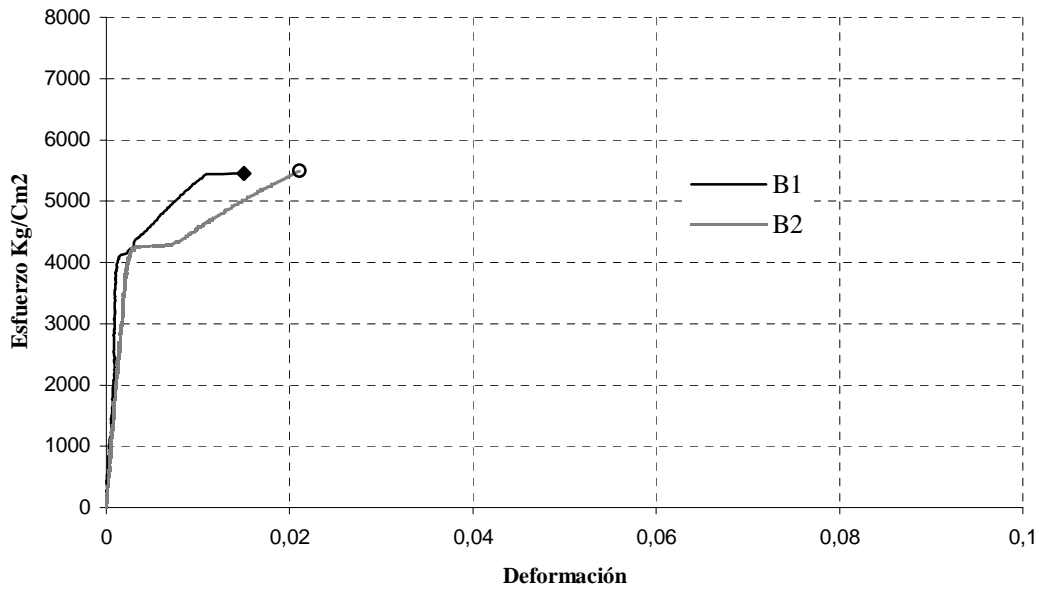


Fig. 4.19 Diagrama esfuerzo-deformación promedio de barras soldadas No. 12. Caso IV

CASO V EFECTO DEL BISEL GRUPOS D y F

Barras No. 12, T, E90

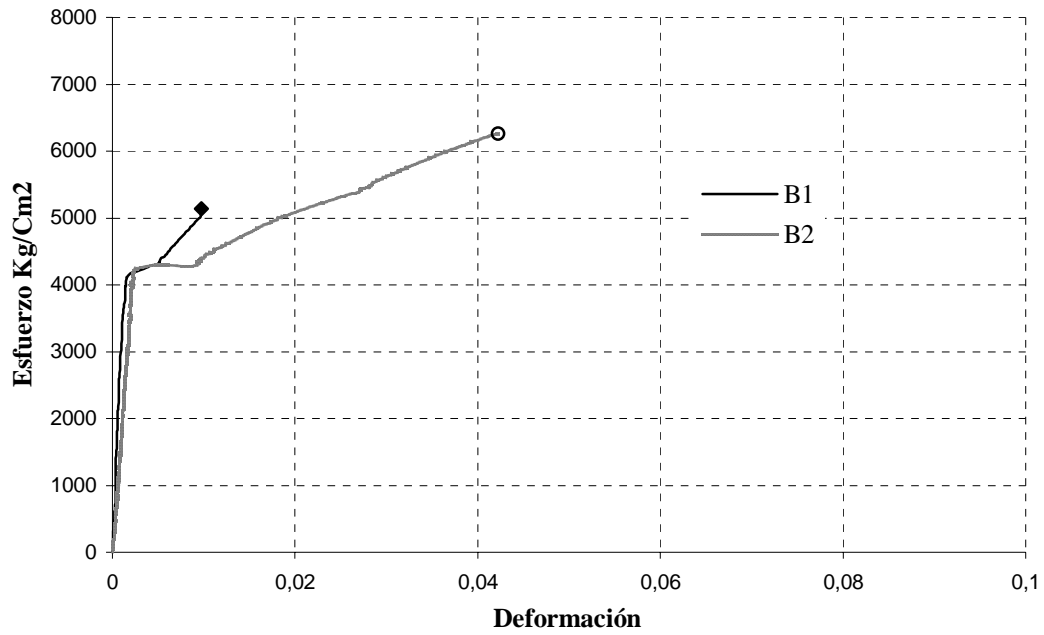


Fig. 4.20 Diagrama esfuerzo-deformación promedio de barras soldadas No. 12. Caso V

CASO VI EFECTO DEL ELECTRODO GRUPOS A y B

Barras No. 12, XT, B1

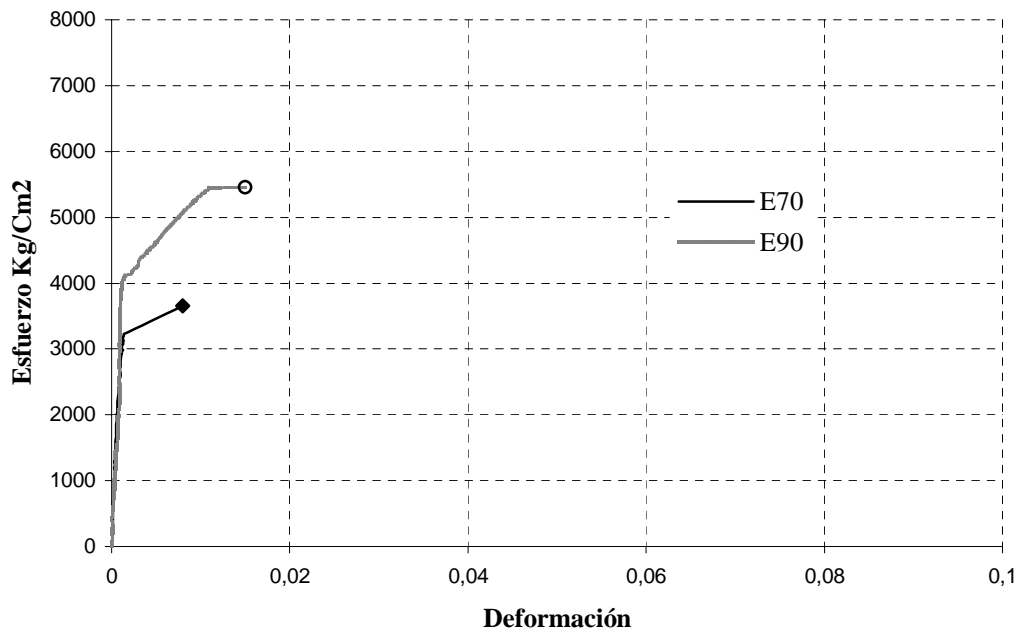


Fig. 4.21 Diagrama esfuerzo-deformación promedio de barras soldadas No. 12. Caso VI

CASO VII EFECTO DEL ELECTRODO GRUPOS C y D
Barras No. 12, T, B1

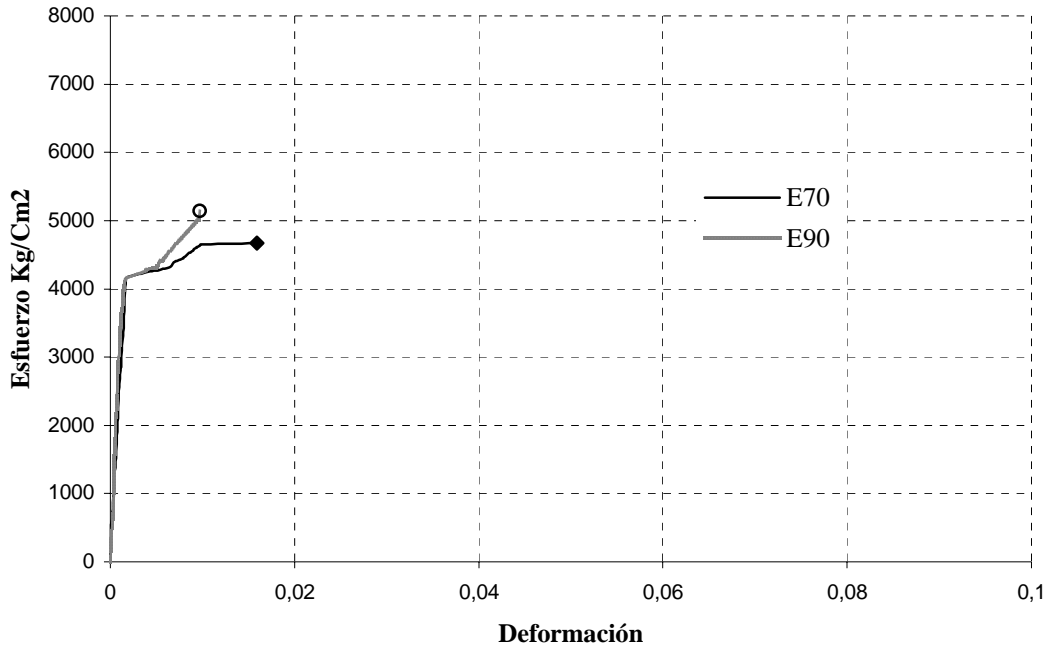


Fig. 4.22 Diagrama esfuerzo-deformación promedio de barras soldadas No. 12. Caso VII

En la figura 4.23 y 4.24, se muestra la metalografía de una barra sin soldadura y los defectos en la unión de una barra soldada, así como la “zona afectada por el calor”, respectivamente. Las muestras fueron pulidas y observadas en un microscopio óptico a cien aumentos. Las fotografías fueron tomadas con una cámara digital directamente del microscopio.

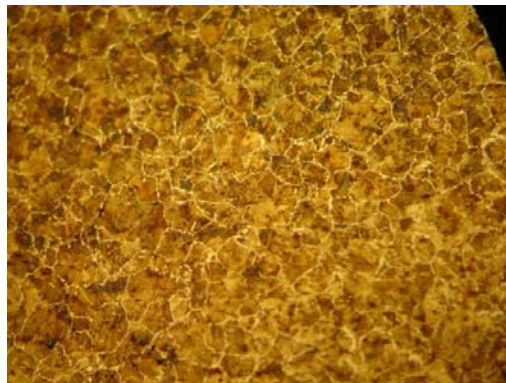


Fig. 4.23 Metalografía de una barra sin soldadura

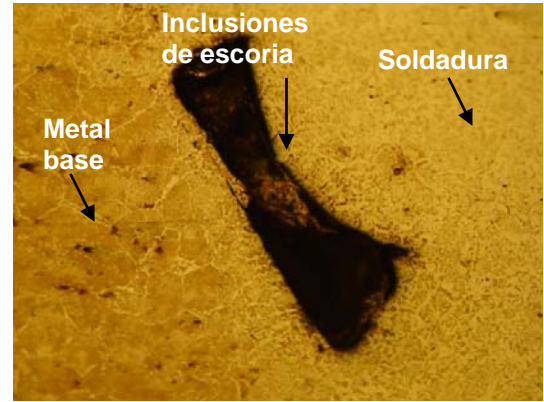
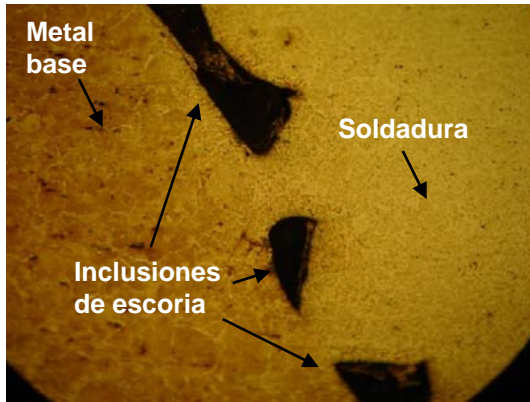
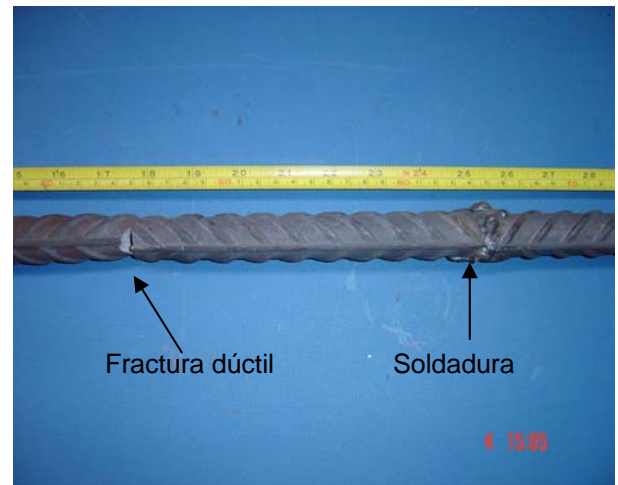


Fig. 4.24 Metalografía de una barra soldada que muestra los defectos en la unión y la “zona afectada por el calor” (ZAC)

En la figura 4.25 se muestra una barra soldada No. 10 con una fractura de tipo frágil en la zona afectada por el calor y una barra soldada No. 8 con una fractura de tipo dúctil fuera de la soldadura.



a) Fractura frágil en barra soldada N. 10



a) Fractura dúctil en barra soldada N. 8

Fig. 4.25 Barras soldadas con fractura frágil y dúctil

4.2 Análisis de resultados

En las figuras 5.1, 5.2 y 5.3 se muestran los efectos del precalentamiento del metal base, del tipo de bisel y del tipo de electrodo, respectivamente, en ϵ_{su} y F_{su}/F_y promedio de barras soldadas No. 8, 10 y 12. En la escala vertical se indica ϵ_{su} y F_{su}/F_y y en la escala horizontal se indican los casos considerados por cada variable. Para el efecto del precalentamiento se evalúan los casos del I al III, para el efecto del tipo de bisel los casos IV y V y para el efecto del tipo de electrodo los casos VI y VII sobre las barras soldadas No. 8, 10 y 12, respectivamente. La leyenda "XT" significa sin precalentamiento y "T" con precalentamiento, la leyenda B1 y B2 se refieren al tipo de bisel empleado, en posición vertical y horizontal, respectivamente, definidos en las figuras 3.2 y 3.3.

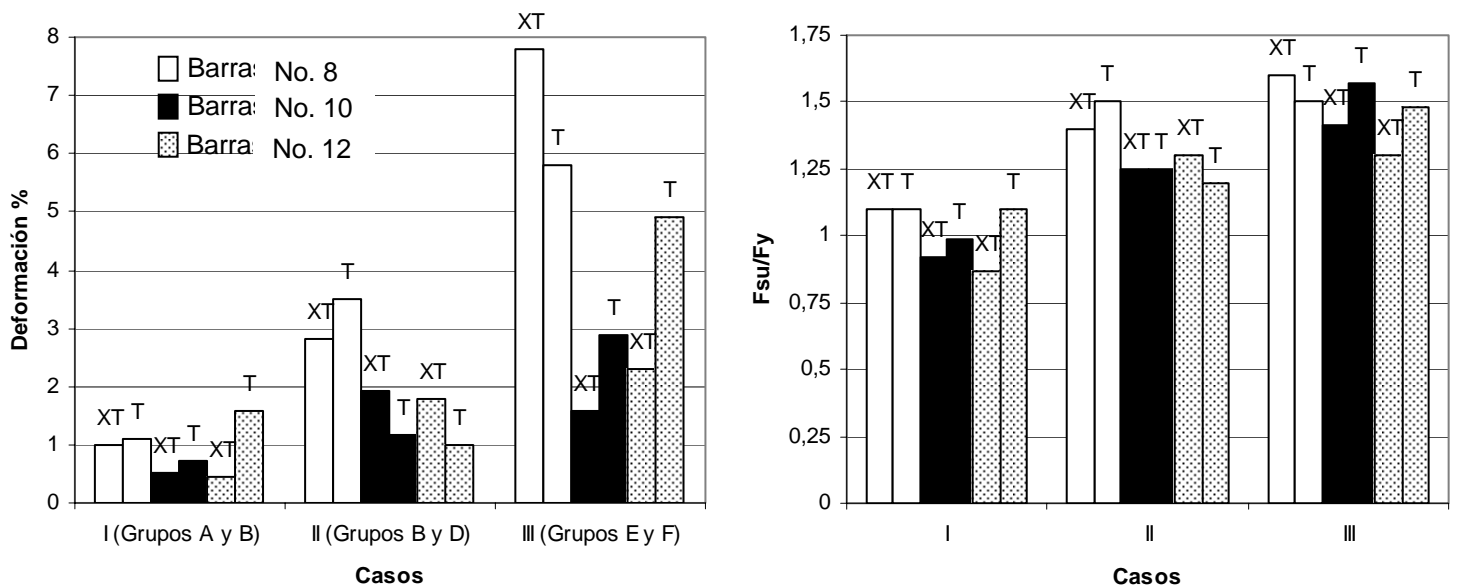


Fig.5.1 Efecto del precalentamiento del metal base en ϵ_{su} y F_{su}/F_y en barras soldadas. Nota: A y C (B1, E70), B y D (B1, E90), E y F (B2, E90)

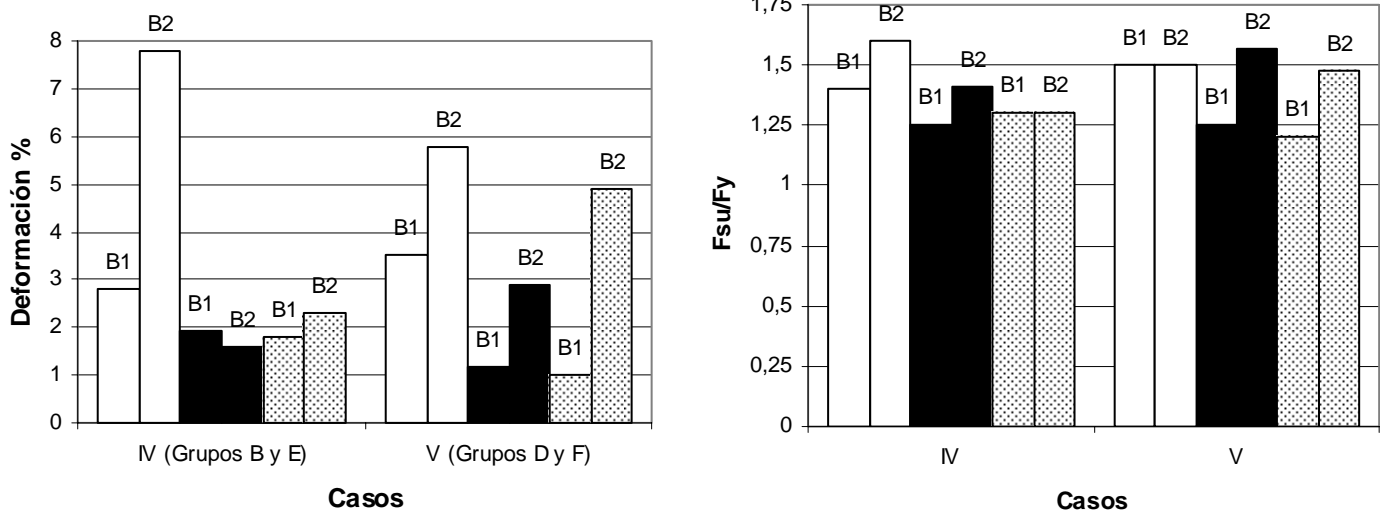


Fig. 5.2 Efecto del tipo de bisel en ϵ_{su} y F_{su}/F_y en barras soldadas. Nota: B y E (XT, E90), D y F (T, E90)

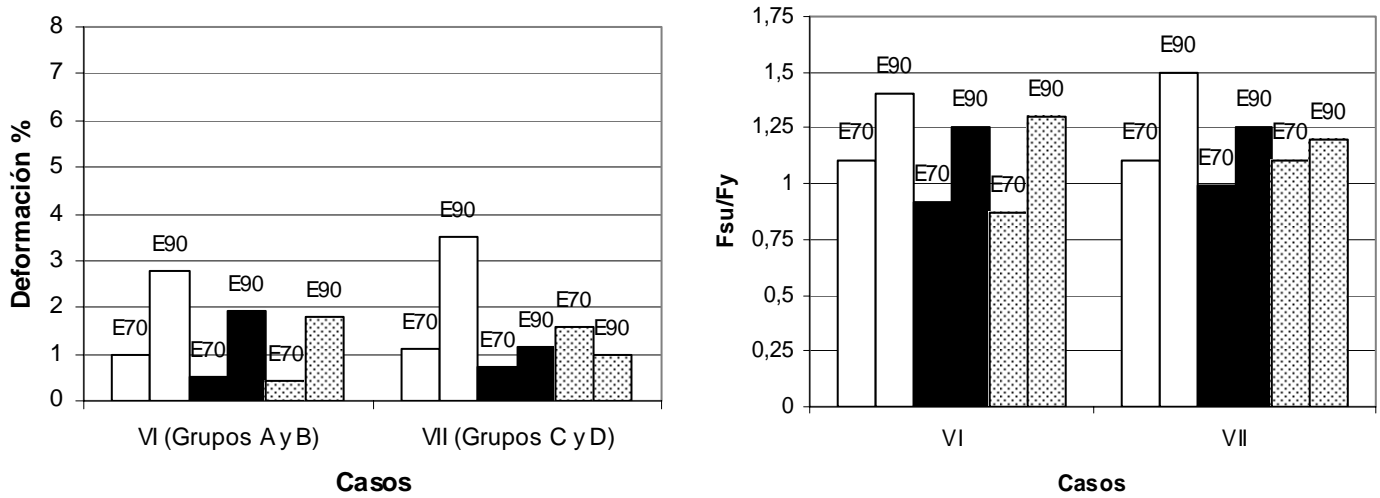


Fig. 5.3 Efecto del tipo de electrodo en ϵ_{su} y F_{su}/F_y en barras soldadas. Nota: A y B (XT, B1), C y D (T, B1)

De los resultados de la figura 5.1, se puede concluir lo siguiente:

- 1) En el caso I (B1, E70, sin y con precalentamiento), los valores de ϵ_{su} son inferiores al 2% y los valores de F_{su}/F_y son inferiores a 1.25 para todas las barras. Las barras fallaron en la soldadura. En el proceso de soldadura se observaron problemas como falta de fusión del electrodo, porosidad excesiva e inclusiones de escoria.
- 2) En el caso II (B1, E90, sin y con precalentamiento), el valor de ϵ_{su} para barras del No. 8 con precalentamiento alcanza 3.5% y 2.7% para barras sin precalentamiento. Las barras No. 8 con precalentamiento fallaron en la “zona afectada por el calor”. Las barras No. 10 y No. 12 con y sin precalentamiento fallaron en la soldadura. El valor de F_{su}/F_y es mayor que 1.25 para todas las barras, excepto para las barras No. 12 con precalentamiento, que fallaron en la soldadura.
- 3) En el caso III (B2, E90, sin y con precalentamiento), ϵ_{su} alcanzó valores de 7.79% para barras soldadas No. 8 sin precalentamiento, la falla fue de tipo dúctil en dos de las muestras, una de ellas en la “zona afectada por el calor”. Las barras con precalentamiento No. 8 fallaron en la soldadura, sin embargo ϵ_{su} alcanzó valores de 5.8%. El valor ϵ_{su} de las barras soldadas No. 10 sin precalentamiento llegó a 1.59% y a 2.9% con precalentamiento. Para barras soldadas No. 12 sin precalentamiento ϵ_{su} alcanzó valores de 2.3% y de 4.9% para barras con precalentamiento. Los valores de F_{su}/F_y son mayores que 1.25 para todas las barras.

De los resultados de la figura 5.2, se puede concluir lo siguiente:

- 1) En el caso IV (E90, sin precalentamiento, B1 y B2), el valor de ϵ_{su} es de 2.77% para barras No. 8 soldadas en posición vertical y de 7.79% para barras soldadas en posición horizontal. Para barras No. 10 soldadas en posición vertical ϵ_{su} alcanza valores de 1.93% y de 1.59 para barras soldadas en posición horizontal. Para barras No. 12 soldadas en posición

vertical ϵ_{su} alcanza valores de 1.8% y de 2.3% para barras soldadas en posición horizontal. Para todas las barras F_{su}/F_y cumple con el valor especificado de ser mayor que 1.25.

- 2) En el caso V (E90, con precalentamiento, B1 y B2), ϵ_{su} alcanza valores de 3.5% para barras No. 8 soldadas en posición vertical y 5.8% para barras soldadas en posición horizontal. Para barras No. 10 ϵ_{su} alcanza valores de 1.16% para barras soldadas en posición vertical y 2.9% para barras soldadas en posición horizontal. El valor de F_{su}/F_y alcanza valores 1.25, excepto para las barras No. 12 soldadas en posición vertical.

De los resultados de la figura 5.3 se puede concluir lo siguiente:

- 1) En el caso VI (B1, sin precalentamiento, E70 y E90), ϵ_{su} alcanza valores de 1% para barras No. 8 soldadas con electrodos E7018 y 2.77% para barras soldadas con electrodos E9018. En barras No. 10 ϵ_{su} alcanza valores de 0.5% para barras soldadas con electrodos E7018 y 1.9% para barras soldadas con electrodos E9018. Para barras soldadas No. 12 ϵ_{su} alcanza valores de 0.4% para barras soldadas con electrodos E7018 y 1.8% para barras soldadas con electrodos E9018. Los valores de F_{su}/F_y son menores a 1.25 para todas las barras soldadas con electrodos E7018, por el contrario, para barras soldadas con electrodos E9018 es mayor que 1.25.
- 2) En el caso VII (B1, con precalentamiento, E70 y E90), ϵ_{su} alcanza valores de 1.1% para barras No. 8 soldadas con electrodos E9018 y 3.5% para barras soldadas con electrodos E9018. Para barras No. 10 ϵ_{su} alcanza valores de 0.7% para barras soldadas con electrodos E7018 y 1.16% para barras soldadas con electrodos E9018. Para barras No. 12 ϵ_{su} alcanza valores de 1.59% para barras soldadas con electrodos E7018 y 1% para barras soldadas con electrodos E9018. El valor de F_{su}/F_y para todas las barras soldadas con electrodos E7018 es menor a 1.25, y para barras soldadas con electrodos E9018 es de 1.49% y 1.25% para barras No. 8 y

10, respectivamente. Para barras soldadas No. 12 con electrodos E9018 el valor de F_{su}/F_y es de 1.2%

5. CONCLUSIONES

De los resultados de ensayos a tensión de 54 barras No. 8, 10 y 12 soldadas a tope directo, considerando el efecto de tres variables importantes en el proceso de soldadura como el tipo de electrodo (E-7018 y E-9018), el tipo de bisel y la ejecución o no del precalentamiento, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- 1) En barras soldadas en posición vertical con electrodos E7018 los valores de la deformación última son inferiores a 2%. Los valores de F_{su}/F_y , son inferiores a 1.25 especificado por el Código ANSI/AWS D1.4. Se recomienda no usar este tipo de electrodos en la soldadura de barras de refuerzo.
- 2) El empleo del precalentamiento y electrodos E9018 en barras soldadas en posición vertical llevó a ligeras mejoras en la capacidad de deformación y la relación F_{su}/F_y respecto al caso anterior. Sin embargo, para barras No. 10 y No. 12 la capacidad de deformación no llegó al 2% y la relación F_{su}/F_y alcanzó los valores especificados de 1.25.
- 3) Los mejores resultados en la capacidad de deformación y de la relación F_{su}/F_y se obtuvieron al soldar las barras en posición horizontal con electrodos E9018. Para barras No. 10 y No. 12 con y sin precalentamiento la capacidad de deformación osciló entre los valores de 1.5% y 5%. La mayor capacidad de deformación en este caso se obtuvo en barras No. 8 con y sin precalentamiento, en las que los valores oscilaron entre 5% y 85%.
- 4) En todas las barras soldadas con electrodos E9018, excepto las barras No. 8 soldadas en posición horizontal, la falla ocurrió de modo frágil en la soldadura y en la "zona afectada por el calor". El precalentamiento de 150° C no es suficiente para evitar la falla de las barras soldadas en la "zona afectada por el calor".
- 5) Con base en los resultados de esta investigación aquí comentados, se recomienda no soldar barras de refuerzo mayores al No. 8. La soldadura de barras No. 8 o menores se debe llevar a cabo tomando en cuenta las recomendaciones de este estudio.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Aguilar S. Guillermo (2001) El hombre y los Materiales. La ciencia para todos. SEP FCE y CONACYT
2. American Society for Metals (ASM, 1990, 1992), ASM Handbook, Vol 1 y 6, 10ª Edition.
3. American Welding Society (AWS, 1998). "Structural Welding Code-Reinforcing Steel" (ANSI/AWS D1.4-98)
4. American Welding Society (AWS, 1968 y 1987), "Welding Handbook" 6ª y 8ª Edition.
5. Askeland Donald R. (2004) Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Internacional Thomson Editores, cuarta edición, 2004.
6. Avner Sydney A. (1979) Introducción a la Metalurgia Física, McGraw-Hill.
7. "Deformed and Plain Billet-Steel Bars for Concrete Reinforcement" (ASTM A615/A 615M-92b), American Society for Testing and Materials, 1992.
8. Deutschman D. Aaron (1999) Diseño de Máquinas. Teoría y Práctica CECSA.
9. Grinberg M. (1989) Tratamientos Térmicos de Aceros. LIMUSA.
10. "Low-Alloy Steel Deformed Bars for Concrete Reinforcement" (ASTM A706/A 706M-92b), American Society for Testing and Materials, 1992.

11. “Procedimiento de Soldadura Estructural Acero de Refuerzo” Norma Mexicana NMX-H-121-1988, Dirección General de Normas, Secretaría de Comercio y Fomento Industrial.

12. “Varilla Corrugada de Acero Proveniente de Lingote y Palanquilla para Refuerzo de Concreto” Norma Mexicana NMX-C-407-ONNCCE-2001, Dirección General de Normas, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C. 2001.