



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**ANÁLISIS Y RECOMENDACIONES PRÁCTICAS DE LA SOLDADURA EN
UNIONES A TOPE DEL ACERO CORRUGADO No. 8, GRADO 60, NORMA
ASTM A615, DISPONIBLE EN EL MERCADO GUATEMALTECO**

Gerardo José Lobos Guerra

Asesorado por el Ing. Pablo Christian de León Rodríguez

Guatemala, octubre de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS Y RECOMENDACIONES PRÁCTICAS DE LA SOLDADURA EN
UNIONES A TOPE DEL ACERO CORRUGADO No. 8, GRADO 60, NORMA
ASTM A615, DISPONIBLE EN EL MERCADO GUATEMALTECO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

GERARDO JOSÉ LOBOS GUERRA

ASESORADO POR EL ING. PABLO CHRISTIAN DE LEÓN RODRÍGUEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Carlos Salvador Gordillo García
EXAMINADOR	Ing. Alan Giovani Cosillo Pinto
EXAMINADOR	Ing. José Gabriel Ordoñez Morales
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**ANÁLISIS Y RECOMENDACIONES PRÁCTICAS DE LA SOLDADURA EN
UNIONES A TOPE DEL ACERO CORRUGADO NO. 8, GRADO 60, NORMA
ASTM A615, DISPONIBLE EN EL MERCADO GUATEMALTECO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil,
con fecha abril de 2012.



Gerardo José Lobos Guerra

Guatemala, 17 de julio del 2013

Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero
Coordinador del área de materiales y construcciones civiles
Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería, USAC

Ingeniero:

Atentamente me dirijo a usted para presentarle el trabajo de graduación titulado **“ANÁLISIS Y RECOMENDACIONES PRÁCTICAS DE LA SOLDADURA EN UNIONES A TOPE DEL ACERO CORRUGADO No. 8 GRADO 60 NORMA ASTM A615 DISPONIBLE EN EL MERCADO GUATEMALTECO”**, realizado por el estudiante de ingeniería civil, Gerardo José Lobos Guerra, quien se identifica carné número 2004-13211.

A mi juicio, después de mi asesoría y revisión, dicho trabajo cumple con los objetivos planteados, siendo un trabajo de interés y utilidad. Por tanto el autor, y mi persona, como su asesor, nos hacemos responsables por el contenido del mismo y me permito someterlo a su consideración y aprobación.

Sin otro particular me suscribo de usted.

Atentamente,

Ing. Pablo Christian de León Rodríguez, c/león

Asesor.





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
www.ingenieria-usac.edu.gt



Guatemala,
21 de agosto de 2013

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **ANÁLISIS Y RECOMENDACIONES PRÁCTICAS DE LA SOLDADURA EN UNIONES A TOPE DEL ACERO CORRUGADO No. 8 GRADO 60 NORMA ASTM A615 DISPONIBLE EN EL MERCADO GUATEMALTECO**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Gerardo José Lobos Guerra, quien contó con la asesoría del Ing. Pablo Christian de León Rodríguez.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

~~Ing. Civil Guillermo Francisco Melini Salguero~~
Coordinador del Área de Materiales y
Construcciones Civiles



FACULTAD DE INGENIERIA
AREA DE MATERIALES Y
CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC

/bbdeb.



USAC
TRICENTENARIA
 Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
 FACULTAD DE INGENIERÍA
 Escuela de Ingeniería Civil



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Pablo Christian de León Rodríguez y del Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles, Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero, al trabajo de graduación del estudiante Gerardo José Lobos Guerra, titulado **ANÁLISIS Y RECOMENDACIONES PRÁCTICAS DE LA SOLDADURA EN UNIONES A TOPE DEL ACERO CORRUGADO No. 8 GRADO 60 NORMA ASTM A615 DISPONIBLE EN EL MERCADO GUATEMALTECO**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

Hugo Leonel Montenegro Franco
 Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, septiembre de 2013.

/bbdeb.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **ANÁLISIS Y RECOMENDACIONES PRÁCTICAS DE LA SOLDADURA EN UNIONES A TOPE DEL ACERO CORRUGADO No. 8, GRADO 60, NORMA ASTM A615, DISPONIBLE EN EL MERCADO GUATEMALTECO**, presentado por el estudiante universitario: **Gerardo José Lobos Guerra**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRIMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, octubre de 2013

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por cada oportunidad que he tenido.
Mis padres	Por ser el cimiento de lo que soy y por siempre darme más de lo necesario.
Mis hermanos	Por ser apoyo incondicional a lo largo de mi vida.
Mis amigos	Por cada buen momento y cada aporte en mi carrera.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser fuente de altruismo y conciencia.
Facultad de Ingeniería	Por ser plataforma de superación personal.
Aceros Nabla	Por las oportunidades y el apoyo prestado.
Ing. Pablo de León	Por la orientación, sus aportes y su tiempo.
Ing. Erick Quan Luna	Por su colaboración, experiencia y apoyo.
Inga. Ileana Álvarez	Por su apoyo y aporte.
Ing. Joselino Chang	Por su apoyo y aporte.
Noel García	Por el apoyo prestado.
Raymundo Ortiz	Por su tiempo y colaboración.
Brígido López	Por su ayuda y su tiempo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. ANTECEDENTES	1
2. JUSTIFICACIÓN	3
3. FUNDAMENTOS BÁSICOS DEL ACERO	5
3.1. Acero	5
3.1.1. Contenido de carbono	6
3.1.2. Resistencia	7
3.1.3. Fragilidad	8
3.1.4. Estructuras cristalinas.....	9
3.1.5. Diagrama hierro - carbono.....	13
3.1.5.1. Microconstituyentes	14
3.1.6. Clasificación de los aceros y su estructura cristalina	15
3.1.7. Templabilidad	16
3.1.8. Soldabilidad	17
3.1.8.1. Carbono equivalente.....	17
3.2. Acero de refuerzo norma ASTM A615.....	19

3.3.	Acero de refuerzo norma ASTM A706 (no se fabrica actualmente en Guatemala).....	20
4.	SOLDADURA.....	23
4.1.	Soldadura por arco eléctrico (SMAW).....	23
4.1.1.	Clasificación básica de los electrodos.....	25
4.2.	Consideraciones de seguridad industrial.....	28
4.2.1.	Manejo y transporte del equipo.....	28
4.2.2.	Conexión segura del equipo de soldar.....	28
4.2.3.	Protección personal.....	30
4.3.	Zona afectada por el calor (ZAC).....	32
4.4.	Fisuración.....	33
4.4.1.	Fisuración en caliente.....	33
4.4.2.	Fisuración en frío.....	35
4.4.2.1.	Fragilización por endurecimiento de la ZAC.....	36
4.4.2.2.	Fragilización por hidrógeno.....	38
4.5.	Diagrama de Graville.....	40
4.6.	Pre calentamiento.....	41
4.6.1.	Nomograma de Coe.....	42
4.7.	Electrodos de bajo hidrógeno.....	48
4.8.	Electrodo, E-7018 Norma AWS A5.1, E-7018-X, E-8018-X y E-9018-X, norma AWS A.5.5.....	50
4.9.	Biseles.....	53
4.10.	Requerimientos ACI para uniones soldadas.....	54
5.	PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA.....	55
5.1.	Equipo a utilizar.....	55
5.2.	Composición química de las barras corrugadas.....	58

5.3.	Composición química de los electrodos a utilizar de acuerdo a la norma ANSI-AWS A5.5.....	58
5.4.	Determinación del carbono equivalente y soldabilidad.....	59
5.5.	Determinación de la temperatura de precalentamiento	62
5.6.	Elaboración del bisel	65
5.7.	Precalentamiento con antorcha.....	66
5.8.	Control de temperatura.....	67
5.9.	Aplicación de soldadura.....	68
6.	ENSAYO A TENSIÓN DE BARRAS SOLDADAS	73
6.1.	Ensayos de tracción en máquina universal	73
6.2.	Resultados de los ensayos realizados	80
6.3.	Análisis y comparación de resultados entre distintas probetas.....	85
6.3.1.	Resistencias nominales de barras sin soldadura....	86
6.3.2.	Probetas soldadas con electrodo E-7018	86
6.3.3.	Probetas soldadas con electrodo E-9018	88
6.3.4.	Precalentamiento.....	88
6.3.5.	Secado del electrodo	89
6.4.	Análisis y comparación de resultados con los requisitos del ACI	90
6.4.1.	Solicitudes generales de AWS. D 1.4.....	91
6.5.	Ensayos de doblado realizados a las probetas	92
6.6.	Parámetros que se deben tomar en cuenta en la supervisión de soldadura, por parte de un ingeniero civil	94
	CONCLUSIONES	99
	RECOMENDACIONES.....	103
	BIBLIOGRAFÍA.....	105

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Influencia del carbono en el acero	6
2.	Estructuras cristalinas	10
3.	Ordenamiento de celdas	11
4.	Diagrama hierro - carbono	13
5.	Proceso de soldadura manual con electrodo revestido.....	24
6.	Clasificación de electrodos.....	26
7.	Clasificación electrodos.....	32
8.	Fisuración en caliente	35
9.	Fisuración en frío	39
10.	Diagrama de Graville.....	41
11.	Hidrógeno ml/100g de material depositado.....	44
12.	Espesores combinados.....	45
13.	Nomograma de Coe.....	47
14.	Biseles permitidos en unión de barras a tope	53
15.	Máquina de soldar 220-440 V	55
16.	Pulidora y disco de corte	55
17.	Equipo de oxicorte, tanques de oxígeno y acetileno	56
18.	Pirómetro digital	56
19.	Cepillo de alambre	57
20.	Horno eléctrico de resistencias	57
21.	Utilización del diagrama de Graville para la aleación específica.....	61
22.	Evaluación en nomograma de Coe	64
23.	Elaboración del bisel con pulidora.....	65

24.	Bisel en X realizado a la barra A.....	65
25.	Bisel en X realizado a la barra B.....	66
26.	Pre calentamiento con antorcha	66
27.	Temperatura de pre calentamiento	67
28.	Temperatura entre pasadas.....	68
29.	Banco de trabajo.....	68
30.	Barras en banco.....	69
31.	Soldadura de las barras.....	69
32.	Limpieza de escoria y porosidades entre pasadas	70
33.	Barras en proceso de soldadura	70
34.	Barras soldada.....	71
35.	Probetas identificadas.....	74
36.	Máquina universal A	74
37.	Máquina universal B	78
38.	Momento de ruptura en una de las probetas	79
39.	Probeta rota	79
40.	Probetas ensayadas	80
41.	Doblado barra soldada con E-7018	92
42.	Doblado de barras soldadas con E-9018.....	93

TABLAS

I.	Principales aleaciones en barras de refuerzo	8
II.	Tipos de revestimiento.....	27
III.	Criterios para evaluar el riesgo de fisuración en frío por endurecimiento de la ZAC	37
IV.	Pre calentamiento recomendado por AWS D1.4	48
V.	Electrodos recomendados por AWS D1.4 según el grado del acero a soldar	52

VI.	Composición química de barras corrugadas No. 8 A-615 grado 60.....	58
VII.	Composición química electrodo E-7018.....	58
VIII.	Composición química electrodo E-9018B3	59
IX.	Criterios de riesgo de fisuración en frío.....	62
X.	Probetas ensayadas.....	73
XI.	Propiedades físicas de probetas ensayadas	75
XII.	Resultados de las probetas ensayadas.....	81
XIII.	Porcentaje de fracturas en soldaduras.....	84
XIV.	Resistencia última (f'u) promedio por lote	84
XV.	Resistencia última (f'u) promedio de total de probetas soldadas	85
XVI.	Solicitudes del ACI para las barras A-615 simples y sus uniones soldadas en zonas sísmicas	90

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
S	Azufre
CE	Carbono equivalente
cm	Centímetro
CO₂	Dióxido de carbono
P	Fósforo
°C	Grados Celsius
kg	Kilogramo
kj	Kilojoule
psi	Libras / pulgada cuadrada
Mpa	Megapascales
%C	Porcentaje de carbono
%Mn	Porcentaje de manganeso
f'y	Punto de fluencia
fu	Resistencia última
seg	Segundos
Si	Silicio
ZAC	Zona afectada por el calor

GLOSARIO

ACI	Instituto Americano de Concreto (American Concrete Institute)
Aleado (de aleación)	Mezcla homogénea, de propiedades metálicas, que está compuesta de dos o más elementos, de los cuales, al menos uno es un metal.
ANSI	Instituto Nacional Americano de Estandarización (American National Standard Institute).
ASTM	Sociedad Americana de Ensayo de Materiales (American Society of Testing Materials).
Austenítico	De austenita, es una forma de ordenamiento del acero. Esta es la forma estable del hierro puro a temperaturas que oscilan entre los 723 a 1400 °C.
AWS	Sociedad Americana de soldadura (American Welding Society).
Difusible	Que puede difundirse; que se difunde con facilidad.
DIN	Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemán de Normalización).

Ductilidad	Es una propiedad que presentan algunos materiales, como las aleaciones metálicas que les permite, bajo la acción de una fuerza, deformarse sosteniblemente sin romperse.
Dureza	Es la oposición que ofrecen los materiales a la penetración, la abrasión, el rayado y la cortadura.
Estructura cristalina	Es una forma sólida, en la que los constituyentes, átomos, moléculas, o iones están empaquetados de manera ordenada y con patrones de repetición que se extienden en las tres dimensiones del espacio.
Fragilidad	Característica del acero, relacionada con su dureza y que se define como la capacidad de un material de fracturarse con escasa deformación.
Punto eutectoide	Punto en el diagrama hierro – carbono, donde la temperatura de transformación del microconstituyente del acero austenita es mínima y esta se transforma en su totalidad en el microconstituyente perlita.
Revenido	Tratamiento térmico aplicado después de un temple para eliminar la excesiva dureza del material.
Soldabilidad	Medida de la capacidad de un metal para ser soldado con éxito.

Templable	Capacidad de admitir temple o crear estructuras frágiles.
Tenacidad	Capacidad de un material de absorber energía antes de alcanzar la rotura.
ZAC	Zona afectada por el calor debido a la soldadura.

RESUMEN

En este trabajo se realiza un análisis técnico de la viabilidad de realizar uniones por soldadura a tope en barras corrugadas No. 8, norma ASTM A615 grado 60; dicho análisis se hace mediante herramientas técnicas y criterios metalúrgicos, los cuales son explicados de manera sencilla, partiendo de los fundamentos básicos del acero y sus características materiales, hasta llegar al cálculo de los parámetros de soldadura bajo los cuales se realizaron distintas probetas que posteriormente fueron ensayadas.

También se definen los requerimientos mecánicos básicos que deberá presentar este tipo de soldadura y en que se basan estos requerimientos.

Se buscó definir los aspectos más importantes de la metalurgia de la soldadura de una manera sencilla, sin requerir una formación previa en esta área. Se definen paso a paso todas las herramientas utilizadas en el cálculo de los parámetros de soldadura, aplicables no solo para este caso en particular, sino que posteriormente se aplican estas herramientas en el cálculo de dichos parámetros para la aleación de interés, se presentan fotografías del proceso de soldadura de las probetas, para por último presentar los datos de los ensayos con un breve análisis del porqué de los resultados obtenidos.

OBJETIVOS

General

Realizar un análisis y recomendaciones prácticas de la soldabilidad en uniones a tope del acero corrugado # 8, grado 60, norma ATM A615, disponible en el mercado guatemalteco.

Específicos

1. Definir los fundamentos teóricos básicos que permitan comprender las consideraciones necesarias en una soldadura de aceros de medio y alto contenido de carbono.
2. Concluir sobre la viabilidad de realizar uniones de aceros de medio y alto contenido de carbono y efectuar un análisis sencillo de los resultados obtenidos
3. Analizar la importancia del precalentamiento en este tipo específico de soldadura.
4. Determinar la importancia del secado de los electrodos de bajo hidrógeno en este tipo específico de soldadura.
5. Dar las recomendaciones adecuadas referentes a la soldadura de este acero, basado en los requerimientos del código ACI 12.14.3.4, norma AWS D1.4 y los datos experimentales obtenidos.

INTRODUCCIÓN

La factibilidad de unir un acero por soldadura, es directamente proporcional a su contenido de carbono; asimismo, de una manera general se puede decir que también lo es su resistencia; sin embargo esto conlleva una serie de características negativas en el material como fragilidad y tendencia al temple, por mencionar aspectos con relevancia en soldadura; de tal manera, la interacción entre aceros de una resistencia elevada y uniones por soldadura conlleva una serie de cuidados especiales no intuitivos que se deben tener al momento de realizar estas uniones.

Para el caso específico de este trabajo, se analiza la soldabilidad de la barras de refuerzo grado 60, norma ASTM A615, la cual no toma en cuenta la unión por soldadura de estas barras como un requerimiento. Existe una norma equivalente en grado que limita el contenido de carbono en las barras corrugadas grado 60 y que presenta características mecánicas equivalentes a la norma A615, pero con mejores características de soldabilidad y comportamiento sísmico; dicha norma es la A706. Lamentablemente en el mercado local no se producen barras fabricadas bajo esta norma y tampoco se importan de manera regular.

Las barras de refuerzo grado 60, norma ASTM A615, contienen alrededor de 0.45% de carbono, lo que las cataloga como un acero medianamente soldable y aunque una unión satisfactoria en estas barras por medio de soldadura no es imposible de alcanzar, sí debe llevar una serie de consideraciones técnicas previas a realizar la soldadura y estas son de carácter imprescindible.

Aunque normalmente las uniones de estas barras en concreto reforzado se realizan por medio de traslapes, en el medio guatemalteco, existen situaciones donde resulta conveniente realizarlas por medio de soldadura, de tal manera, si bien no es una práctica común, es un hecho que se realizan uniones en este tipo de barras por medio de soldadura; asimismo, que en el 90% de los casos, se hace sin ninguna consideración técnica más allá del aspecto visual del material depositado.

1. ANTECEDENTES

La aleación ASTM A 615 regula las características mecánicas y físicas de las barras corrugadas utilizadas en concreto reforzado; sin embargo no limita los contenidos químicos de la aleación; esto presenta un problema al querer realizar uniones por soldadura de estas barras; a pesar de que las uniones o las continuidades en edificios se realizan en la mayoría de casos por medio de traslapes, también se hacen por medio de soldadura y normalmente no se calculan los parámetros adecuados para dicha soldadura, acorde a su contenido de carbono y demás aleantes, contenido que al no estar limitado en esta aleación, puede variar de una casa fabricante a otra.

Muchas de las veces que se realiza este tipo de soldaduras, se hace de una manera errada, con electrodo inadecuado y sin parámetros de precalentamiento, lo que dependiendo de los elementos de la aleación y sus valores porcentuales de contenido, puede ocasionar que no alcance los requerimientos específicos mínimos de resistencia.

2. JUSTIFICACIÓN

Es positivo que los ingenieros civiles encargados de supervisar una obra en donde se involucre soldadura, sepan qué parámetros son vitales en la ejecución de la misma, no necesariamente por supervisión directa, sino para saber de una manera general cuáles son los pasos esperados en la correcta realización de una soldadura subcontratada.

Los aceros de refuerzo cuya aleación cumple con la norma ASTM A615, deben respetar los parámetros máximos y mínimos en el contenido de los distintos elementos dentro de la aleación, así como cumplir las características mecánicas mínimas especificadas por las normas. Derivado de esto también existen normas que rigen las soldaduras de estos aceros como ANSI/AWS D1.4; no obstante es necesario realizar pruebas experimentales con los aceros disponibles en el mercado guatemalteco, para obtener una idea más clara del comportamiento real de las soldaduras de estas barras en nuestro país.

Resulta de utilidad proveer una fuente de información destinada a ingenieros civiles, en la que se procura tener una explicación sencilla de los aspectos metalúrgicos involucrados en soldadura

3. FUNDAMENTOS BÁSICOS DEL ACERO

3.1. Acero

Se conoce como aleación a la combinación de dos o más elementos donde al menos uno es un metal, este es el caso del acero, que es una aleación de hierro y carbono donde este último puede estar presente en un porcentaje entre 0.08% hasta un 2.1%, aunque generalmente no supera el 1%.

La composición química de los aceros al carbono es compleja, además del hierro y el carbono hay en la aleación otros elementos necesarios para su producción, tales como silicio y manganeso, así como otros que se consideran impurezas por la dificultad de excluirlos totalmente de la aleación y poseer un efecto dañino sobre esta; se puede mencionar el azufre, fósforo, oxígeno e hidrógeno.

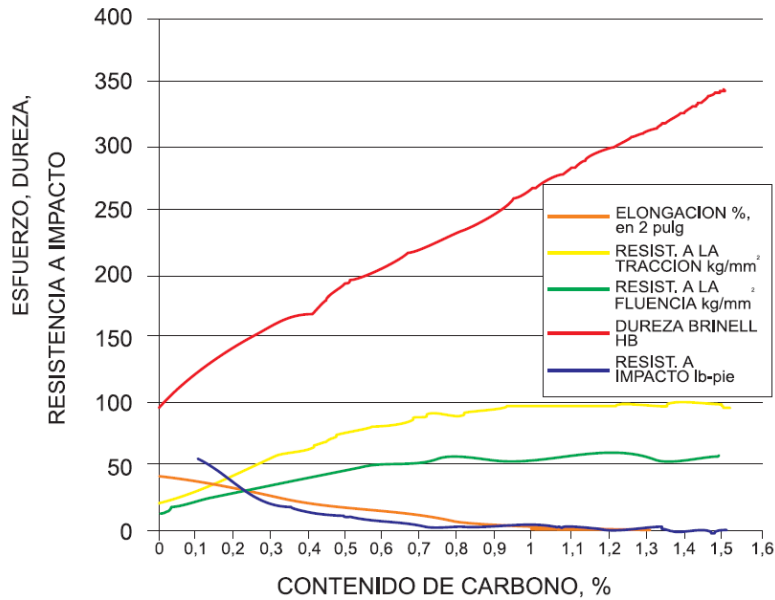
Por otro lado, una aleación también puede contener otros elementos añadidos intencionalmente que le proporcionan características especiales y específicas, dependiendo de la cantidad de estos elementos y su incidencia en las propiedades de la aleación, los aceros dejan de denominarse aceros al carbono y pasan a formar parte de una gama conocida como aceros aleados.

El acero es uno de los materiales más resistentes, versátiles y útiles en todas las ramas de la industria y la construcción, derivado de esto, es pilar fundamental de la construcción moderna, tanto para estructuras construidas totalmente con acero, como para estructuras construidas con concreto reforzado.

3.1.1. Contenido de carbono

El contenido de carbono en la aleación hierro-carbono, es determinante en las características mecánicas del acero; el aumento del contenido de carbono en un acero aumenta la resistencia a la tracción, la tenacidad, la fragilidad y la dureza; también tiene un efecto negativo sobre la ductilidad. Derivado de esto los aceros estructurales y de refuerzo son aceros normalmente comprendidos entre bajo y medio contenido de carbono, ya que la ductilidad resulta una característica imprescindible en miembros estructurales o en barras de refuerzo en concreto reforzado. A continuación se muestra un esquema de la influencia del contenido de carbono en el acero.

Figura 1. Influencia del carbono en el acero



Fuente: Aceros Arequipa. El acero, lo que hay que saber. p .24.

3.1.2. Resistencia

En la mayoría de casos prácticos, la resistencia de un acero utilizada en los cálculos estructurales de concreto reforzado, es la resistencia a la fluencia; no es difícil deducir que un elemento estructural o una barra de refuerzo dejará de prestar un servicio satisfactorio en el punto donde su deformación deje de ser proporcional a la carga aplicada, aún así, esta resistencia resulta en aproximadamente 15 veces la resistencia a compresión del concreto estructural común, y en más de 100 veces su resistencia a la tensión; lo que pone en evidencia su importancia en la construcción.

Como se mencionó, la resistencia de un acero al carbono es proporcional a su contenido de carbono, esto puede dar pie a pensar que entre más carbono pueda contener un acero, este será de mejor calidad y resistirá más, y aunque es un hecho que sí resistirá más, el contenido de carbono también aumenta su fragilidad, lo que conlleva una serie de desventajas desde el punto de vista estructural. Las principales desventajas de interés en la construcción pueden ser: presentar fallas explosivas e inadvertidas, fracturas o agrietamientos por impactos, tener limitadas deformaciones y un punto de fluencia no definido.

De tal manera los aceros estructurales y de refuerzo deben equilibrar su contenido de carbono y resistencia con una adecuada ductilidad, ciertos principios del diseño de concreto reforzado basan su confiabilidad en el punto de fluencia del acero; este punto sirve como fusible ante una sobrecarga, ya que al sobrepasar este valor, el acero se deformará de una manera no lineal, y provocará grietas visibles en el concreto, sin embargo el acero estará lo suficientemente lejos de fallar como para permitir tomar las medidas necesarias y salvaguardar tanto vidas humanas como la integridad de las estructuras.

Tal situación no sería posible si se utilizara un acero de mucha mayor resistencia que no presente una plataforma plástica marcada. Las barras de refuerzo para concreto reforzado normalmente están regidas bajo las normas ASTM, y se denominan en grados, 40, 60 y 75; a continuación en la tabla I se listan las principales aleaciones de aceros corrugados y sus principales características mecánicas mínimas requeridas.

Tabla I. **Principales aleaciones en barras de refuerzo**

		Resistencia mínima a fluencia		Resistencia mínima a Tensión	
		Lb/pulg ²	Mpa	Lb/pulg ²	Mpa
A 615	Grado 40	40,000	280	60,000	420
	Grado 60	60,000	420	90,000	620
	Grado 75	75,000	520	100,000	690
	Grado 80	80,000	550	105,000	725
A 706	Grado 60	60,000 Max.78,000	420 Max 540	80,000	550

Fuente: elaboración propia.

3.1.3. Fragilidad

La fragilidad en un acero es una característica que está relacionada con su dureza, la dureza; esta se puede definir a grosso modo como la resistencia de un material a ser rallado por el contacto con otro y por fragilidad se puede entender que es la capacidad de un material de fracturarse con escasa deformación; esta es una característica contraria a la ductilidad, que es la capacidad de un material de deformarse sin presentar fractura, por lo menos en un ciclo determinado de veces.

En un acero la fragilidad es proporcional al contenido de carbono, y se presenta más acentuada en aceros de altas resistencias o en hierros fundidos (se conoce como hierro fundido o fundiciones, a la aleación hierro-carbono con más de 2.1% de carbono).

La dureza y la fragilidad en un acero también están vinculadas con la estructura cristalina que un acero posee, esta estructura varía con la temperatura en los aceros y bajo operaciones especiales se puede conseguir que los aceros a temperatura ambiente posean una estructura diferente a la que tendrían en su estado normal; por ejemplo en los tratamientos térmicos como el temple, se consigue aumentar la dureza de una pieza a partir de un calentamiento y un enfriamiento rápido en condiciones especiales y controladas.

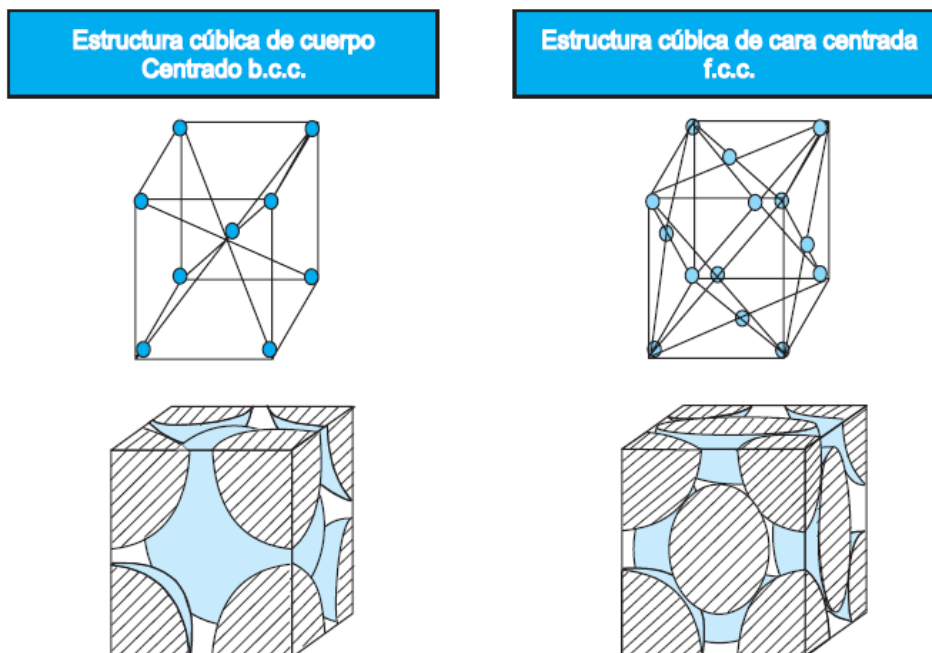
3.1.4. Estructuras cristalinas

Todos los materiales están integrados por átomos, los que están organizados de distintas maneras, dependiendo del material que sea y del estado en que se encuentre; es decir gas, sólido o líquido; por ejemplo, cuando un material está en estado gaseoso sus átomos están más dispersos en comparación con ese mismo material en estado sólido.

En los metales en estado sólido, los átomos se alinean en forma de mallas regulares tridimensionales, cuando un material cambia de tipo de malla con la temperatura a la que se encuentra, como es el caso del acero, se dice que es un material polimórfico o alotrópico.

Cada tipo de malla en los metales tiene distintas propiedades; pese a que se sigue tratando del mismo material, en el acero se pueden encontrar principalmente dos tipos de mallas: cubica centrada en el cuerpo (BCC) y cubica centrada en las caras (FCC). Se ilustran las dos configuraciones en la figura 2, cada punto celeste representa un átomo, y cada cubo estará totalmente rodeado por más cubos en forma ordenada, como cajas apiladas; estos cubos contiguos compartirán los átomos de las aristas y/o los de las paredes, según sea el caso.

Figura 2. **Estructuras cristalinas**

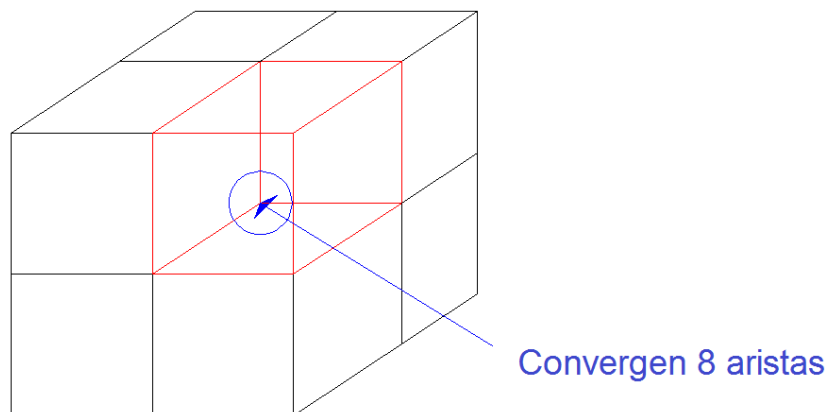


Fuente: Aceros Arequipa, El acero, lo que hay que saber. p. 22.

La malla cubica centrada en el cuerpo, BCC (ver figura 2) es la estructura que posee el acero a temperatura ambiente: $1/8$ de átomo en cada arista del cubo y un átomo en el centro del mismo, es decir posee dos átomos por celda. Se conoce también como hierro alfa.

En la figura siguiente se ejemplifica gráficamente, el hecho de que a cada arista de un cubo o una celda llegarán 7 aristas más de cubos contiguos, de aquí que cada esquina de celda contenga solo $1/8$ de átomo y cada cara solamente $1/2$ átomo.

Figura 3. **Ordenamiento de celdas**



Fuente: elaboración propia.

La malla cubica centrada en las caras, FCC (ver figura 2), aparece en el acero al llegar aproximadamente a una temperatura de 910°C ; esta posee $1/8$ de átomo en cada arista del cubo y $1/2$ átomo en cada cara; en total posee 4 átomos por celda, y se conoce como hierro gamma.

Existe otro término de importancia en el tema de estructuras cristalinas, los espacios intersticiales, estos son los espacios vacíos que se generan entre los átomos que forman una celda; estos pueden estar vacíos o llenos por átomos más pequeños.

Es fácil deducir que la estructura FCC es más densa que la BCC, y por lo tanto con distintas características, si se considera a los átomos como esferas ubicadas en estas estructuras cristalinas, se podrá encontrar el llamado factor de empaquetamiento que expresa, en fracción unitaria, el espacio ocupado por los átomos en la celda unitaria. Para la celda FCC este factor es 0.74 y para la celda unitaria BCC es 0.68; de tal manera se deduce que la celda FCC está más llena.

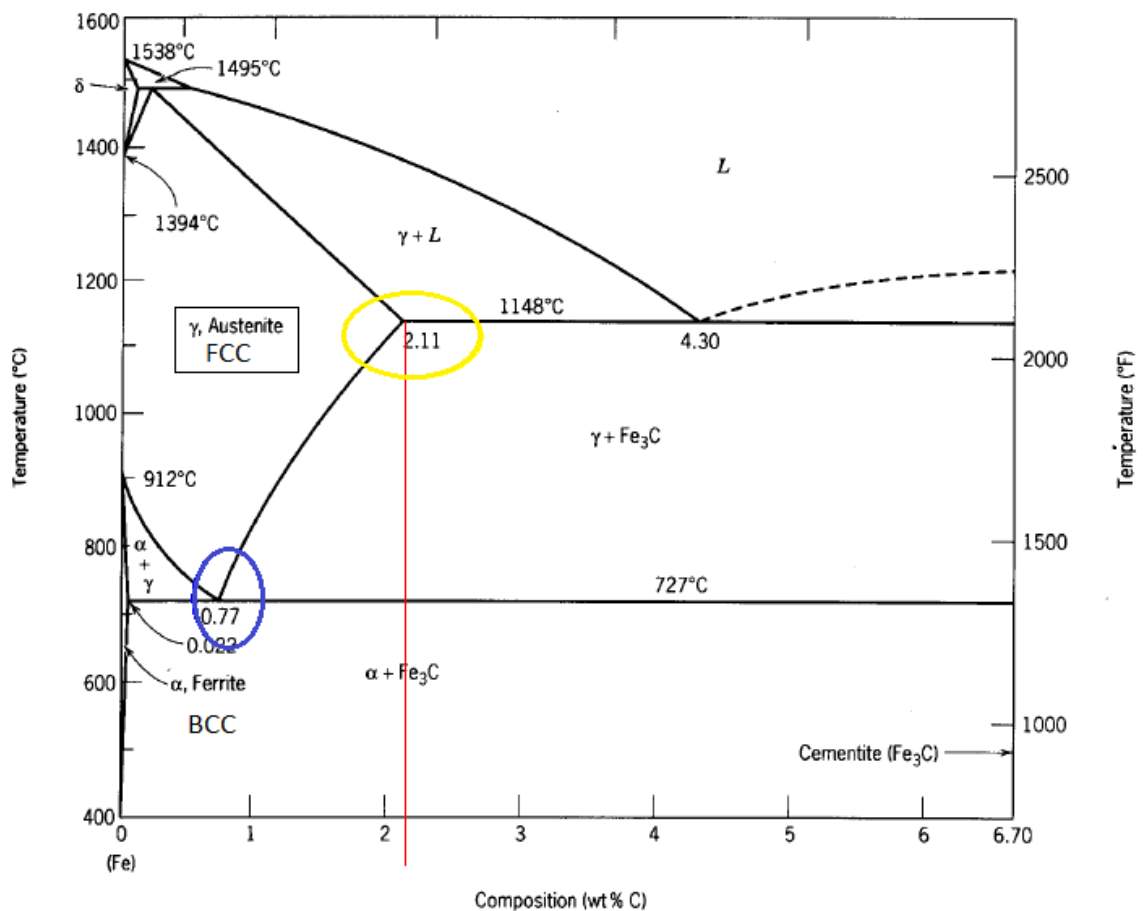
Aunque parezca contradictorio, a pesar de que las celdas BCC tienen más espacio libre, la distribución geométrica de los átomos, para un átomo anfitrión dado, genera que los espacios intersticiales permitan alojar átomos de un radio menor que los que podría alojar la estructura FCC, esto anudado a la relación de tamaños de los átomos de hierro y de carbono, provocan que la estructura FCC diluya mucho más carbono que la BCC. Esto confirma que para el acero, al modificar la estructura de un acero de BCC a FCC, se permite que el hierro disuelva más carbono, y de esta manera posea características distintas, a pesar de ser el mismo material.

La premisa fundamental de esta sección es el hecho de que el acero variará su estructura cristalina y con ella sus propiedades a distintas temperaturas; estas variaciones estarán afectadas en gran medida en la velocidad de transición entre estas temperaturas y de la cantidad de carbono y otros elementos que contenga la aleación.

3.1.5. Diagrama hierro - carbono

El diagrama hierro – carbono (figura 4), representa las transformaciones que sufre el acero con la temperatura, asumiendo que el calentamiento y el enfriamiento son realizados de forma lenta, ya que el tiempo es un factor decisivo en las estructuras resultantes. El punto marcado con un círculo amarillo delimita la frontera entre aceros y fundiciones por % C.

Figura 4. Diagrama hierro - carbono



Fuente: www.uca.edu.sv/facultad/clases/ing/m210031/Tema%2013.pdf.

Consulta: agosto de 2012.

3.1.5.1. Microconstituyentes

Se les llama microconstituyentes a las fases que presenta el acero o una aleación general bajo distintas temperaturas. Cada una de estas fases presenta características particulares; los principales microconstituyentes del acero se listan a continuación:

- Ferrita (α): consiste en átomos de hierro con estructura BCC, y átomos de carbono en los espacios intersticiales, la cantidad de átomos de carbono que puede diluir la ferrita es pequeña; esta fase es muy suave, dúctil y magnética.
- Austenita (γ): consiste en átomos de hierro con estructura FCC y átomos de carbono en los espacios intersticiales; es una fase más suave y más dúctil que la ferrita, y es no magnética.
- Cementita (Fe_3C): tiene un 6,67% en peso de carbono, y es un compuesto intermetálico; la cementita es muy dura, de hecho es el constituyente más duro de los aceros al carbono, con una dureza de 68 Rockwell C. La cementita destaca por ser un constituyente frágil, con alargamiento nulo y sin resiliencia.
- Perlita: es un constituyente formado por placas alternas de ferrita y cementita, el punto marcado con un círculo azul en la figura 4, es denominado punto eutectoide, 0.77 % de carbono; en este punto, la ferrita y la cementita están en cantidades exactas para formar un 100% de perlita, a la izquierda del punto (aceros hipoeutectoides) habrá un exceso de ferrita, por lo que se formará solo la cantidad de perlita que permita la cementita presente y quedará una mezcla entre perlita y

ferrita, por el contrario, al lado derecho de este punto (aceros hipereutectoides) existirá un exceso de cementita en relación con la ferrita y se formará una mezcla de perlita y cementita.

- **Martensita:** es una solución sólida sobresaturada de carbono en hierro alfa; se obtiene por un enfriamiento muy rápido de los aceros, una vez elevada su temperatura lo suficiente para conseguir su constitución austenítica; después de la cementita es el constituyente más duro del acero. Esta estructura es la obtenida a través del temple, aunque es una estructura que se puede buscar en ciertas aplicaciones debido a su alta dureza, puede ser muy perjudicial para otras por su fragilidad; en soldadura es de vital importancia tomar en cuenta los aspectos técnicos que permitan evitar la formación de estructuras martensíticas para no fragilizar las uniones.

3.1.6. Clasificación de los aceros y su estructura cristalina

- **Aceros de bajo carbono:** su porcentaje es menor a 0.2% C; su estructura está formada principalmente por ferrita, son aceros suaves, dúctiles y de relativamente baja resistencia; son fáciles de deformar plásticamente.
- **Aceros de medio carbono:** el porcentaje de carbono oscila entre 0.2% y 0.5%; la estructura está formada por una mezcla de ferrita y perlita, en esta gama entran la mayoría de aceros comerciales; la resistencia aumenta con el contenido de carbono.
- **Aceros de alto contenido de carbono:** el porcentaje de carbono es mayor a 0.5%, su dureza es alta, su ductilidad y tenacidad son bajas, su estructura es una mezcla de ferrita y perlita o cementita y perlita.

3.1.7. Templabilidad

El temple es un tratamiento térmico de los aceros, que básicamente consiste en el calentamiento de un acero por encima de su temperatura de austenización y su posterior enfriamiento rápido en agua, aceite o en aire, según sea el caso. Este enfriamiento produce martensita como estructura predominante, que como se explicó en la sección anterior, es una estructura sumamente dura y frágil, tan frágil que de hecho, para que un tratamiento de temple sea efectivo debe llevar un tratamiento extra de revenido después de haber sido templado; este tratamiento elimina cierta cantidad de dureza al temple original y con esto disminuye las fragilidades extremas que prácticamente inutilizan el material.

Habiendo definido brevemente lo que es el temple, la templabilidad es la facilidad con la que un acero forma martensita, entendiéndose por mayor templabilidad un acero que forma martensita con un enfriamiento lento, y un acero de baja templabilidad, uno que necesita velocidades muy rápidas para conseguir la estructura; para cada aleación de acero hay una relación específica entre las propiedades mecánicas y la velocidad de enfriamiento, la templabilidad de un acero depende de su composición química, y aumenta con el incremento de carbono y otros elementos.

Existen aceros especiales para ser sometidos al temple con el fin de endurecerlos, pero el aspecto de interés en este trabajo es que el temple de un acero muchas veces es una consecuencia dañina de otro procedimiento, pudiendo ser un trabajo de soldadura o un calentamiento considerable por cualquier razón; si el acero en consideración es de una templabilidad alta, no necesita ser enfriado súbitamente en agua o aceite para templarse, el simple enfriamiento al aire es suficiente para precipitar una estructura martensítica.

Basados en lo anterior, se puede entender la importancia que tiene considerar el contenido de carbono en un acero, previo a someterlo a un calentamiento o un trabajo de soldadura; también se puede deducir que un acero no formará martensita si se logra reducir su velocidad de enfriamiento lo suficiente; obviamente entre los parámetros de lo posible y lo viable, también es justo recordar que la velocidad necesaria para formar martensita depende en buena medida del contenido de carbono, por lo que un acero de bajo contenido de carbono puede no necesitar mayores cuidados al momento de ser soldado, siendo caso contrario un acero con alto contenido de carbono y alta templabilidad.

3.1.8. Soldabilidad

La soldabilidad es un parámetro que mide (a través del porcentaje de carbono y/o carbono equivalente) la facilidad con la que un acero puede ser soldado con resultados satisfactorios; es inversamente proporcional a su templabilidad, es decir, entre más templable es un acero, más difícil será su unión por soldadura.

3.1.8.1. Carbono equivalente

El elemento que condiciona la soldabilidad de un acero simple es el contenido de carbono; sin embargo para aceros que contienen otros elementos, dependiendo de su contenido en porcentaje, estos también pueden tomar papeles determinantes en el comportamiento de acero ante el proceso de soldadura, de tal manera que, aunque con el contenido de carbono de un acero en específico, se puede tener una idea inicial de la facilidad con que un acero puede ser soldado, es necesario considerar otros elementos y aspectos del material en cuestión.

De lo anterior deriva un concepto muy importante en la evaluación de la soldabilidad de los aceros, este es el concepto de carbono equivalente (CE), el cual relaciona la soldabilidad de un acero con el contenido en porcentaje de varios elementos que pueden tener incidencia en la soldabilidad y no únicamente el carbono; en otras palabras, básicamente es traer a términos de un acero simple una aleación con distintos elementos, con el fin de poder juzgar su soldabilidad.

Existen varias fórmulas de carbono equivalente, pero en general deberán presentar resultados similares; una fórmula ampliamente aceptada desarrollada por IIW (Instituto internacional de soldadura) es la siguiente, donde se relacionan los contenidos de carbono, vanadio, cromo, molibdeno, manganeso, níquel y cobre:

$$Ce = C + \frac{\%V}{5} + \frac{\%Cr}{6} + \frac{\%Mo}{6} + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15}$$

Donde, del resultado de Ce, se puede juzgar de una manera general la soldabilidad, de acuerdo con los siguientes parámetros:

- Hasta 0.25%C: soldable; no es necesario tomar mayores consideraciones al momento de soldar
- De 0.25%C a 0.40%C : medianamente soldables; es recomendable tomar precauciones y consideraciones técnicas previo a soldar
- Por encima de 0.40%C: poco soldables; es indispensable tomar precauciones y consideraciones técnicas previo a soldar.

La AWS-D1.4, que es la norma que regula la soldadura de los aceros de refuerzo, solicita que se utilice: $C_e = \%C + \%Mn/6$ para los aceros de refuerzo A615, la cual es otra ecuación para calcular el C_e ; de tal manera se realizará la evaluación con ambas fórmulas, para comparar los resultados del presente caso particular.

3.2. Acero de refuerzo norma ASTM A615

Esta norma cubre las especificaciones para las barras corrugadas de acero para refuerzo en concreto reforzado, grados 40 (40,000 psi), grado 60 y 75. Es de especial interés hacer énfasis en que las especificaciones solicitadas por la norma solamente hacen referencia a características físicas y mecánicas, es decir dimensiones y pesos esperados, así como características mínimas de deformación, resistencia a tracción y doblado.

Los requisitos de composición química de la aleación en dicha norma, solamente limitan el contenido de fósforo a un máximo de 0.06 %, aunque menciona que se deberá realizar un análisis para determinar los contenidos de carbono, manganeso, fósforo y azufre, no limita los 3 primeros, teniendo estos mucha incidencia en la soldabilidad de un acero; a esto se agrega el hecho de que muchas compañías tampoco revelan los contenidos químicos de la aleaciones que comercializan, esto genera un alto grado de incertidumbre al realizar un soldadura en los aceros mencionados, especialmente si se tratan de grado 60 o 75.

En este trabajo se hará enfoque en el acero grado 60, ya que el ACI 318-08, en la sección 21.1.5.2, no permite el uso de aceros grado 75 en un zona sísmica; esta misma sección también limita la resistencia real a la fluencia de los aceros a no más de 125 Mpa (aproximadamente 18,000 psi) por encima de

la especificación dada; también solicita que la resistencia última real debe ser por lo menos 1.25 f_y . La resistencia nominal de las barras grado 60 según la norma A 615 es $F_y = 60,000$ Psi o 420 Mpa; $F_u = 90,000$ Psi o 620 Mpa y para barras No. 8, una elongación de 8%.

En caso de realizar soldaduras en los aceros cubiertos por la norma ASTM A615, esta solicita la realización de la misma de acuerdo con ANSI/AWS D 1.4, norma que se usará como referencia y comparación en los parámetros calculados en el presente trabajo.

3.3. Acero de refuerzo norma ASTM A706 (no se fabrica actualmente en Guatemala)

Derivado de los inconvenientes que presenta la norma ASTM A615, mencionados en la sección anterior, surge la norma ASTM A706; esta regula los aceros corrugados grado 60 únicamente y además de establecer requisitos de resistencia, deformaciones y dimensiones, limita las composiciones químicas como sigue:

- Carbono = 0.30 % máximo
- Manganeso = 1.50 % máximo
- Fósforo = 0.035 % máximo
- Azufre = 0.045% máximo
- Silicio = 0.50 % máximo

También limita el carbono equivalente de la aleación a 0.55%.

Estas limitaciones mantienen esta aleación en buenos parámetros de soldabilidad y resulta en uniones más fáciles de realizar y de resultados más

seguros. Lamentablemente esta aleación no se produce actualmente en nuestro país, y por lo regular no existe en el mercado local, producto de importación, por lo que la mayoría de veces, se limita a trabajar con la aleación A615 y tomar las consideraciones adecuadas al soldar este tipo de aceros.

4. SOLDADURA

4.1. Soldadura por arco eléctrico (SMAW)

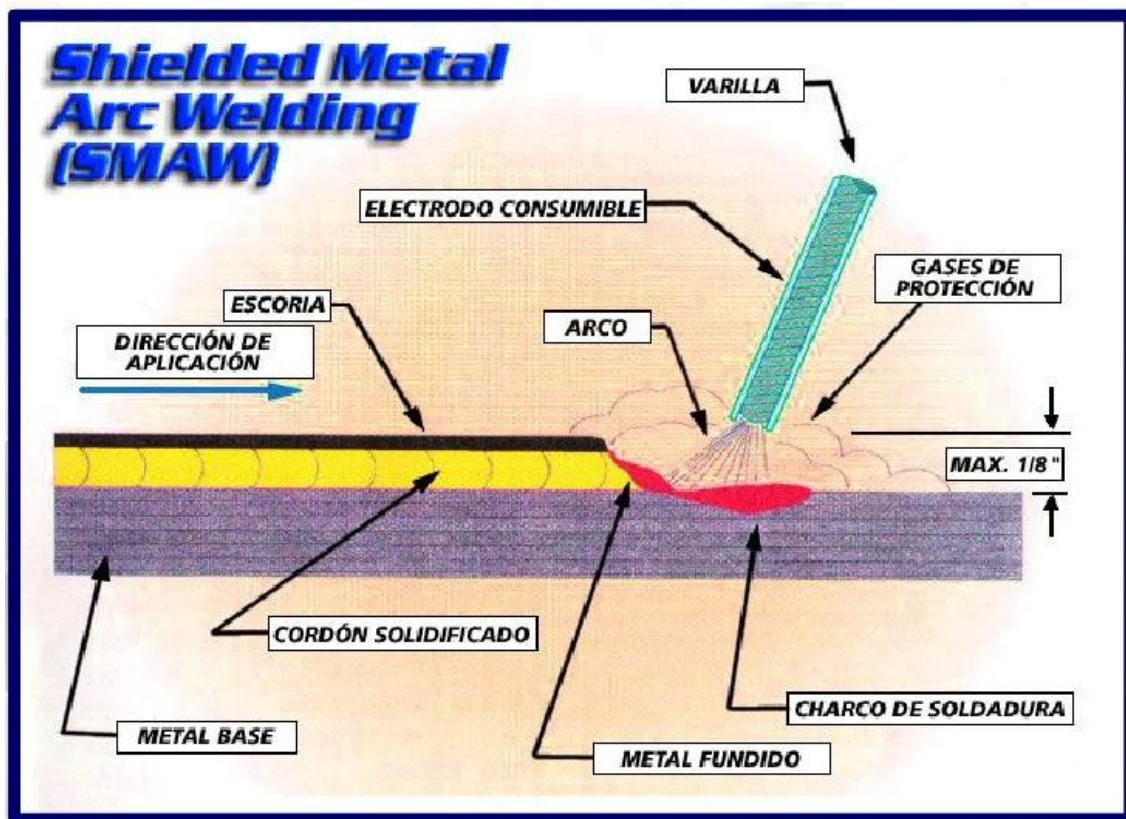
De manera sencilla, se puede decir que la soldadura es un proceso donde se realiza la unión de dos materiales, generalmente metales o termoplásticos a través de la fusión (derretimiento) del área de contacto de los materiales, pudiendo tener o no, material de aporte (material extra para producir una mejor unión); esta área de material fundido se mezcla y al enfriarse produce una unión fija.

Existe más de un proceso de soldadura por arco eléctrico; sin embargo el proceso de interés es el de soldadura manual con electrodo revestido (SMAW, Shielded metal arc welding), este es el proceso más común y económico, también es el proceso que la mayoría de operarios conoce, este proceso de soldadura utiliza una fuente de energía para establecer un arco eléctrico entre el metal base (material a soldar) y un electrodo consumible; este arco eléctrico produce el calor suficiente para fundir el material base y el electrodo y así formar una mezcla homogénea que posteriormente se solidificará en una unión, que de ser realizada bajo los parámetros adecuados, tendrá características similares al material base.

El electrodo consumible, que es de acero, está cubierto con un fundente que protege el área de la soldadura contra la oxidación y la contaminación por medio de la producción del gas CO_2 durante el proceso de la soldadura. El núcleo en sí mismo del electrodo actúa como material de aporte, haciendo innecesario un material adicional.

En la figura siguiente se ilustra el esquema del proceso de soldadura manual con electrodo revestido.

Figura 5. Proceso de soldadura manual con electrodo revestido



Fuente: Soldadura, proceso SMAW, INFRA, air products, Diapositiva. 2.

De manera concisa, el revestimiento del electrodo contiene elementos que ayudan a mantener un adecuado arco eléctrico, también influye en la manera y facilidad con que se puede aplicar la soldadura.

Otro papel de suma importancia es el de proteger la soldadura contra el medio ambiente, evitando que esta se contamine; básicamente esto se logra por tres medios:

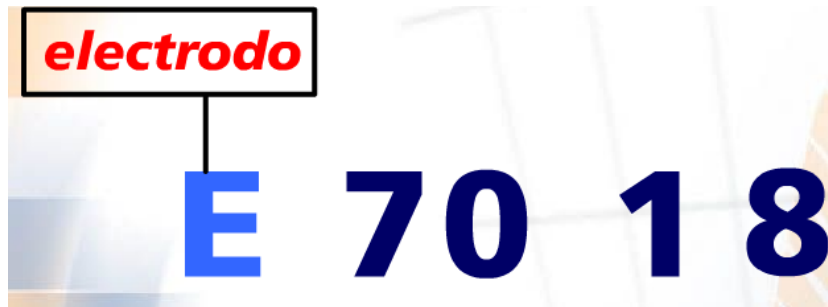
- Protección gaseosa: durante la operación de soldadura, existen elementos en el revestimiento, que forman una capa gaseosa que protege el metal fundido mientras es depositado.
- Protección por la escoria: la escoria dejada sobre los cordones de soldadura sirve para proteger el metal fundido una vez se disipa la capa gaseosa, además absorbe impurezas del metal depositado; asimismo evita un enfriamiento rápido.
- Aporte de elementos a la aleación: la escoria aporta elementos a la aleación durante el contacto con el metal fundido, estos elementos resultan de suma importancia en las características finales de la unión.

4.1.1. Clasificación básica de los electrodos

La clasificación de los electrodos obedece normalmente a normas de la Asociación Americana de Soldadura y Asociación Americana de Ingenieros Mecánicos (AWS y la ASME, siglas en inglés).

Para la clasificación de electrodos revestidos, para aceros de bajo carbono y aleados, se adopta una letra “E” seguida de 4 o 5 dígitos, E-XXXX, como se ilustra en la figura 5, para un electrodo E-7018.

Figura 6. Clasificación de electrodos



Fuente: Soldadura, proceso SMAW, INFRA, air products, Diapositiva. 13.

Los primeros 2 dígitos de un grupo de 4 o los primeros 3 de un grupo de 5, simbolizan la resistencia a la tensión en miles de libras sobre pulgada cuadrada; en el caso de la figura 5, representan una resistencia a la tensión de 70,000 libras sobre pulgada cuadrada (Psi.)

La penúltima cifra significa la posición en la que es posible soldar, esto de la siguiente manera:

- 1 = para todas las posiciones
- 2 = posición horizontal o plana
- 3 = posición plana únicamente

En el caso de la figura 6, es un electrodo adecuado para soldar en cualquier posición.

La última cifra define las características del revestimiento, de acuerdo con la tabla siguiente:

Tabla II. **Tipos de revestimiento**

Cuarta cifra	Revestimiento	Tipo de corriente	Características del electrodo
0	Celulósico con silicato de sodio	C.D. – P.I.	Penetración profunda Cordón plano o cóncavo Fusión rápida
1	Celulósico con silicato de potasio	C.A./C.D.- P.I.	Penetración profunda Cordón plano o cóncavo Fusión rápida
3	Rutílicos con sales de potasio	C.A./C.D.– P.I./P.D.	Penetración ligera Cordón convexo Gota fría
4	Rutílicos con polvo de hierro	C.A./C.D.– P.I./P.D.	Penetración ligera Gran velocidad de aporte
8	Básico con polvo de hierro bajo-hidrógeno	C.A./C.D.- P.I.	Penetración media Cordón convexo Gran velocidad de aporte

Fuente: Soldadura, proceso SMAW, INFRA, air products, Diapositiva. 14.

Es propio decir que los electrodos recomendados por la AWS D1.4 para soldar aceros de refuerzo grado 60, que es el que interesa, es el E-9018-X, esta X de más es para colocar una letra extra que simboliza características especiales; el alma de estos electrodos es un acero de baja aleación y no el carbono simple; esto aporta una tenacidad adecuada a la unión y respeta el fin de cualquier estructura de concreto, que se refiere a que en el momento de una falla, esta sea dúctil y retardada y no una falla frágil y explosiva.

Aunque es una mala práctica, es común que se realicen soldaduras de acero grado 60 con electrodo E-7018, lo cual refleja la poca atención técnica que reciben las soldaduras en nuestro medio.

4.2. Consideraciones de seguridad industrial

En todo trabajo donde se involucren altas temperaturas, es necesario que el personal esté capacitado y sepa la importancia y el uso adecuado del equipo de protección personal EPP; en soldadura es de suma importancia tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- La correcta conexión del equipo a utilizar
- Verificación y conservación de los cables conductores
- El manejo y cuidado del equipo
- La realización correcta de las operaciones

4.2.1. Manejo y transporte del equipo

Los equipos deben desconectarse de la red, antes de ser trasladados e incluso, cuando van a ser limpiados o vayan a repararse. Los cables de conexión a la red, así como los de soldadura, deben ser enrollados prolijamente para ser transportados. Cuando los cables del equipo opongan resistencia a su manejo, no se debe tirar de ellos, tampoco deben ser arrastrados para ser transportados; de esta manera se pueden producir roturas o el desgaste de los mismos.

4.2.2. Conexión segura del equipo de soldar

En el equipo debe distinguirse un circuito primario y un circuito secundario. Las conexiones del equipo a la red (circuito primario) deben ser realizadas por un especialista eléctrico.

En la soldadura eléctrica por arco, la tensión de trabajo es solo de 15 a 40 voltios, aproximadamente; sin embargo, la tensión cuando el equipo trabaja en vacío, es decir, sin establecer el arco, puede ser mucho mayor. Por esta razón los cables en mal estado constituyen un gran riesgo, incluso en los circuitos secundarios; es aconsejable que el soldador revise el aislamiento de los cables antes de comenzar la tarea y eliminar los que se encuentren dañados o en mal estado. Solo se debe utilizar cables y empalmes en perfecto estado de conservación.

En algunos casos, los conductores de puesta a tierra de las herramientas eléctricas utilizadas cerca de los equipos de soldar, suelen calentarse tanto (por efecto de las corrientes inducidas por la soldadura) que llegan a fundirse sin que se note. Por ese motivo es necesario:

- Conectar directamente el cable de tierra sobre la pieza a soldar
- Utilizar herramientas eléctricas que tengan doble aislamiento
- Colocar un aislante intermedio cuando la pieza a soldar se encuentra colgada

Se debe también cortar la corriente antes de realizar cualquier manipulación sobre la máquina, incluso moverla. No se debe dejar conectada la máquina cuando se suspenda el trabajo o se realice un descanso. Además no se debe permitir que los cables descansen sobre charcos, superficies calientes, rebordes filosos, etc., o cualquier otro lugar que perjudique su aislamiento. Se debe evitar que los cables sean pisados por vehículos, o que las chispas de la soldadura caigan sobre ellos. Los cables no deben cruzar una vía de circulación sin estar protegidos mediante apoyos de paso.

4.2.3. Protección personal

Para evitar electrocuciones es necesario evitar que la tensión en vacío descargue por el cuerpo del soldador. Por lo tanto se debe:

- Llevar puestos los guantes protectores.
- Cambiar los mangos en mal estado, tanto de la pinza como del equipo de soldar.
- Utilizar guantes al colocar el electrodo y, además, al desconectar la máquina.
- No apoyar la pinza sobre materiales conductores; siempre sobre materiales aislantes.

Además de los peligros propios de la electricidad existen otros riesgos, por ejemplo los efectos de las radiaciones. Para evitar este peligro el soldador debe utilizar pantalla protectora con cristales absorbentes. Es conveniente comprobar que la pantalla no presente roturas que permitan el paso de la luz, y que el cristal contra radiaciones sea el conveniente de acuerdo con la intensidad o diámetro del electrodo; a continuación se norma el grado de protección:

- DIN 10, si se utiliza con corrientes de soldadura hasta 80 amperios
- DIN 11, si se utiliza con corrientes de soldadura de hasta 175 amperios
- DIN 12, si se utiliza con corrientes de soldadura de hasta 300 amperios

Hay que tener presente que no solo el soldador es el que está expuesto a los peligros de las radiaciones; los ayudantes también deben utilizar las pantallas protectoras.

Tomar en cuenta que los rayos ultravioletas pueden producir ampollas cuando actúan durante mucho tiempo sobre la piel desnuda, por este motivo se aconseja nunca trabajar con las mangas arremangadas.

Para proteger los puestos de trabajo cercanos deben utilizarse pantallas metálicas protectoras que encierren al soldador.

El equipo de protección personal del soldador debe estar compuesto por:

- Pantalla de protección de cara y ojos
- Guantes de manga larga
- Mandil de cuero
- Polainas de apertura rápida
- Calzado de seguridad
- Delantal de cuero
- Protección respiratoria

Evitar soldar con la ropa manchada con grasa, solventes, o cualquier sustancia inflamable. Además, hay que tener presente que la ropa húmeda se convierte en conductora.

Recomienda utilizar calzado aislante o dieléctrico cuando se esté soldando sobre pisos metálicos.

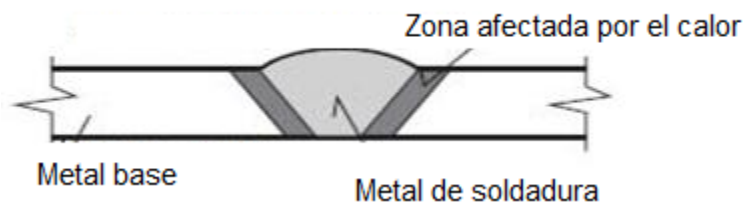
Los humos de soldadura contienen sustancias tóxicas cuya inhalación puede ser nociva; por este motivo se debe soldar siempre en lugares bien ventilados y, si es necesario, disponer de sistemas de extracción localizada.

4.3. Zona afectada por el calor (ZAC)

Los procesos de soldadura, producen un aporte térmico muy alto al metal soldado, derivado de esto el material sufre incrementos de temperatura en muchos casos superiores a las temperaturas críticas, es decir que el material llega a temperaturas de austenización (se forma austenita, pasa de estructura BCC a estructura FCC), y dependiendo de este aporte térmico, la velocidad de enfriamiento y la composición del acero pueden originarse, por transformación, fases duras o frágiles sensibles a la aparición de fisuras.

Esta zona susceptible a cambios de microestructura derivados de la soldadura se denomina zona afectada por el calor, ZAC, o zona afectada térmicamente, ZAT; es contigua a la línea de fusión del material (cordón de soldadura) y su tamaño depende de la cantidad de calor de aporte; en la figura siguiente se ilustra un esquema sencillo de lo que es la ZAC.

Figura 7. **Clasificación electrodos**



Fuente: www.soldadura.org.ar. Consulta: septiembre de 2012.

Resulta evidente que en esta zona afectada por el calor es donde en la mayoría de casos se tiende a producir fallas, sobre todo bajo cargas cíclicas, y que aunque el cordón no tenga defectos visibles, el calor producto del proceso siempre tendrá incidencia en las áreas aledañas al mismo, por lo que las consideraciones técnicas no se pueden limitar al simple aspecto de las soldaduras.

4.4. Fisuración

De los defectos posibles en una soldadura, las fisuras son los más críticos y son inaceptables, ya que estas son fuertes concentradoras de esfuerzos y por lo tanto conducen a fallas prematuras de las uniones, existen muchos mecanismos metalúrgicos que conducen a la aparición de fisuras en el material, interviniendo factores como la naturaleza del material base, del material de depósito (electrodo), si se utiliza precalentamiento, el tipo de enfriamiento, si existen tratamientos térmicos postsoldadura, corrosión y cargas cíclicas, por mencionar algunos importantes. En este caso particular, se hace el enfoque en la fisuración en caliente, descrita a continuación y la fisuración en frío.

4.4.1. Fisuración en caliente

La fisuración en caliente, de una forma sencilla, es la ocasionada por contaminantes, que forman compuestos de bajo punto de fusión, es decir, permanecen líquidos hasta temperaturas relativamente bajas; esto ocasiona que cuando la aleación del cordón de soldadura se solidifica, estos permanecen líquidos aún, y son incapaces de resistir los esfuerzos de contracción que se producen durante el enfriamiento.

Las fisuras en caliente, principalmente están asociadas con impurezas como el fósforo y el azufre, siendo promovidas por el carbono y controladas en parte por el manganeso (Mn) y el silicio (Sn). La forma geométrica del cordón influye determinante.

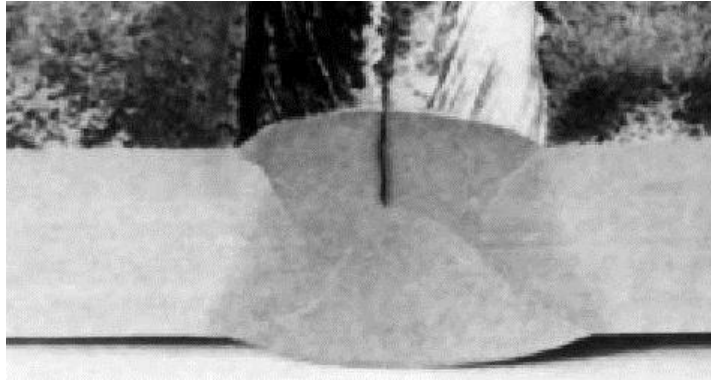
Si el cordón es angosto y profundo, la última zona en solidificar se ubicará en el centro del cordón; mientras que si el cordón es, más bien, ancho y menos profundo, la última zona en solidificar se encontrará en la superficie del cordón.

Es recomendable de tal manera para evitar en lo posible la fisuración en caliente tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- Controlar el contenido de C, S y P en el material base y en el aporte
- Una relación Mn/S superior a 20 anula el efecto desfavorable del azufre
- El contenido de fósforo debe limitarse a 0.04 %
- La relación Mn/Si mantenerla menor a 3,5
- Los electrodos a utilizar deben ser del tipo básico, ya que tiene propiedades que realizan una acción limpiante en el material base

Una grieta característica producto de fisuración en caliente (centro del cordón), se muestra en la figura siguiente; estas grietas pueden también aparecer en la ZAC.

Figura 8. **Fisuración en caliente**



Fuente: <http://es.scribd.com/14475/d/61152178-Fisuracion-en-caliente>.

Consulta: septiembre 2012.

4.4.2. Fisuración en frío

Dentro de las fallas más comunes que se presentan en la soldadura, está la fisuración en frío, dentro de la fisuración en frío se puede distinguir una serie de tipos de fisuración, de acuerdo con los diferentes mecanismos que inducen fragilización y posterior agrietamiento en la unión soldada. A diferencia de la fisuración en caliente esta se produce generalmente por debajo de los 300°C.

Se manifiesta por la aparición de fisuras inmediatamente o transcurridos minutos, y en algunos casos, hasta horas o días después de completada la soldadura. Estas fisuras pueden presentarse en el cordón de soldadura o en la ZAC del material base.

Las causas más importantes de la fisuración en frío en las uniones soldadas de los aceros al carbono y de baja aleación son:

- Fragilización por endurecimiento de la zona afectada por el calor (ZAC)
- Formación de tensiones residuales en el cordón de soldadura
- Fragilización por hidrógeno

4.4.2.1. Fragilización por endurecimiento de la ZAC

El riesgo de fragilización de la ZAC aparece cuando, como consecuencia del ciclo térmico y especialmente en la etapa de enfriamiento, se producen microconstituyentes frágiles en ella. El constituyente más peligroso es, en ese sentido, la martensita. La presencia de martensita en la ZAC reduce sensiblemente la tenacidad del acero en esta región y favorece su rotura frágil.

Como se sabe, la martensita se forma en el acero cuando este es enfriado rápidamente desde temperaturas elevadas (> 723°C) donde está presente la austenita (ver diagrama hierro carbono, figura 3).

Un acero alcanzará un mayor nivel de endurecimiento en la ZAC (mayor riesgo de fisuración) cuanto:

- Más alto sea su porcentaje de carbono
- Más elevado sea su contenido de elementos aleantes
- Más elevada sea la velocidad de enfriamiento del cordón de soldadura

Para predecir la dureza máxima que pueda tener un acero se puede recurrir a la siguiente fórmula:

$$\text{Dureza máxima (HV)} = 939 \%C + 284$$

Este resultado será la dureza máxima que se podría obtener teóricamente, después de una transformación 100% martensítica debida a un enfriamiento rápido bajo condiciones ideales. (HV = dureza Vickers)

Para predecir la dureza máxima alcanzada en la ZAC de una unión soldada se puede utilizar la siguiente fórmula:

$$\text{Dureza máxima en la ZAC (HV)} = 1200 \text{ Ce} - 200$$

Con las fórmulas anteriores y los criterios expuestos en la siguiente tabla, se puede estimar el riesgo que presenta una unión de presentar una fisuración en frío, producto de un endurecimiento de la ZAC.

Tabla III. **Criterios para evaluar el riesgo de fisuración en frío por endurecimiento de la ZAC**

Dureza máxima	Máximo % martensita presente	Riesgo de fisuración en frío
> 450HV	> 70%	Muy probable
De 350 HV a 450 HV	50-70%	Probable
De 280 HV a 350 HV	30-50%	Poco probable
< 280HV	< 30%	Sin riesgo

Fuente: <http://es.scribd.com/doc/68736617/Tema-4-Fisuracion-en-frío-y-en-caliente>.

Consulta: enero de 2013.

4.4.2.2. Fragilización por hidrógeno

Dentro de las fallas consideradas como fisuras en frío está la fisuración asistida por hidrógeno, la cual se produce por el excesivo contenido de hidrógeno disuelto en el área de la soldadura. El hidrógeno difusible consiste simplemente en hidrógeno atómico en solución intersticial en la red cristalina de un acero. El origen de este hidrógeno es típicamente el consumible de soldadura. En el caso de electrodos manuales, es la humedad contenida en el revestimiento que al consumirse en el arco libera moléculas de agua que se descomponen produciendo hidrógeno molecular H_2 y oxígeno, en el caso de metales con oxígeno atrapado, también se puede formar vapor de agua.

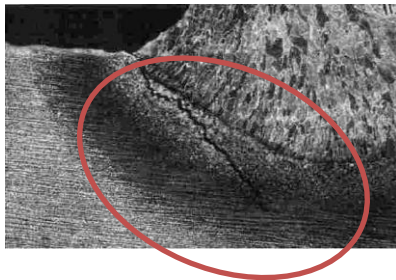
Las moléculas de vapor de agua o las moléculas de H_2 , son demasiado grandes para salir hasta la superficie y ejercen presiones muy altas que inician una fisura en la zona donde se encuentran atrapadas.

Las fisuras inducidas por hidrógeno, se inician luego de finalizada la soldadura con retardos de hasta dos semanas. Aceros de alta resistencia, secciones gruesas y piezas fuertemente restringidas son más susceptibles a este tipo de fisuración. Con estos materiales se recomienda utilizar un proceso y consumible de bajo hidrógeno y un correcto precalentamiento, control de temperatura entre pasadas de soldadura y postcalentamiento.

Estas fisuras pueden no ser detectadas fácilmente, pueden estar en la ZAC y bajo la superficie; esto significa que pueden no ser detectables por ensayos de tintas penetrantes o partículas magnéticas; dependiendo de su orientación pueden no ser visibles por radiografía y escapar a la detección por ultrasonido, aunque esta es quizá la mejor técnica para detectar fisuras de este tipo.

Si este tipo de fisuras no se detectan es altamente probable que fallen durante el servicio y siendo difícil su detección se debe realizar todo lo posible por evitar su formación. La figura siguiente ilustra una grieta en la ZAC de una soldadura de filete ocasionada por hidrógeno.

Figura 9. **Fisuración en frío**



Fuente: <http://es.scribd.com/doc/68736617/Tema-4-Fisuracion-en-frío-y-en-caliente>.

Consulta: febrero de 2013.

Dentro de las recomendaciones para evitar la fisuración asistida por hidrógeno se tienen los siguientes puntos:

- El uso del metal de aporte correcto.
- Almacenar siempre los electrodos recubiertos en un horno, una vez el envoltorio de los electrodos ha sido abierto.
- Limpiar los contaminantes de las superficies inmediatamente antes de soldar, por ejemplo aceite, óxido o pintura, son fuente de hidrógeno.
- Enfriamiento lento.

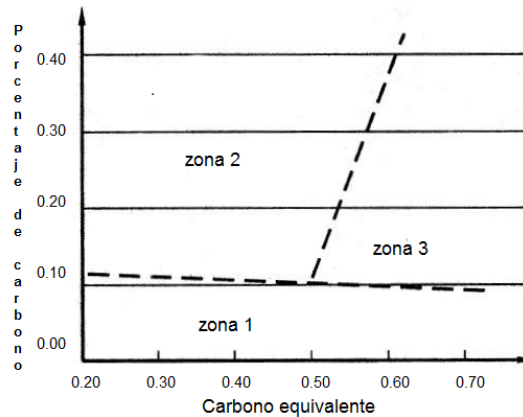
4.5. Diagrama de Graville

Con el contenido de carbono equivalente y los criterios básicos listados en la misma sección, se puede tener una idea de la soldabilidad de un acero; pero esta solo es una idea general, el diagrama de Graville es una herramienta útil para conocer o por lo menos dar una idea más clara de los cuidados que representará soldar un acero al relacionar el carbono equivalente y el contenido de carbono; este diagrama está dividido en tres zonas:

- Zona I: aceros de bajo carbono y bajo endurecimiento no susceptibles a fisuras.
- Zona II: aceros con mayor porcentaje de Carbono y bajo endurecimiento, el riesgo a fisuras en la ZAC puede ser evitado mediante el control de la velocidad de enfriamiento.
- Zona III: aceros con elevado porcentaje de carbono y alto endurecimiento y en todas las condiciones de soldadura pueden producir microestructuras susceptibles a fisuras.

El diagrama de Graville se ilustra en la figura siguiente:

Figura 10. Diagrama de Graville



Fuente: <http://es.scribd.com/doc/65719204/CUADERNO-Temperatura-de-Precaentamiento>. Consulta enero de 2013.

Por ejemplo, desde el punto de vista de la selección de parámetros de soldadura, este diagrama indicaría, que si por su composición química un acero se ubica en la zona II, su soldadura debe involucrar el uso de procesos de bajo hidrógeno y precalentamiento, mientras que si un acero es ubicado en la zona III, se deben aplicar procesos de bajo hidrógeno, precalentamiento y tratamientos térmicos postsoldadura.

4.6. Precalentamiento

Como se ha descrito en las secciones anteriores, uno de los aspectos más importantes al realizar una soldadura, es evitar en lo posible la formación de microestructuras martensíticas, debido a que estas son sumamente duras y frágiles, también se describió que esta estructura se consigue a través del enfriamiento rápido, o por lo menos no lo suficientemente lento, de un acero.

Una de las características de los metales es que poseen una gran capacidad de conducir calor, por lo que se aplica una alta cantidad de calor, como en un proceso de soldadura, la diferencia de temperaturas entre las sección soldada y el resto del material a temperatura ambiente ocasionará que el calor se distribuya desde las áreas soldadas rápidamente hacia el resto del material; esto puede provocar en aceros de alto contenido de carbono y aceros aleados que el enfriamiento de las soldaduras sea muy rápido para permitir una transformación que no involucre martensita.

En síntesis, el propósito principal del precalentamiento es retardar la velocidad de enfriamiento de la unión después de la soldadura. Un lento enfriamiento de la unión soldada, ayudará a prevenir la formación de factores indeseables: fragilidad, endurecimiento y sensibilidad al agrietamiento.

También se puede mencionar que permite que el hidrógeno se difunda fuera del metal de soldadura y reduce porosidades en la soldadura por presencia de humedad.

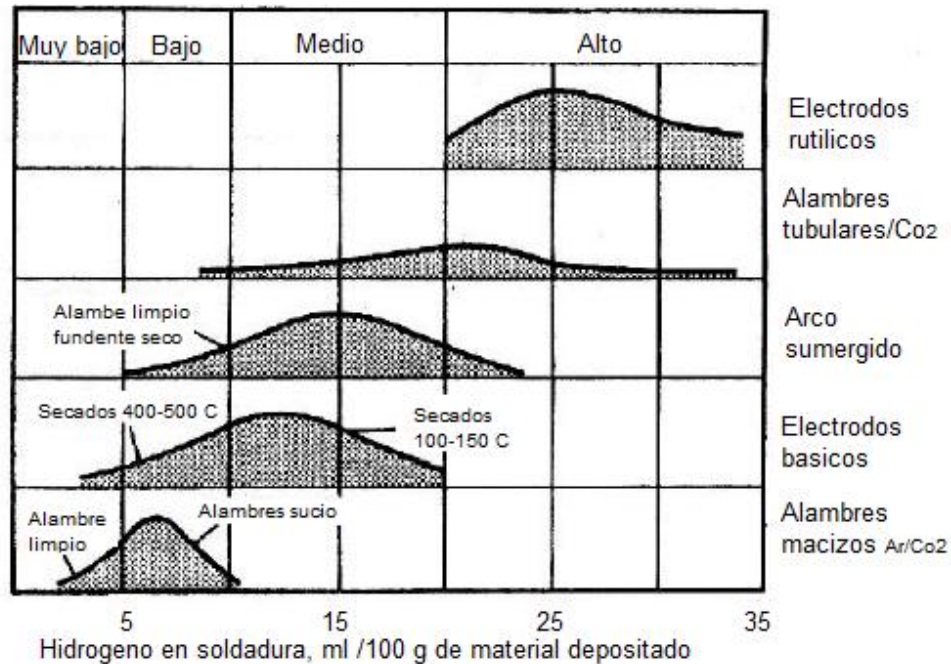
4.6.1. Nomograma de Coe

El nomograma de Coe se utiliza para determinar la temperatura de precalentamiento en procesos de soldadura por arco eléctrico de aceros al carbono – manganeso; este diagrama toma en cuenta la cantidad difusible de hidrógeno, el aporte térmico de la soldadura, el espesor de las juntas y el carbono equivalente.

- Hidrógeno difusible
 - Escala A: consumibles que aporten un metal de soldadura con tenores de Hidrógeno difusible mayor de 15 ml/100 gr, luego de un adecuado secado.
 - Escala B: consumibles que aporten un metal de soldadura con tenores de Hidrógeno difusible entre 10 y 15 ml/100 gr, luego de un adecuado secado.
 - Escala C: consumibles que aporten un metal de soldadura con tenores de Hidrógeno difusible entre 5 y 10 ml/100 gr, luego de secado.
 - Escala D: consumibles que aporten un metal de soldadura con tenores de hidrógeno difusible menor de 5 ml/100 gr, luego de un adecuado secado.

La cantidad de hidrógeno que aporta un consumible se puede estimar en la siguiente figura.

Figura 11. **Hidrógeno ml/100g de material depositado**



Fuente: <http://es.scribd.com/doc/65719204/CUADERNO-Temperatura-de-Pre calentamiento>.

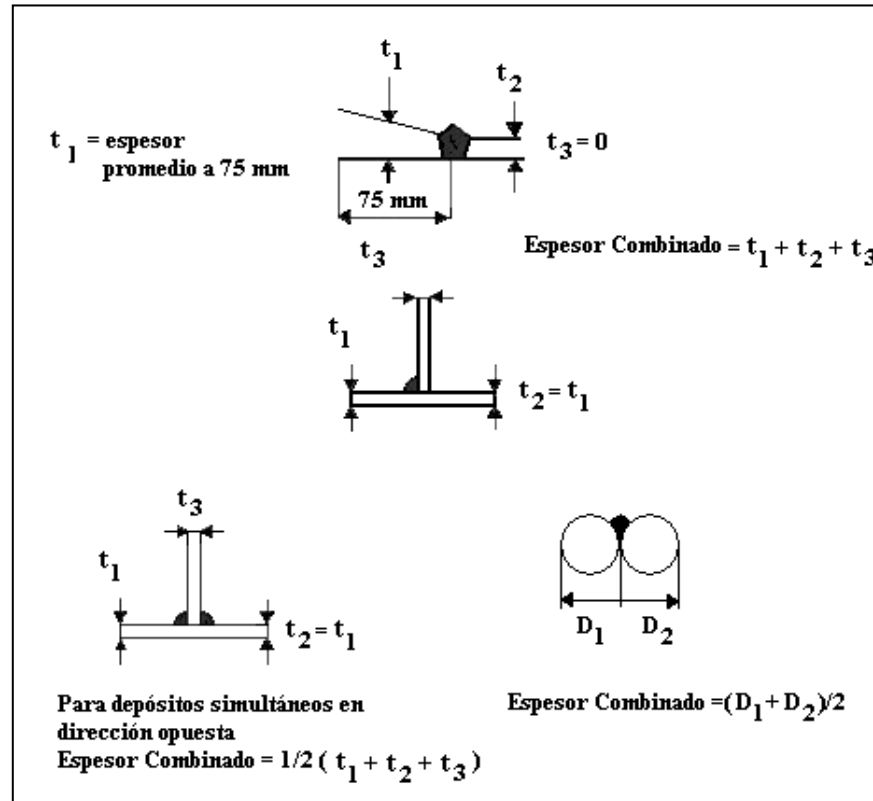
Consulta: febrero de 2013.

- Carbono equivalente:

$$C_e = C + \frac{\% V + \% Cr + \% Mo}{5} + \frac{\% Mn}{6} + \frac{\% Ni + \% Cu}{15}$$

- Espesor combinado: es un parámetro que toma en cuenta el tamaño de los caminos disponibles para la conducción de calor fuera de la soldadura en una distancia de 75 mm. En la figura siguiente se presentan parámetros para calcular este espesor combinado.

Figura 12. **Espesores combinados**



Fuente: <http://es.scribd.com/doc/65719204/CUADERNO-Temperatura-de-Precaentamiento>.
 Consulta: marzo de 2013.

La expresión utilizada para calcular los aportes de energía es la siguiente:

$$H = \frac{V * I}{w} * 10^{-3} \left[\frac{KJ}{mm} \right]$$

H = Energía de arco

V = Voltaje

I = Corriente

W = Velocidad de pasada en mm/seg

La corriente dependerá del diámetro del electrodo y del operario, siempre dentro de un rango dado por el fabricante; para fines de cálculo se utilizará un valor medio de 110 A.

El voltaje dependerá de la corriente, de la distancia de arco y de la velocidad de pasada, de tal manera se utilizará un voltaje de 25 amperios, que es un valor promedio y cumple con los fines de cálculo. La velocidad de pasada, se estima en 3.5 mm/seg., esta es una velocidad típica de deposición para electrodos E-7018, y puede ser extendida al E-9018, siendo estos de características de deposición similares.

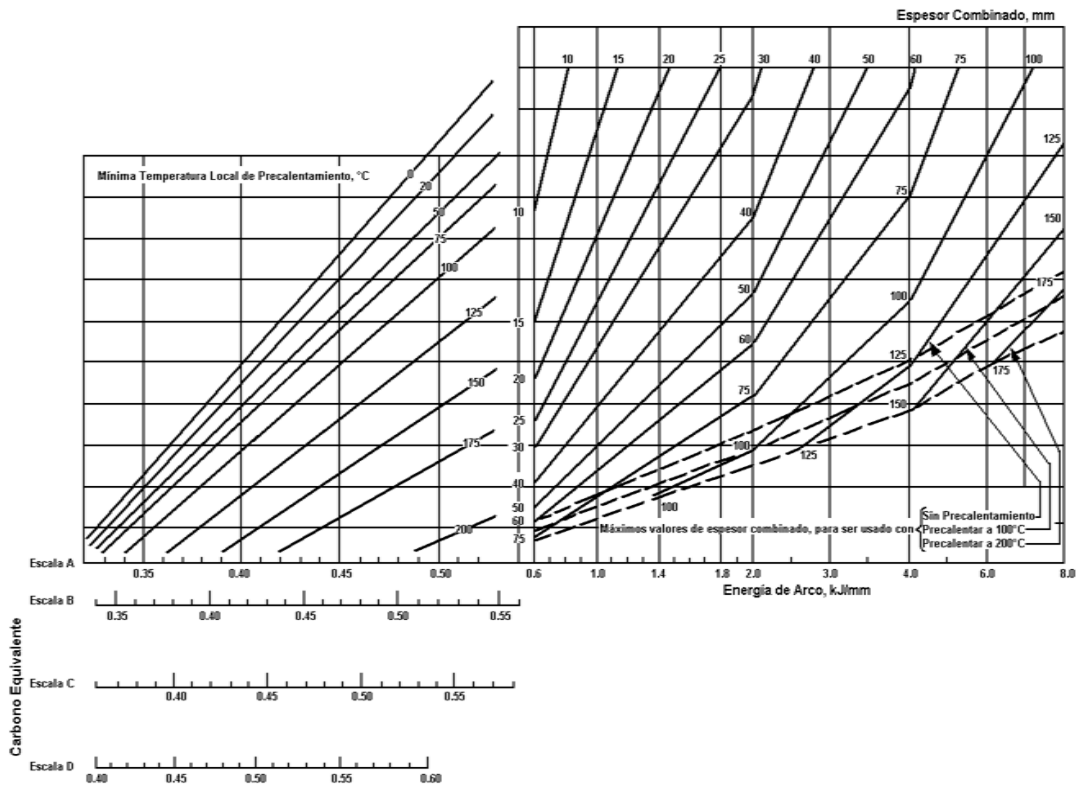
Al utilizar del nomograma, calculado el valor de H, se busca dicho valor en la parte derecha inferior del nomograma y se levanta una línea vertical hasta interceptar la línea correspondiente al espesor combinado de la junta en consideración. Identificado el punto de intersección, se traza por el mismo una línea horizontal que extendida hasta la parte izquierda del nomograma, corta las líneas que corresponden a las diferentes temperaturas de precalentamiento, la temperatura de precalentamiento a adoptar queda determinada levantando una vertical por el valor del carbono equivalente que se lee en el eje de horizontal.

El punto de intersección de esta vertical con la horizontal previamente trazada determina tal temperatura. Puede observarse que existen cuatro escalas diferentes para ubicar el carbono equivalente.

Estas escalas dependen de los electrodos utilizados, y pueden ser obtenidos con los criterios descritos al principio de la sección y la figura 11.

El Nomograma de Coe se ilustra en la figura siguiente:

Figura 13. **Nomograma de Coe**



Fuente: <http://es.scribd.com/doc/65719204/CUADERNO-Temperatura-de-Pre calentamiento>.

Consulta: marzo de 2013.

La norma AWS D1.4, lista los pre calentamientos recomendados para los aceros de refuerzo acordes a su diámetro y su carbono equivalente; cabe mencionar que a criterio propio, los valores de pre calentamiento dados presentan una variación muy amplia en los valores frontera de carbono equivalente; por ejemplo, al cambiar de 0.55% a 0.56% para las barras No. 7 a No.11, la variación en pre calentamiento es de 80°C y el valor de C_e es muy cercano.

Tabla IV. **Pre calentamiento recomendado por AWS D1.4**

Carbono equivalente Ce	Tamaño de la barra	Mínima temperatura °C
<i>Hasta 0.4 %</i>	Hasta No.11	Sin pre calentamiento
	No.14 y No.18	10
0.41-0.45%	Hasta No.11	Sin pre calentamiento
	No.14 y No.18	40
0.46-0.55%	Hasta No.6	Sin pre calentamiento
	No.7 - No.11	10
	No.14 y No.18	90
0.56-0.65%	Hasta No.6	40
	No.7 - No.11	90
	No.14 y No.18	150
0.66-0.75%	Hasta No.6	150
	No.7 - No.18	200
Arriba de 0.75%	No.7 - No.18	260

Fuente: Norma AWS D1.4, sección 5. p. 98.

4.7. Electrodo de bajo hidrógeno

Como se ha mencionado, el hidrógeno es uno de los principales responsables de la fisuración en frío de una soldadura; la susceptibilidad a este tipo de fisuras depende en gran medida del material que se está soldando, siendo el origen de este hidrógeno principalmente los electrodos. El objetivo de los electrodos de bajo hidrógeno es proporcionar la menor cantidad de hidrógeno posible a una soldadura, pero esto es posible únicamente si los electrodos se encuentran almacenados de una manera correcta, lejos de humedad y si han sido secados en horno, previo a su utilización.

Como se mencionó en el párrafo anterior, los electrodos de bajo hidrógeno deben ser secados o resecados (si estuvieron en contacto con la atmósfera por más de un determinado número de horas) en un horno antes de su empleo, siempre que en las aplicaciones haya requerimientos en el contenido de hidrógeno del metal aportado y/o calidad radiográfica. De ninguna manera se podrán utilizar electrodos que se hayan mojado.

La norma AWS D1.4, establece que para la utilización de electrodos de bajo hidrógeno en la soldadura de barras de refuerzo se deben respetar los siguientes parámetros entre otros:

- Se deben comprar los electrodos en envases sellados herméticamente.
- Al sacar los electrodos del empaque o de un horno de almacenamiento o de horneado de secado, los electrodos no pueden estar en contacto con la atmósfera por más de 4 horas, para los E-7018 (especificado según norma para soldar acero de refuerzo grado 40) y 1 hora para los E-9018-X (electrodo especificado según norma para acero de refuerzo grado 60). Este parámetro refleja la importancia que brindan las normas al hidrógeno contenido en los electrodos, y es propio mencionar que esta práctica no se realiza normalmente en nuestro ámbito.
- Los electrodos expuestos por más tiempo que lo permitido deben ser re-horneados por una hora a una temperatura entre 370°C y 430°C (esto para los electrodos E-9018-X)

4.8. Electrodo, E-7018 Norma AWS A5.1, E-7018-X, E-8018-X y E-9018-X, norma AWS A.5.5

Del título de esta sección, resulta evidente que estos electrodos son básicamente del mismo tipo, pero con resistencias diferentes, el número 8 del final, se refiere a que son electrodos con recubrimiento básico, de bajo hidrógeno; la X que está después de los dígitos, coloca una letra extra, que identifica características especiales, ya que estos electrodos son de alma de acero de baja aleación, y los regula la norma AWS-A5.5; mientras que los E-7018 son electrodos con alma de acero al carbono simple y los regula la norma AWS-A 5.1.

Se toma en cuenta la descripción del electrodo E-7018, ya que este es el electrodo que comúnmente se utiliza para soldar acero grado 60 en nuestro medio; aunque según la norma AWS D1.4 este electrodo es permitido solamente para soldar aceros A615 grado 40, ya que es un electrodo de acero al carbono simple, que a pesar de tener una resistencia elevada, no puede garantizar las soldaduras en un acero grado 60, ya que en primera instancia su resistencia última teórica o nominal (70,000 psi por norma A 5.1) no cumple con el 1.25 f'y (75,000 psi para grado 60) que exige el ACI para uniones soldadas, el punto de fluencia del E-7018 es de alrededor de 58,000 psi; 2,000 psi menos que el punto de fluencia teórico del acero grado 60.

Tampoco presenta una aleación adecuada en el alma del electrodo, ya que los electrodos recomendados presentan una composición química distinta, que les da características especiales; derivado de esto se considera que no es justificable bajo ningún argumento la utilización de electrodo E-7018 para soldar aceros A615 grado 60.

Los electrodos E-7018-X, E-8018-X y E-9018-X son electrodos con alma de acero de baja aleación y son de características químicas diferentes a un electrodo E-7018.

Estos electrodos de baja aleación son los recomendados para la soldadura de los aceros de refuerzo; vale la pena recalcar que el único electrodo recomendado para el acero grado 60, es el E-9018-X; pero en este trabajo se incluyó un breve descripción de todos los demás, como parámetro de comparación ya que para otros grados de resistencia sí son permitidos.

En la tabla V, pueden observarse los electrodos permitidos para cada tipo de aleación disponible en el mercado mundial para aceros de refuerzo de acuerdo a la norma AWS D1.4,

En Guatemala solamente se producen las aleaciones A615 grado 40 y grado 60, además de estos dos grados existen aceros de refuerzo grado 50 y grado 75; este último aparece en otra tabla que no se incluye en este trabajo, de igual manera cabe mencionar que el grado 75 es prohibido por el ACI para edificaciones en zonas sísmicas, como es el caso de nuestro país; esto derivado del hecho que por el alto contenido de carbono y aleantes necesarios para obtener tan alta resistencia, este tipo de aceros no presentan una plataforma plástica.

La plataforma plástica es necesaria para poder presentar las grietas en el concreto de los elementos estructurales y así poder identificar una sobrecarga, o en caso de un sismo, permitir que el acero de refuerzo plastifique y redistribuya en cierta manera los esfuerzos para evitar que la estructura colapse.

En la tabla siguiente se puede ver que los electrodos recomendados para la soldadura de los aceros A 615 grado 60, son todos de una resistencia la fluencia estimada de 77,000 psi y una resistencia última de 90,000 psi; además de ser todos electrodos de baja aleación.

Tabla V. **Electrodos recomendados por AWS D1.4 según el grado del acero a soldar**

		Especificaciones del acero				Requerimientos de material de aporte (electrodo)				
		Resistencia mínima a fluencia		Resistencia mínima a tensión		Tipo de electrodo	Resistencia a fluencia		Resistencia a tensión	
		Ksi	Mpa	Ksi	Mpa		Ksi	Mpa	Ksi	Mpa
ASTM A615	GRADO 40	40	-	70	-	SMAW AWS A 5.1 Y A5.5	53-72	365-496	70	482
						E7015, E7016, E7018, E7028				
ASTM A615M	GRADO 300	-	300	-	500	E7015-X, E7016-X, E-7018-X	57-60	390-415	70-75	480-520
ASTM A617	GRADO 40	40	-	70	-	GMAW AWS A5.18	58	400	70	480
ASTM A617M	GRADO 300	-	300	-	500	ER 70S-X				
						FCAW AWS A5.20	58	400	70	480
						E7XT-X (Excepto -2,-3,-10,-13,-14,-GS)				
ASTM A616	GRADO 50	50	-	80	-	SMAW AWS A5.5	67	460	80	550
ASTM A616M	GRADO 350	-	350	-	550	E8015-X, E8016-X E8018-X				
ASTM A706	GRADO 60	60	-	80	-	GMAW AWS A5.28	68	470	80	550
ASTM A706	GRADO 420	-	420	-	550	ER 80S-X				
						FCAW AWS A5.29	68	470	80-100	550-690
						E8TX-X				
ASTM A615	GRADO 60	60	-	90	-	SMAW AWS A5.5	77	530	90	620
ASTM A615M	GRADO 420	-	420	-	600	E9015-X, E9016-X E-9018-X				
ASTM A616	GRADO 60	60	-	90	-	GMAW AWS A5.28	78	540	90	620
ASTM A616M	GRADO 420	-	420	-	600	ER90SX-X				
ASTM A617	GRADO 60	60	-	90	-	FCAW AWS A5.29	78	540	90-110	620-760
ASTM 617M	GRADO 420	-	420	-	600	E9TX-X				

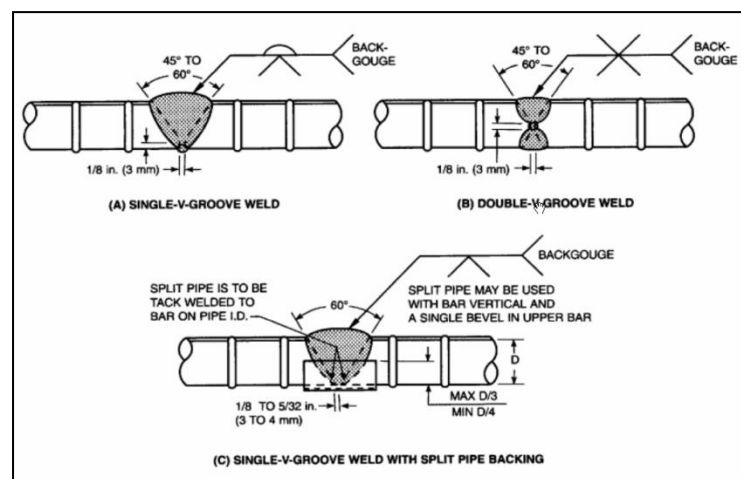
Fuente: Norma AWS D1.4, sección 5. p. 100.

4.9. Biseles

Los biseles en soldadura son necesarios para dar el área transversal adecuada de material depositado, resulta obvio que si solo se colocaran dos segmentos de barras en este caso, cara a cara sin el bisel, la soldadura solamente podría ser de una manera superficial; realizando biseles se procede a rellenar todo el volumen con soldadura, lo que asegura una unión satisfactoria; el ángulo recomendado para los biseles es entre 45° y 60° , esto, como se mencionó, para evitar formas angostas, que propician la fisuración en caliente.

La norma AWS D1.4, permite tres biseles, en V, en X y en V con respaldo, en la soldadura de las barras se realizarán biseles en X, debido a que este tipo de bisel compensa las contracciones que ejercen las soldaduras. Los biseles permitidos por AWS D1.4 se ilustran a continuación

Figura 14. Biseles permitidos en unión de barras a tope



Fuente: Norma AWS D1.4, sección 3. p. 65

4.10. Requerimientos ACI para uniones soldadas

El ACI en la sección 12.14.3.3, requiere que la toda soldadura debe estar de acuerdo con la norma AWS D1.4, y en la sección 12.14.3.4, estipula que un empalme soldado, debe desarrollar como mínimo $1.25 f_y$ como resistencia última.

5. PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

5.1. Equipo a utilizar

El equipo a utilizar en para una soldadura se muestran en las figuras 15 a la 20.

Figura 15. **Máquina de soldar 220-440 V**



Fuente: Talleres Metal S.A.

Figura 16. **Pulidora y disco de corte**



Fuente: Talleres Metal S.A.

Figura 17. **Equipo de oxicorte, tanques de oxígeno y acetileno**



Fuente: Talleres Metal S.A.

Figura 18. **Pirómetro digital**



Fuente: Talleres Metal S.A.

Figura 19. Cepillo de alambre



Fuente: Talleres Metal S.A.

Figura 20. Horno eléctrico de resistencias



Fuente: Talleres Metal S.A.

5.2. Composición química de las barras corrugadas

La composición química de las barras corrugadas grado 60 producidas bajo la norma A 615, que se ensayarán, es la siguiente,

Tabla VI. **Composición química de barras corrugadas No. 8 A-615 grado 60**

Mue	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Mo	Cu	Sn
1	0,361	1,229	0,193	0,045	0,012	0,080	0,047	0,014	0,225	0,024
2	0,365	1,220	0,186	0,041	0,012	0,077	0,048	0,014	0,222	0,023
3	0,359	1,237	0,199	0,048	0,013	0,084	0,047	0,014	0,226	0,025
4	0,367	1,238	0,196	0,048	0,013	0,080	0,047	0,014	0,224	0,025
5	0,359	1,236	0,192	0,049	0,013	0,081	0,047	0,014	0,225	0,024
Prom	0,362	1,232	0,193	0,046	0,013	0,080	0,047	0,014	0,224	0,024

Fuente: elaboración propia.

5.3. Composición química de los electrodos a utilizar de acuerdo a la norma ANSI-AWS A5.5

Tabla VII. **Composición química electrodo E-7018**

C	Mn	Si	S	P	Cr	Mo
0,012	0,90	0,80	0,03	0,03	0	0,4 – 0,65

Fuente: ANSI AWS 5.5.

Tabla VIII. **Composición química electrodo E-9018B3**

C	Mn	Si	S	P	Cr	Mo
0,05-0,012	0,90	0,80	0,03	0,03	2 – 2,5	0,9 -1,20

Fuente: ANSI AWS 5.5.

5.4. **Determinación del carbono equivalente y soldabilidad**

El primer paso para determinar la soldabilidad de un acero es la determinación del carbono equivalente.

$$Ce = C + \frac{\%V + \%Cr + \%Mo}{5} + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15}$$

$$Ce = 0.362 + \frac{0.047 + 0.014}{5} + \frac{1.23}{6} + \frac{0.080 + 0.224}{15} = 0.60$$

La AWS D 1.4 propone la ecuación:

$$Ce = \%C + \frac{\%Mn}{6}$$

$$Ce = 0.362 + \frac{1.23}{6} = 0.57$$

Como puede observarse, a pesar de que el carbono equivalente difiere en ambas fórmulas, ambos resultados son altos bajo parámetros de soldadura; se utilizará esta última por ser esta norma, la que rige la soldadura de estos aceros.

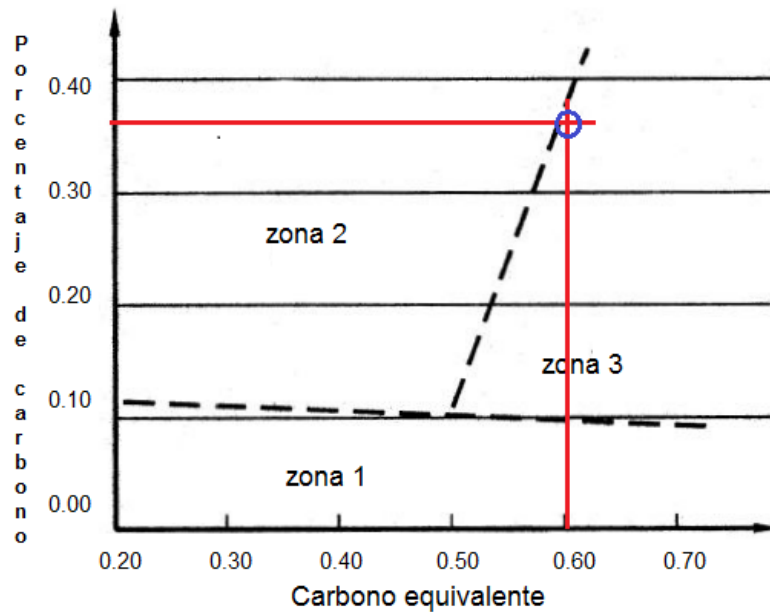
A partir de las características del carbono equivalente, se tienen los criterios generales:

- Hasta 0.25% C: soldable, no es necesario tomar mayores consideraciones al momento de soldar.
- De 0.25% C a 0.40% C: medianamente soldables, es recomendable tomar precauciones y consideraciones técnicas previo a soldar.
- Por encima de 0.40% C: poco soldables, es indispensable tomar precauciones y consideraciones técnicas, previo a soldar.

De aquí, se tiene un primer criterio general, donde se verifica que la aleación A 615 es poco soldable, y es necesario tomar precauciones previas al realizar cualquier operación de soldadura.

Se logra delimitar un poco más los criterios anteriores a través del diagrama de Graville, diagrama que relaciona el contenido de carbono y el carbono equivalente. El círculo azul señala el punto donde está ubicada la aleación de interés.

Figura 21. **Utilización del diagrama de Graville para la aleación específica**



Fuente: <http://es.scribd.com/doc/65719204/CUADERNO-Temperatura-de-Precaentamiento>.
Consulta: marzo de 2013.

Se define la zona 3 como zona de aceros difícilmente soldables, aceros con elevado porcentaje de carbono y alto endurecimiento y en todas las condiciones de soldadura pueden producir microestructuras susceptibles a fisuras.

La fragilización por endurecimiento de la ZAC se determina de manera estimada a través de la siguiente fórmula:

$$\text{Dureza máxima (HV)} = 939 \%C + 284$$

$$\text{Dureza máxima (HV)} = 939 (0.36) + 284 = 622.04 \text{ HV}$$

Para predecir la dureza máxima alcanzada en la ZAC de una unión soldada se puede utilizar la siguiente fórmula:

$$\text{Dureza máxima en la ZAC (HV)} = 1200 \text{ Ce} - 200$$

$$\text{Dureza máxima en la ZAC (HV)} = 1200 (0.60) - 200 = 520 \text{ HV}$$

Tabla IX. **Criterios de riesgo de fisuración en frío**

Dureza máxima	Máximo % martensita presente	Riesgo de fisuración en frío
> 450HV	> 70%	Muy probable
De 350 HV a 450 HV	50-70%	Probable
De 280 HV a 350 HV	30-50%	Poco probable
< 280HV	< 30%	Sin riesgo

Fuente: ANSI AWS 5.5.

De tal manera, la aleación A615 producida en Guatemala, evaluada bajo los criterios metalúrgicos propuestos, es un acero que conlleva una alta probabilidad de fisuración, y por ende, donde se deben de tomar medidas y cuidados especiales si se realizaran uniones soldadas.

5.5. Determinación de la temperatura de precalentamiento

La temperatura de precalentamiento se determinará a través de nomograma de Coe. El primer parámetro de consideración en él, es la cantidad de hidrógeno que aportan los electrodos utilizados.

A pesar que los electrodos E-7018 y E -9018, son de bajo hidrógeno, es propio mencionar, que en nuestro medio no se le da importancia a este aspecto; un electrodo de bajo hidrógeno, debe ser tratado bajo condiciones de almacenamiento muy especiales; estas condiciones no se cumplen en la mayoría de casos, ni siquiera por parte de los distribuidores, quienes se supone son personal especializado.

El carbono equivalente fue calculado como 0.60.

El espesor combinado, al ser una barra en unión a tope será igual al diámetro de la barra, es decir 1" 25.4 mm.

El aporte de energía será calculado a través de:

$$H = \frac{V * I}{w} * 10^{-3} \left[\frac{KJ}{mm} \right]$$

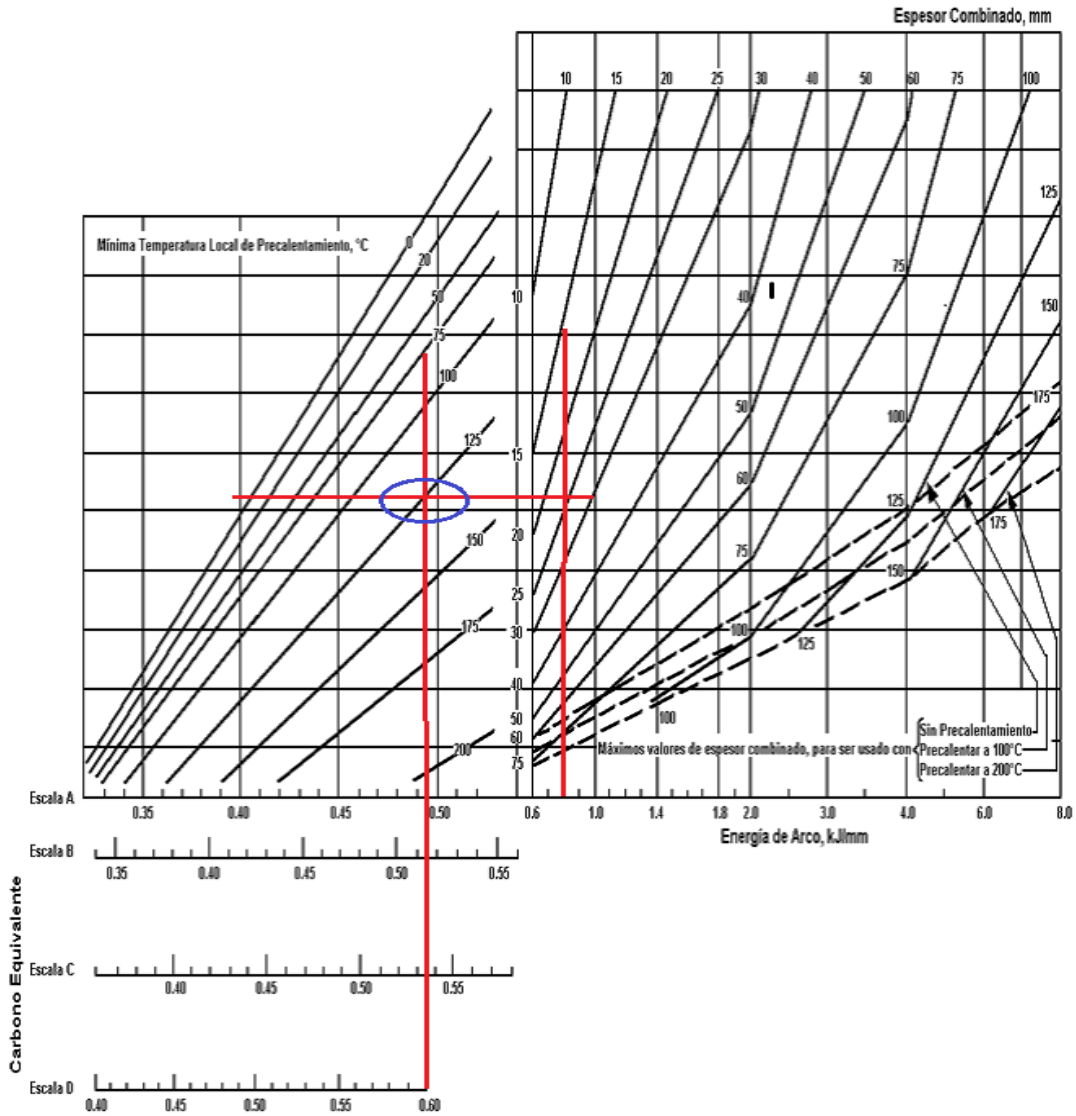
H = Energía de arco
 V = Voltaje
 I = Corriente
 W = Velocidad de pasada en mm/seg

Con los valores dados anteriormente:

$$H = \frac{110 * 25}{3.5} * 10^{-3} = 0.785 \text{ K j / mm}$$

Evaluando estos parámetros en el monograma de Coe (figura 22), se obtiene una temperatura de precalentamiento de 125 ° C.

Figura 22. Evaluación en nomograma de Coe



Fuente: <http://es.scribd.com/doc/65719204/CUADERNO-Temperatura-de-Pre calentamiento>.

Consulta: febrero de 2013.

5.6. Elaboración del bisel

Se realizó un bisel en X a 60° como se mencionó anteriormente, para ello se utilizó una pulidora con disco de corte y un banquillo de trabajo como se muestra en las figuras siguientes:

Figura 23. **Elaboración del bisel con pulidora**



Fuente: Centro de Investigaciones, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 24. **Bisel en X realizado a la barra A**



Fuente: Talleres Metal S.A.

Figura 25. **Bisel en X realizado a la barra B**



Fuente: Talleres Metal S.A.

5.7. **Pre calentamiento con antorcha**

El pre calentamiento dado a las barras que se soldarán con este parámetro, se realizó con equipo de oxicorte.

Figura 26. **Pre calentamiento con antorcha**



Fuente: Centro de Investigaciones, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

5.8. Control de temperatura

El control de temperatura para las probetas realizadas bajo el parámetro de precalentamiento, se realizó con un pirómetro digital; la temperatura de precalentamiento se estimó en 125°; esta es la temperatura mínima a la que deberá estar el metal cuando se realizan las soldaduras; el instante crítico son los primeros cordones, ya que después de estos, el calor aportado por la soldadura es suficiente para mantener dicha temperatura.

Figura 27. Temperatura de precalentamiento



Fuente: Talleres Metal, S.A.

Figura 28. **Temperatura entre pasadas**



Fuente: Talleres Metal S.A.

5.9. **Aplicación de soldadura**

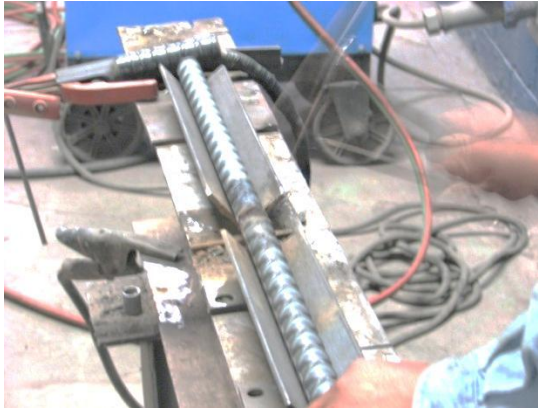
En las figuras 29 a 34 se muestra el momento en el cual se aplica la soldadura a una barra de acero.

Figura 29. **Banco de trabajo**



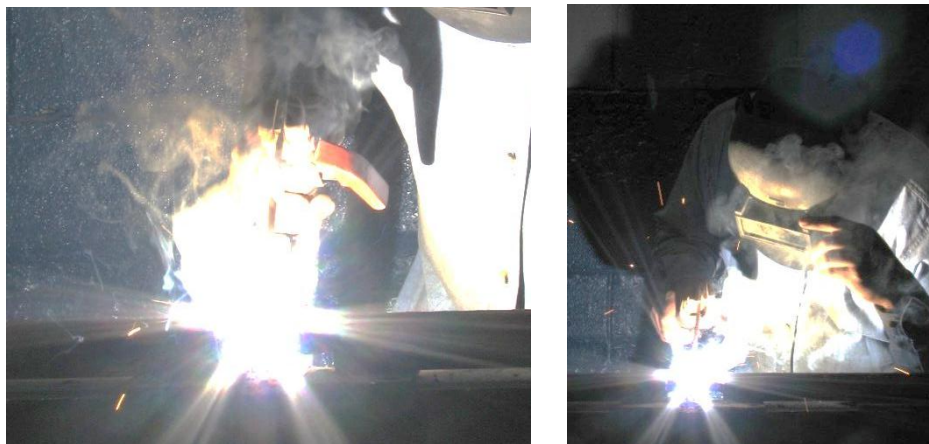
Fuente: Talleres Metal S.A.

Figura 30. **Barras en banco**



Fuente: Talleres Metal S.A.

Figura 31. **Soldadura de las barras**



Fuente: Centro de Investigaciones, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 32. **Limpieza de escoria y porosidades entre pasadas**



Fuente: Talleres Metal S.A.

Figura 33. **Barras en proceso de soldadura**



Fuente: Talleres Metal S.A.

Figura 34. **Barras soldadas**



Fuente: Talleres Metal S.A.

6. ENSAYO A TENSION DE BARRAS SOLDADAS

6.1. Ensayos de tracción en máquina universal

Se realizó el ensayo a tensión de 42 probetas soldadas bajo distintos parámetros. Estos se listan a continuación en la tabla X.

Tabla X. **Probetas ensayadas**

No. Lote	Parámetros de soldadura	Cantidad
Lote A	Electrodo E-7018 sin secar y probeta sin precalentamiento	5
Lote B	Electrodo E-7018 seco y probeta sin precalentamiento	5
Lote C	Electrodo E-7018 sin secar y probeta con precalentamiento	5
Lote D	Electrodo E-9018 sin secar y probeta sin precalentamiento	5
Lote E	Electrodo E-9018 seco y probeta sin precalentamiento	5
Lote F	Electrodo E-9018 sin secar y probeta con precalentamiento	5
Lote G	Electrodo E-9018 seco y probeta con precalentamiento	10
Lote H	Barras sin soldadura	2
	TOTAL	42

Fuente: elaboración propia.

En la fotografía siguiente se aprecia las probetas identificadas, previo a su ensayo.

Figura 35. **Probetas identificadas**



Fuente: Talleres Metal S.A.

La máquina universal utilizada para realizar los ensayos a tensión se ilustra en la figura siguiente:

Figura 36. **Máquina universal A**



Fuente: Talleres Metal S.A.

Las características físicas generales, identificación y parámetros de soldadura de las probetas se listan en la tabla XI.

Tabla XI. **Propiedades físicas de probetas ensayadas**

Lote A			Electrodo E-7018 sin secar y probeta sin precalentamiento			
<i>No.</i>	Longitud	Peso (kg)	Peso lineal (Kg/m)	Espaciamiento corruga (cm)	Ancho ribete (mm)	Altura corruga (mm)
A.1	0,694	2,702	3,893	23,9	3,63	2,06
A.2	0,698	2,631	3,769	24	3,805	2,01
A.3	0,797	3,46	4,341	24	3,795	2,01
A.4	0,8004	3,152	3,938	23,9	3,815	1,92
A.5	0,8	3,168	3,960	24,1	3,635	1,95
Lote B			Electrodo E-7018 seco y probeta sin precalentamiento			
<i>No.</i>	Longitud	Peso (kg)	Peso lineal (Kg/m)	Espaciamiento corruga (cm)	Ancho ribete (mm)	Altura corruga (mm)
B.1	0,805	3,16	3,925	24	3,71	1,98
B.2	0,805	3,132	3,891	23,9	3,725	2,02
B.3	0,804	3,138	3,903	23,9	3,675	2,03
B.4	0,803	3,128	3,895	23,8	3,635	2,05
B.5	0,803	3,14	3,910	23,8	3,75	1,98
Lote C			Electrodo E-7018 sin secar y probeta con precalentamiento			
<i>No.</i>	Longitud	Peso (kg)	Peso lineal (Kg/m)	Espaciamiento corruga (cm)	Ancho ribete (mm)	Altura corruga (mm)
C.1	0,798	3,132	3,925	24	3,78	1,99
C.2	0,8	3,12	3,900	23,9	3,775	1,95
C.3	0,803	3,158	3,933	23,9	3,715	1,97
C.4	0,804	3,136	3,900	24	3,725	1,99
C.5	0,804	3,142	3,908	24,1	3,695	1,99

Continuación de la tabla XI.

Lote D			Electrodo E-9018 sin secar y probeta sin precalentamiento			
<i>No.</i>	Longitud	Peso (kg)	Peso lineal (Kg/m)	Espaciamiento corruga (cm)	Ancho ribete (mm)	Altura corruga (mm)
D.1	0,803	3,13	3,898	23,9	3,81	2,06
D.2	0,803	3,128	3,895	24	3,825	2,03
D.3	0,803	3,138	3,908	23,8	3,715	2,03
D.4	0,799	3,138	3,927	23,9	3,67	2
D.5	0,801	3,14	3,920	23,9	3,81	1,99
Lote E			Electrodo E-9018 seco y probeta sin precalentamiento			
<i>No.</i>	Longitud	Peso (kg)	Peso lineal (Kg/m)	Espaciamiento corruga (cm)	Ancho ribete (mm)	Altura corruga (mm)
E.1	0,802	3,15	3,928	23,9	3,76	2,05
E.2	0,801	3,158	3,943	24	3,705	2
E.3	0,801	3,134	3,913	23,9	3,79	1,95
E.4	0,802	3,128	3,900	23,8	3,83	1,99
E.5	0,798	3,12	3,910	24	3,595	2,05
Lote F			Electrodo E-9018 sin secar y probeta con precalentamiento			
<i>No.</i>	Longitud	Peso (kg)	Peso lineal (Kg/m)	Espaciamiento corruga (cm)	Ancho ribete (mm)	Altura corruga (mm)
F.1	0,807	3,152	3,906	23,7	3,765	2,01
F.2	0,808	3,156	3,906	23,8	3,635	1,99
F.3	0,804	3,138	3,903	24	3,645	1,96
F.4	0,803	3,136	3,905	24	3,675	1,91
F.5	0,805	3,146	3,908	23,8	3,715	2,02

Continuación de la tabla XI.

Lote G			Electrodo E-9018 seco y probeta con precalentamiento			
<i>No.</i>	Longitud	Peso (kg)	Peso lineal (Kg/m)	Espaciamiento corruga (cm)	Ancho ribete (mm)	Altura corruga (mm)
G.1	0,8	3,14	3,925	23,8	3,675	2,06
G.2	0,802	3,128	3,900	24	3,745	2
G.3	0,803	3,15	3,923	23,8	3,695	1,96
G.4	0,802	3,152	3,930	24	3,695	1,94
G.5	0,809	3,178	3,928	23,9	3,585	2,01
G.6	0,806	3,158	3,918	23,8	3,556	1,96
G.7	0,807	3,154	3,908	24	3,565	1,94
G.8	0,801	3,142	3,923	24	3,735	2,02
G.9	0,8	3,152	3,940	23,9	3,675	1,95
G.10	0,803	3,12	3,885	23,8	3,695	2,03
Lote H			Barras sin soldadura			
<i>No.</i>	Longitud	Peso (kg)	Peso lineal (Kg/m)	Espaciamiento corruga (cm)	Ancho ribete (mm)	Altura corruga (mm)
H.1	0,4	3,14	1,590	24	3,63	1,905
H.2	0,4	3,128	1,547	24	3,63	1,905

Fuente: elaboración propia.

En la siguiente se ilustra una probeta colocada en la máquina universal durante la aplicación de carga.

Figura 37. **Máquina universal B**



Fuente: Talleres Metal S.A.

A continuación se ilustra el momento donde la probeta alcanza su punto de ruptura y en la figura 39, la probeta rota.

Figura 38. **Momento de ruptura en una de las probetas**



Fuente: Talleres Metal S.A.

Figura 39. **Probeta rota**



Fuente: Talleres Metal S.A.

En la figura 40 se aprecian las probetas ya ensayadas.

Figura 40. **Probetas ensayadas**



Fuente: Talleres Metal S.A.

6.2. **Resultados de los ensayos realizados**

Los resultados de los ensayos realizados se listan en la tabla siguiente; en dicha tabla, se lista el esfuerzo de fluencia en [psi] y [Mpa], el esfuerzo de ruptura o tensión en [psi] y [Mpa], el % de elongación y si la ruptura sucedió en la barra o en la soldadura, así como la distancia de la soldadura donde sucedió, cuando esta ocurrió en la barra.

Tabla XII. Resultados de las probetas ensayadas

Lote								
A Electrodo E-7018 sin secar y probeta sin precalentamiento								
No.	f'y		f'u		Elongación %	f'u / f'y	Ruptura en	D. (cm) Soldadura
	Mpa	(Psi)	Mpa	(Psi)				
A.1	553	80,278	663	96,136	8,09	1,20	Soldadura	-
A.2	478	69,273	717	104,031	17,00	1,50	Barra	10
A.3	414	59,995	619	89,724	12,00	1,50	Soldadura	-
A.4	474	68,776	644	93,454	10,00	1,36	Soldadura	-
A.5	451	65,392	684	99,245	18,00	1,52	Barra	10
Prom	474	68,743	665	96,518	13,02	1,41		
Lote								
B Electrodo E-7018 seco y probeta sin precalentamiento								
No.	f'y		f'u		Elongación %	f'u / f'y	Ruptura en	
	Mpa	(Psi)	Mpa	(Psi)				
B.1	452	65,604	655	94,968	10,00	1,45	Soldadura	
B.2	426	61,768	572	82,908	6,00	1,34	Soldadura	
B.3	455	65,953	628	91,112	7,00	1,38	Soldadura	
B.4	457	66,311	657	95,254	9,00	1,44	Soldadura	
B.5	453	65,678	643	93,278	8,00	1,42	Soldadura	
Prom	449	65,063	631	91,504	8,00	1,41		
Lote								
C Electrodo E-7018 sin secar y probeta con precalentamiento								
No.	f'y		f'u		Elongación %	f'u / f'y	Ruptura en:	
	Mpa	(Psi)	Mpa	(Psi)				
C.1	450	65,286	659	95,578	10,00	1,46	Soldadura	
C.2	458	66,420	668	96,910	10,00	1,46	Soldadura	
C.3	460	66,684	671	97,373	9,00	1,46	Soldadura	
C.4	484	70,242	623	90,314	8,00	1,29	Soldadura	
C.5	451	65,397	678	98,276	11,00	1,50	Soldadura	
Prom	461	66,806	660	95,690	9,60	1,43		

Continuación de la tabla XII.

Lote								
D Electrodo E-9018 sin secar y probeta sin precalentamiento								
No.	f'y		f'u		Elongación %	f'u / f'y	Ruptura en	D. (cm) Soldadura
	Mpa	(Psi)	Mpa	(Psi)				
D.1	449	65,112	686	99,480	16,00	1,53	Barra	14
D.2	458	66,467	682	98,895	10,00	1,49	Barra	1
D.3	469	68,079	689	99,922	18,00	1,47	Barra	17,5
D.4	462	66,989	694	100,619	15,00	1,50	Barra	11,5
D.5	453	65,685	685	99,341	14,00	1,51	Barra	11
Prom	458	66,466	687	99,651	14,60	1,50		11,00
Lote								
E Electrodo E-9018 seco y probeta sin precalentamiento								
No.	f'y		f'u		Elongación %	f'u / f'y	Ruptura en	D. (cm) Soldadura
	Mpa	(Psi)	Mpa	(Psi)				
E.1	465	67,492	701	101,715	18,00	1,51	Barra	19,5
E.2	459	66,506	690	100,051	15,00	1,50	Barra	19,8
E.3	457	66,296	689	99,871	17,00	1,51	Barra	16,3
E.4	458	66,433	687	99,584	11,00	1,50	Soldadura	-
E.5	457	66,291	689	99,987	13,00	1,51	Barra	12,5
Prom	459	66,604	691	100,242	14,80	1,51		17,03
Lote								
F Electrodo E-9018 sin secar y probeta con precalentamiento								
No.	f'y		f'u		Elongación %	f'u / f'y	Ruptura en:	D. (cm) Soldadura
	Mpa	(Psi)	Mpa	(Psi)				
F.1	456	66,209	688	99,741	13,00	1,51	Barra	11
F.2	468	67,842	686	99,533	13,00	1,47	Barra	10
F.3	458	66,472	690	100,117	16,00	1,51	Barra	20
F.4	469	68,011	687	99,702	12,00	1,47	Barra	10
F.5	472	68,468	690	100,026	18,00	1,46	Barra	14
Prom	465	67,400	688	99,824	14,40	1,48		13,00

Continuación de la tabla XII.

Lote								
G Electrodo E-9018 seco y probeta con precalentamiento								
No.	f'y		f'u		Elongación %	f'u / f'y	Ruptura en	D. (cm) Soldadura
	Mpa	(Psi)	Mpa	(Psi)				
G.1	458	66,495	690	100,116	14	1,51	Barra	11
G.2	456	66,157	687	99,649	17	1,51	Barra	18
G.3	468	67,919	704	102,091	13	1,50	Barra	10,5
G.4	461	66,804	677	98,119	8	1,47	Soldadura	-
G.5	461	66,804	692	100,425	18	1,50	Barra	15
G.6	457	66,279	687	99,573	18	1,50	Barra	21,5
G.7	457	66,239	689	99,961	18	1,51	Barra	22
G.8	456	66,124	685	99,406	17	1,50	Barra	19
G.9	459	66,632	690	100,064	19	1,50	Barra	22
G.10	450	65,246	689	99,870	17	1,53	Barra	20
Prom	458	66,470	689	99,927	15,90	1,50		
Lote								
H Barras sin soldadura								
No.	f'y		f'u		Elongación %	f'u / f'y	Ruptura en	D. (cm) Soldadura
	Mpa	(Psi)	Mpa	(Psi)				
H.1	415	60,150	714	103,597	16	1,72	-	-
H.2	415	60,129	698	101,300	15	1,68	-	-
Prom	415	60,140	706	102,449	15,50	1,70	-	-

Fuente: elaboración propia.

En las tablas siguientes se resumen datos más importantes de los resultados obtenidos.

Tabla XIII. Porcentaje de fracturas en soldaduras

Fracturas en soldadura E-7018	80.00%	12 de un total de 15 barras
Fracturas en soldadura E-9018	8.00%	2 de un total de 25 barras

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. Resistencia última (f'u) promedio por lote

	(Psi)	Mpa
Lote A	96,518	665
Lote B	91,504	631
Lote C	95,690	660
Lote D	99,651	687
Lote E	100,242	691
Lote F	99,824	688
Lote G	99,927	689
Lote H	102,449	706

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. Resistencia última (f'u) promedio por tipo de fractura

	(Psi)	Mpa
Fracturas en barras	100,308	692
Fracturas en soldadura E-7018	93,483	645
Fracturas en soldadura E-9018	98,852	682

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Resistencia última (f'u) promedio de total de probetas soldadas**

	(Psi)	Mpa
E-7018	94,571	652
E-9018	99,911	689

Fuente: elaboración propia.

6.3. Análisis y comparación de resultados entre distintas probetas

Es de hacer notar, que todas las barras ensayadas desarrollaron la fluencia mínima especificada para las barras en cuestión, es decir 60,000 psi o [4200 Mpa].

También se cumplió que todos los esfuerzos de fluencia se mantuvieran por debajo del máximo recomendado por el ACI, 18,000 psi [125 Mpa] por encima de la fluencia nominal de la barra; así también todas las barras desarrollaron la resistencia a tensión mínima de 1.25 F'y que exige el ACI, tanto para este tipo de soldaduras como para la aleación A 615, cuando esta se va a utilizar en zona sísmica.

De lo anterior se puede afirmar que por lo menos de una manera fuera de norma (según AWS D 1.4, no es permitido utilizar E-7018 para soldar A615 grado 60) todas las probetas desarrollaron las características mecánicas solicitadas.

6.3.1. Resistencias nominales de barras sin soldadura

Las barras de refuerzo analizadas, (no quiere decir que todas las barras del mercado) son sometidas a un estricto control de calidad; esto garantiza que las resistencias reales de las barras excedan los mínimos requeridos por los códigos, un factor que se corrobora en los resultados obtenidos.

Un aspecto interesante es que el porcentaje de elongación excede considerablemente el mínimo requerido por norma, cosa que favorece de una manera positiva el uso de dichas barras en una zona sísmica como nuestro país.

Asimismo, el esfuerzo de fluencia f_y ronda lo esperado y la relación f_u / f_y es mayor a 1.25, lo que garantiza que el acero poseerá una plataforma plástica satisfactoria que permitirá disipar energía durante actividad sísmica

6.3.2. Probetas soldadas con electrodo E-7018

El factor más evidente que incide en la resistencia de las probetas es el electrodo utilizado, se puede observar como primer punto que el electrodo E-7018 es un material de características mecánicas muy similares a las barras en estudio, lo que se hace evidente, porque es una actividad común que este tipo de electrodo se utilice en la soldadura de estas barras, sin embargo el 87 % de las probetas soldadas con este electrodo sufrieron la fractura en la soldadura; esto evidencia que la resistencia de la soldaduras de electrodo E-7018 está por debajo de la resistencia real de las barras ensayadas, (7 % - 10%).

A pesar de que consigue los valores mínimos solicitados, cualquier unión, mecánica o soldada de dos materiales, debería sobrepasar la resistencia de dichos materiales para asegurar que las resistencias dependan de dicho material y no de la unión.

Es indiscutible también que al sufrir la fractura en la soldadura el porcentaje de elongación disminuye entre un 40% y un 50%, lo que sacrifica una característica muy deseable en el acero de refuerzo; incluso puede dejar de cumplir los porcentajes mínimos de elongación solicitados a la aleación.

Por otro lado, es teóricamente injustificable utilizar un electrodo E-7018 que posee una resistencia a fluencia de 58,000 Psi en un acero que posee 60,000 Psi; así como una resistencia a tensión nominal de 70,000 Psi, en el mismo acero que posee una resistencia a tensión, por norma de 90,000 Psi.

Es obvio que tanto las barras como el electrodo tendrán factores de seguridad por parte de las casas fabricantes, que aseguren que se logrará satisfacer los requerimientos mínimos solicitados; estos factores seguramente harán que las resistencias sean considerablemente mayores a las nominales sin embargo, cualquier valor por arriba de los valores requeridos quedan fuera de la responsabilidad de los fabricantes.

A lo anterior se suma que la norma AWS. D. 1.4 no permite que se utilice electrodo E-7018 para realizar soldaduras en aleación A - 615 grado 60; por lo que, a pesar de que estas normativas no tienen una incidencia directa sobre nuestro territorio, y no importando cuán parecidos puedan ser los materiales, es injustificable utilizar electrodo E-7018 para soldar este tipo de barras.

6.3.3. Probetas soldadas con electrodo E-9018

El 96 % de las probetas soldadas con electrodo E-9018 sufrieron una fractura en la barra, confirma dice que la resistencia de las soldaduras sobrepasaron las resistencias reales de las barras ensayadas, y asegura que las uniones realizadas por soldadura con electrodo E-9018 en acero grado 60, con las características químicas de las probetas utilizadas, guardarán características mecánicas muy cercanas a las originales de las barras vírgenes.

La norma AWS D 1.4 solicita que las soldaduras realizadas en este tipo de acero, deben realizarse con este electrodo, y los resultados obtenidos en este trabajo respaldan dicho requerimiento.

Es propio mencionar que las probetas que fallaron en la soldadura, se cree se debió a un defecto de la soldadura; aún así estas fracturaron a una resistencia muy cercana a la resistencia que presentó el resto de probetas fracturadas fuera de la soldadura.

6.3.4. Precalentamiento

No se apreció un comportamiento definido, en relación con el precalentamiento antes de soldar las barras ensayadas; esto podría atribuirse a una combinación de los siguientes factores:

- La cantidad de probetas no es suficiente para marcar una tendencia.
- Los ensayos a tensión, no solicitan esfuerzos cíclicos como los exigidos en un sismo.

- Las dimensiones relativamente pequeñas de las barras no permitieron que se disipara el calor de una manera acelerada, por lo que el calor de aporte de la soldadura fue suficiente para mantener una temperatura más o menos uniforme en la probeta durante el proceso de soldadura y durante el enfriamiento y evitar la precipitación de estructuras excesivamente frágiles. Sin embargo al realizar uniones de barras reales, estas serán de longitudes mucho mayores a las longitudes de las probetas; también las solitudes de esfuerzos cíclicos y ductilidad durante un sismo, diferirán enormemente de lo idealizado en un ensayo de tensión.

De tal manera, si es necesario realizar soldaduras en barras de construcción, se deben precalentar las barras hasta la temperatura calculada mediante criterios metalúrgicos como en este trabajo, u obedeciendo a tablas tabuladas para los distintos diámetros y porcentajes de carbono, o carbono equivalente, volviéndose este precalentamiento cada vez más crítico, conforme aumentan los diámetros de las barras.

6.3.5. Secado del electrodo

El uso de electrodos de bajo hidrógeno y, adecuado manejo del mismo, tiene como fin principal, evitar el ingreso de hidrogeno a la soldadura, puede provocar fisuras y ser origen de fallas.

En este caso específico de estudio, no se realizaron ensayos no destructivos, como radiografías o ultrasonidos, o ensayos destructivos como macroataque. De tal manera, no se puede tener una conclusión atinada de la incidencia del secado del electrodo en las uniones realizadas.

Es un hecho que el manejo inadecuado del electrodo es una causa común de presencia de fisuras en soldaduras, y la incidencia y criticidad aumenta con el contenido de carbono del material base.

De tal manera, que es preciso manejar los electrodos de bajo hidrógeno de la manera adecuada, utilizándolos como envases sellados al vacío, o secándolos de la manera adecuada previo a su utilización, máxime cuando se trata de soldaduras estructurales en aceros de medio o alto carbono que pueden comprometer la integridad de edificaciones.

6.4. Análisis y comparación de resultados con los requisitos del ACI

Aunque se han mencionado a lo largo del trabajo, de manera explícita los requerimientos que solicita el ACI para la utilización de barras A 615 grado 60, en zonas sísmicas y su soldadura, son los siguientes:

Tabla XVI. **Solicitudes del ACI para las barras A-615 simples y sus uniones soldadas en zonas sísmicas**

	(Psi)	Mpa	Probetas satisfactorias
F'y mínima	60,000	414	100 %
F'y máxima	60,000 + 18,000 = 78,000	538	100%
Fu mínima	1.25 (Fy real)	1.25 (Fy real)	100%
Fu máxima	no específica	no específica	
Soldaduras	Realizar acorde a AWS D 1.4		

Fuente: elaboración propia.

Se considera, que deberían de existir exigencias más altas, en cuanto a ductilidad en las uniones soldadas.

6.4.1. Solicitudes generales de AWS. D 1.4.

Esta norma regula los procedimientos de soldadura de acero de refuerzo para concreto, existen dentro de dicha norma varias formas de realizar soldaduras, así como directrices para realizarlas con distintos procesos.

La norma dicta los parámetros bajo los cuales se deben realizar las soldaduras, parámetros que se han expuesto a lo largo del trabajo para la unión de interés. En cuanto a ensayos, esta norma no dicta una cantidad y tipo de ensayos para un cierto número de soldaduras como se podría pensar. Esta norma básicamente dicta los procedimientos para calificar soldadores y procedimientos, asumiendo que las soldaduras se realizarán por personal que ha sido sometido a esta calificación y que dicha calificación está vigente.

Para calificar un soldador se solicitan básicamente ensayos de tensión que satisfagan la resistencia mínima de tensión de $1.25 F_y$, y ensayos de macroataque (ensayo destructivo que consiste en el corte transversal de la soldadura en busca de fisuras después de aplicar ciertos químicos), para corroborar que las soldaduras estén libres de fisuras y que la penetración es adecuada.

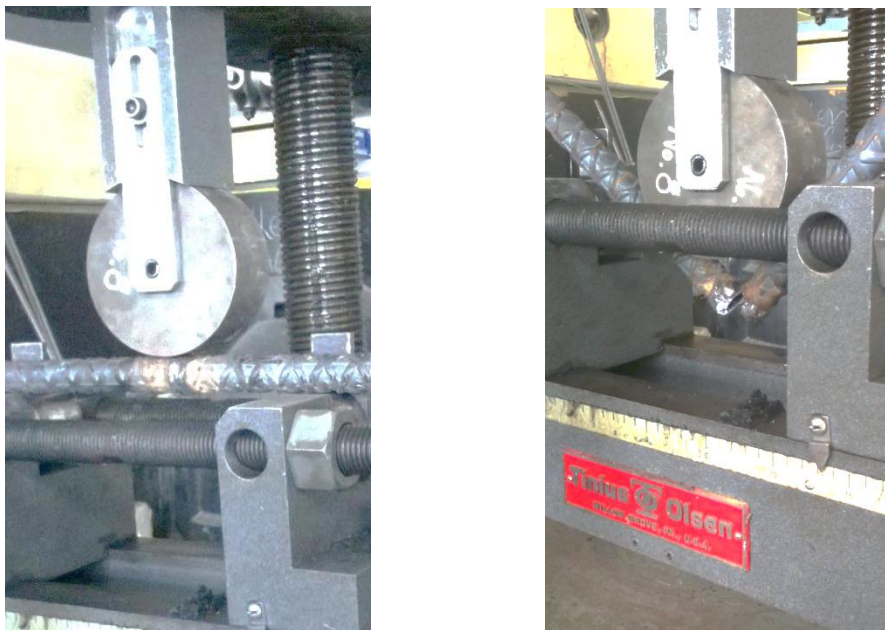
En Guatemala no existe una regulación o norma específica para este tipo de soldadura, por lo que es conveniente, que en el momento de realizar estas soldaduras o subcontratarlas, se realicen algunos ensayos de tensión y macroataque para corroborar la calidad de las mismas.

Asimismo, realizar las soldaduras bajo los parámetros de precalentamiento sugeridos o calculados y, utilizar el electrodo adecuado y en las condiciones adecuadas de secado.

6.5. Ensayos de doblado realizados a las probetas

A pesar de que los códigos no lo solicitan, se realizaron algunos ensayos de doblado a probetas soldadas con electrodo E-7018 y E-9018, para tener una idea de la ductilidad de las uniones. En la figura siguiente se ilustra una barra soldada con E-7018, la cual mostró una ductilidad prácticamente nula como se aprecia en la imagen de la barra fracturada sin deflexión alguna.

Figura 41. **Doblado barra soldada con E-7018**

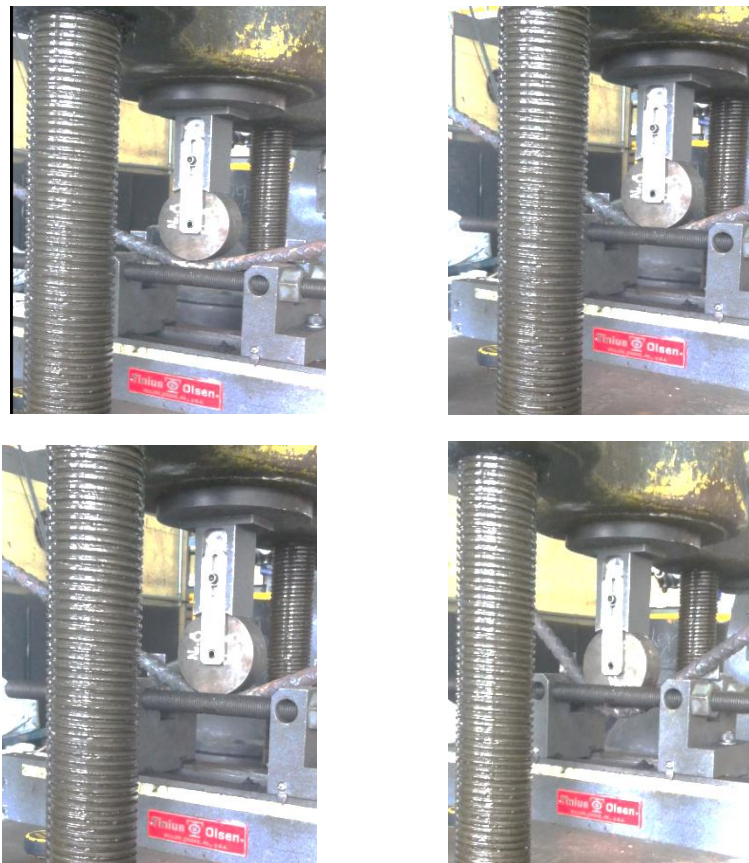


Fuente: Talleres Metal S.A.

Por el contrario, las probetas soldadas con E-9018 presentaron una ductilidad mucho más alta, y a pesar de que, como se podría esperar, no alcanza la ductilidad de una barra virgen, si logra una ductilidad aceptable.

La figura siguiente ilustra imágenes del ensayo de doblado de 4 probetas de e-9018, justo antes de fallar; en ellas se observa que las uniones alcanzaron una importante deformación previo a su fractura.

Figura 42. **Doblado de barras soldadas con E-9018**



Fuente: Talleres Metal S.A.

6.6. Parámetros que se deben tomar en cuenta en la supervisión de soldadura, por parte de un ingeniero civil

La soldadura es una amplia rama de la ingeniería, donde existen factores técnicos y metalúrgicos, no intuitivos, que intervienen en el comportamiento de una unión soldada y donde la calidad y satisfacción de dicha unión depende, en muchos casos, de mucho más que una inspección visual.

Lo idóneo es que personal con formación técnica en el área sea quien supervise este tipo de actividades, sin embargo existen aspectos básicos que se deben conocer en el ámbito de ingeniería civil, por lo menos para saber cuáles son los pasos que se debieran tomar al momento de realizar un unión por soldadura, sobre todo si se trata de soldaduras de aceros de alta resistencia como en el caso del presente trabajo.

Entre los aspectos básicos que se deben supervisar al momento de contratar una soldadura o de supervisar a un soldador están los siguientes:

- Seguridad industrial
 - Utilización de equipo de protección
 - Áreas libres de inflamables
 - Utilización de extintores
 - Revisión del estado de cables y equipos
 - Ventilación del lugar

- Criticidad de la soldadura
 - Resulta obvio, que existen soldaduras livianas o de estructuras de herrería; por ejemplo, donde la supervisión exhaustiva no provocará un cambio significativo en el fin práctico de la soldadura. Por lo que se debe analizar qué nivel de atención es el que requiere cada proyecto. No es lo mismo una unión a penetración completa de una trabe o viga principal de un entrepiso, que la soldadura de una portacostaneras en un techo a dos aguas.

- Normas existentes
 - Generalmente, existen normativas para casi cualquier tipo de soldadura y proceso, y aunque en Guatemala se carece de normativas propias, es oportuno investigar qué normativas internacionales son aplicables al tipo de soldadura que se está realizando. Más aún, si no se tiene experiencia en ello, de interés en ingeniería civil básicamente se tiene lo siguiente: para soldaduras estructurales, es decir estructuras metálicas, la norma más común que se va a utilizar es la AWS. D 1.1 y para soldaduras de acero de refuerzo en concreto, como el caso de este trabajo, es la AWS. D 1.4.
 - Si se cuenta con normativas, es importante supervisar que los procesos se apeguen lo mejor posible a las normativas; cada requerimiento tiene un por qué.

- Material a soldar
 - Grado del acero: entre más resistente y más carbono y aleantes tiene el acero es más difícil soldarlo y necesita más consideraciones técnicas al momento de hacerlo, un acero por arriba de un 0.25% de carbono deberá ser sujeto de un estudio técnico, previo a realizar la soldadura.
 - Grosor: entre más grueso es el acero y más área tiene la pieza, es más probable que se necesitará un precalentamiento para aliviar las contracciones producidas durante el enfriamiento. Dicho precalentamiento, puede calcularse, con base en lo expuesto en este trabajo o se puede recurrir a tablas existentes en las distintas normativas.

- Electrodo
 - El tipo de electrodo a utilizar es una de las características más importantes, influyen factores como la resistencia, las posiciones en las que se puede soldar con dicho electrodo, el recubrimiento del electrodo, etc. Si se realizaran soldaduras donde no se tenga experiencia o no se tenga una idea clara de qué se está haciendo, es adecuado consultar a personal especializado o asesores de venta.
 - Si los electrodos son de bajo hidrógeno, como en muchos de los casos de soldaduras estructurales, se debe tener cuidado de las condiciones de almacenamiento, las condiciones de uso y las de secado, los códigos de soldadura limitan el contacto de los

electrodo con la atmósfera; además si los electrodos estuvieron expuestos a la atmósfera, existen requerimientos de secado y de la manera como se deben mantener después del secado, así como del número de veces que se pueden secar previo a ser utilizados; estos cuidados son escasamente seguidos, ni siquiera por las casas vendedoras, por lo que dependiendo de la criticidad de las soldaduras, se debe prestar atención a este importante aspecto.

- Calidad visual: las soldaduras, por sencillas y poco críticas que sean, deben contar con una calidad visual aceptable, libre de porosidades, socavaciones y chisporroteos, esto no solo tiene importancia estructural, sino que da la sensación de seguridad a los ocupantes de una edificación.

CONCLUSIONES

1. Las consecuencias que un proceso de soldadura puede tener en un acero, son debidas al comportamiento de las estructuras cristalinas de dicho acero con el aumento y decremento de temperatura, de dichos ciclos térmicos y el tipo de acero depende principalmente de la formación de estructuras frágiles, así como fisuras y defectos; de esto derivan los distintos cuidados que se pueden requerir al realizar una unión soldada, los parámetros básicos que se deben tener en cuenta son el precalentamiento necesario, el tipo de electrodo y las directrices normadas que existen para realizar dichas uniones.
2. La totalidad de las uniones realizadas, tanto con electrodo E-7018 (fuera de norma) como con E-9018, cumplieron con los requerimientos mecánicos solicitados por el ACI; sin embargo se concluye que es injustificable técnicamente utilizar electrodo E-7018, no solamente debido a la norma AWS D1.4, sino que las resistencias tanto nominales como reales están por debajo de las resistencias de las barras, y por ende las rupturas sucederán en las soldaduras, lo que sacrifica una buena parte del porcentaje de elongación, cuya importancia es enorme, especialmente en zonas sísmicas.
3. A través de la prueba de doblado, se comprobó que la ductilidad de las soldaduras E-7018 es prácticamente nula, por lo que es una razón que vuelve injustificable el uso de electrodo E-7018 para la soldadura de las barras de estudio.

4. Las uniones realizadas con electrodo E-9018, no solo cumplen con la norma que regula en Estados Unidos este tipo de uniones, sino que como generalidad presenta una resistencia a la ruptura mayor a la resistencia real de las barras, lo que asegura que se desarrollará todo el potencial del refuerzo y que además estas resistencias estarán de acuerdo con el resto de refuerzo no soldado utilizado en el proyecto, por lo que para la aleación ensayada, en el diámetro de barra ensayado, la unión por soldadura, con los parámetros adecuados es viable, aunque se debe aclarar que donde sea posible realizar traslapes en lugar de realizar soldaduras, se debería hacer, ya que no siempre se cuenta con la mano de obra calificada para realizar dichas soldaduras de una manera adecuada que garantice la calidad de las uniones.

5. Es de importancia señalar que los parámetros se calcularon y las pruebas se realizaron en un diámetro establecido y en una sola marca comercial, por lo que si se realizara dicho proceso en barras más grandes o si la composición química varía de la utilizada en este trabajo, se deben realizar nuevos cálculos de carbono equivalente y precalentamiento o bien consultar los parámetros en tablas de la norma AWS D 1.4; también se aconseja realizar nuevas pruebas, de ser necesario.

6. El precalentamiento de las barras no arrojó diferencias significativas en los resultados, aunque es importante decir que las barras ensayadas eran de una pulgada de diámetro y una longitud de 80 cm; de tal manera, el calor de aporte del proceso de soldadura, quizá era suficiente para calentar toda la probeta, de manera, tal que los enfriamientos fueran uniformes y de allí que no se aprecia una diferencia de importancia; obviamente al soldar barras en campo, estas serán mucho más largas,

por lo que el acero tendrá la posibilidad de disipar el calor más rápido y precipitar estructuras frágiles (martensíticas) de una manera más fácil; además para diámetros más grandes, el precalentamiento se vuelve mucho más importante, por lo que a pesar de los resultados, se debe precalentar este acero previo a soldar.

7. Los resultados de tensión, no revelaron una disminución de resistencia apreciable en las probetas utilizadas con electrodo que había estado en contacto con el ambiente; sin embargo no se realizaron ensayos radiográficos, de ultrasonido o macroataque que revelaran la presencia de fisuras que probablemente serán el origen de fallas futuras bajo servicio; además, a pesar de que estuvieron en contacto con el ambiente, las condiciones de humedad pueden variar de un lugar a otro, por lo que se deben respetar los lineamientos de secado o utilizar los electrodos directamente del empaque al vacío, para asegurar que no serán fuente de hidrógeno en la unión soldada que puede ser responsable de ocasionar fisuras y posteriores fallas en dicha unión.

8. Si se realizaran soldaduras en este tipo de acero, se debe tener en cuenta los precalentamientos adecuados dependientes del carbono equivalente y del diámetro a soldar; se pueden calcular mediante criterios metalúrgicos, o bien consultar la norma AWS. D 1.4; se debe realizar con electrodo E-9018 bajo condiciones adecuadas de almacenamiento y contar con personal calificado para realizar las soldaduras.

9. A menos que se cuente con personal certificado en la realización del tipo específico de soldadura que se va a realizar, se deberán efectuar ensayos de tensión para asegurarse de que la resistencia mecánica cumple con el $1.25 F_y$; de preferencia las fracturas deberán ser en las barras, para asegurar que las características de fractura y el porcentaje de elongación se deberá a las características de la barra y no a la soldadura.

RECOMENDACIONES

1. Al que al realizar una soldadura en aceros de alta resistencia, el ejecutor y/o supervisor debe analizar o investigar los parámetros de soldadura adecuados para realizar dicho proceso, afectando lo menos posible las características mecánicas de los materiales, ya que la correcta soldadura de una aleación a otra puede diferir grandemente.
2. Se debe utilizar solamente electrodo E-9018 para realizar soldaduras en acero A 615 grado 60, pese a que el electrodo E-7018 presenta resistencias muy similares al material base, no es justificable su utilización. No se deben realizar uniones soldadas en lugares donde existen variaciones de esfuerzos significativas, como puntos de inflexión, o dentro de nudos en edificaciones. En general se deben respetar las regulaciones establecidas por los códigos constructivos.
3. Es recomendable utilizar el precalentamiento específico para cada diámetro de barra por la norma AWS D1.4, o realizar un análisis basado en criterios metalúrgicos para determinar la temperatura de precalentamiento.
4. Al realizar cualquier soldadura estructural con electrodos de bajo hidrógeno, se deberán comprar empaques sellados y/o realizar los secados de acuerdo con a las normas específicas para cada soldadura.

5. Si es necesario realizar soldaduras en este tipo de acero; se debe de contar con los contenidos químicos que permitan, discernir los posibles resultados y complicaciones al realizar uniones soldadas en dicho acero, también son necesarios para poder calcular las temperaturas de precalentamiento y temperatura entre pasadas y procurar que no se propicien estructuras frágiles durante el proceso.

BIBLIOGRAFÍA

1. ASM HANDBOOK. *Properties and selection, irons and steels*. Estados Unidos, American Society of Metals, 1978. 793 p. Vol. 1.
2. AWS WELDING. *Handbook*. 9th edition, Estados Unidos American Welding Society, 1978. 669 p. Vol. 1.
3. GAXIOLA Maya. *Curso de capacitación de soldadura*. México: Limusa, 2004. 179 p.
4. GIL, Hermógenes. *Soldadura: principios, técnicas y equipos*. 2a. ed. España: Ceac, 2005. 401 p.
5. GRAVILLE. *Welding of HSLA structural steels, proceeding of international conference*. Estados Unidos, American Society for Metals, 1976. 265 p.
6. INDURA. *Manual de sistemas y materiales de soldadura*. Chile: Limusa, 2005. 88 p.
7. JEFFUS, Larry. *Soldadura, principios y aplicaciones*, España: Paraninfo, 2009. 894 p.
8. MOLERA SOLÁ, Pere. *Soldadura Industrial: clases y aplicaciones*. Barcelona: Marcombo, 1992. 125 p.

9. OERLIKON. *Manual de soldadura*. Perú: Universidad de Chile, 1999. 156 p.
10. OLIVA MINILO, Carlos. *Inspector de soldadura*. Chile: Instituto Chileno de soldadura, 2007. 292 p.

ANEXOS

1. Norma ASTM A-615
2. Norma ASTM A-706
3. Norma ASTM AWS D1.4

