



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

**ANÁLISIS DE FISURAS EN LOS CORDONES DE SOLDADURA EN  
ACEROS AL CARBONO SUS CAUSAS Y SOLUCIONES**

**René Edmundo Chicas Robles**

Asesorado por Dr. Sc. Ing. Roberto Alejandro Aguilar Rivas

Guatemala, julio de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE FISURAS EN LOS CORDONES DE SOLDADURA EN  
ACEROS AL CARBONO SUS CAUSAS Y SOLUCIONES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**RENÉ EDMUNDO CHICAS ROBLES**

ASESORADO POR EL DR. SC. ING. ROBERTO ALEJANDRO AGUILAR RIVAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO**

GUATEMALA, JULIO DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympto 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 Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Luís Alfredo Asturias Zúñiga
EXAMINADOR	Ing. Milton Alexander Fuentes Orozco
EXAMINADOR	Ing. Héctor Alexander Juárez Reyes
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 DE FISURAS EN LOS CORDONES DE SOLDADURA EN ACEROS AL CARBONO SUS CAUSAS Y SOLUCIONES**

Tema que me fuera asignado por la Coordinación de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 3 de septiembre de 2012.



**René Edmundo Chicas Robles**



Guatemala, 31 de mayo de 2013

Ingeniero Julio César Campos Paiz  
Director de Escuela de Ingeniería Mecánica  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Campos:

Al saludarlo muy atentamente, le comunico que he revisado, a completa satisfacción, el trabajo de graduación del estudiante universitario René Edmundo Chicas Robles, quien se identifica con número de carné 2009-15126, perteneciente a la carrera de Ingeniería Mecánica, el cual lleva por título **“Análisis de fisuras en los cordones de soldadura en aceros al carbono sus causas y soluciones”**, asesorado por el suscrito.

El trabajo se desarrolló dentro del “Proyecto de Investigaciones Metalúrgicas” de la Escuela de Ingeniería Mecánica y cuenta con mi total aprobación, por cumplir con los objetivos fundamentales de las líneas de investigación de dicha Escuela, aportando resultados de suma utilidad en el desarrollo científico tecnológico del país. En tal virtud le solicito darle el trámite correspondiente.

Sin otro particular, me suscribo de usted, con las muestras de mi consideración más distinguida,

Dr. Sc. Ing. Roberto Alejandro Aguilar Rivas  
Colegiado No. 862

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

El Coordinador del Área Complementaria, de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado ANÁLISIS DE FISURAS EN LOS CORDONES DE SOLDADURA EN ACEROS AL CARBONO SUS CAUSAS Y SOLUCIONES, del estudiante René Edmundo Chicas Robles, recomienda su aprobación.

**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

A handwritten signature in dark ink, appearing to read 'Carlos Humberto Pérez Rodríguez'.



Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez  
Coordinador de Área

Guatemala, mayo, de 2013 .

/behdei.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, después de conocer el dictamen del asesor, con la aprobación del Coordinador del Área Complementaria, al Trabajo de Graduación titulado ANÁLISIS DE FISURAS EN LOS CORDONES DE SOLDADURA EN ACEROS AL CARBONO SUS CAUSAS Y SOLUCIONES del estudiante **René Edmundo Chicas Robles**, procede a la autorización del mismo.

**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

Ing. Julio César Campos Paiz

**DIRECTOR**



Guatemala, junio de 2013

JCCP/behdei

Universidad de San Carlos  
de Guatemala



Facultad de Ingeniería  
Decanato

DTG. 462 .2013

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 Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado: **ANÁLISIS DE FISURAS EN LOS CORDONES DE SOLDADURA EN ACEROS AL CARBONO SUS CAUSAS Y SOLUCIONES**, presentado por el estudiante universitario: **René Edmundo Chicas Robles**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno  
Decano en Funciones

Guatemala, 2 de julio de 2013

/gdech





## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por ser la principal luz en mi vida y ser una importante influencia en mi carrera.
<b>Mis padres</b>	German Chicas y Marina Robles de Chicas. Su amor será siempre mi inspiración.
<b>Mis hermanos</b>	German, Marina, Juan Carlos y Carlos Ovidio Chicas Robles, por ser importantes influencias en mi carrera.
<b>Luis Alberto Colocho</b>	Por sus consejos sabios e influenciar en mi carrera.
<b>Roberto Aguilar Rivas</b>	Por ser el camino de mi vida profesional.
<b>Brenda Mariela Flores</b>	Por querer siempre lo mejor para mí y estar ahí.
<b>Luis Enrique Sánchez</b>	Por todo el aprecio y apoyo de un hermano.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>La Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por ser mi segunda casa y darme la oportunidad.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por proporcionarme el conocimiento.
<b>Julio Campos</b>	Por su apoyo incondicional.
<b>Roberto Aguilar Rivas</b>	Por siempre estar a mi lado.
<b>Mis amigos de la Facultad de Ingeniería</b>	Juan Moreno, Estuardo Barco, Juan Mendoza, Pablo Higueros, Allan Raxón, Carlos Aroche, Juan Carlos Molina, por siempre estar ahí.
<b>Mis amigos</b>	Félix y María Illesca, Silvia Linares, Marcia Elías, Javier Morales, Víctor Sagastume, Osmin Villanueva, por el apoyo incondicional.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN .....	XI
OBJETIVOS/JUSTIFICACIÓN .....	XIII
INTRODUCCIÓN .....	XVII
1. GENERALIDADES DE SOLDADURA, DISCONTINUIDADES, DEFECTOS Y ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS .....	1
1.1. Definición de la soldadura .....	1
1.2. Diferencias entre discontinuidad y defecto .....	2
1.2.1. Discontinuidad .....	2
1.2.2. Defecto .....	3
1.2.3. Tipos de discontinuidades .....	3
1.2.4. Discontinuidad inherente .....	4
1.2.5. Discontinuidad de proceso .....	4
1.2.6. Discontinuidades de servicio .....	4
1.3. Clasificación de las discontinuidades .....	4
1.3.1. Superficiales .....	4
1.3.2. Internas .....	4
1.4. Tipos de indicaciones .....	5
1.4.1. Indicaciones relevantes .....	5
1.4.2. Indicaciones no relevantes .....	5
1.4.3. Indicaciones falsas .....	5
1.5. Clasificación de los ensayos no destructivos .....	6

1.5.1.	Método de ensayo visual .....	7
1.5.2.	Método de ensayo por líquidos penetrantes .....	8
1.5.3.	Método de ensayo por partículas magnéticas.....	9
1.5.4.	Método de ensayo por ultrasonido.....	10
1.5.5.	Método de ensayo por radiografía industrial .....	11
2.	ANÁLISIS DE LAS FISURAS EN LOS CORDONES DE SOLDADURA .....	13
2.1.	Definición de las fisuras en los cordones de soldadura .....	13
2.2.	Clasificación de las fisuras .....	14
2.2.1.	Fisuras longitudinales .....	14
2.2.1.1.	Fisuración en caliente .....	14
2.2.1.2.	Fisuración en frío .....	15
2.2.1.3.	Fisuras transversales.....	16
2.2.1.4.	Fisuras en caliente.....	16
2.2.1.5.	Fisuras en frío.....	16
2.2.2.	Fisura de interrupción o arranque (o de cráter).....	17
2.2.2.1.	Fisuras en frío.....	18
2.2.3.	Desgarre laminar .....	20
2.3.	Fisuración en la soldadura por su posición.....	20
2.3.1.	Fisuración en el centro del cordón .....	21
2.3.2.	Fisura inducida por la forma del cordón.....	23
2.3.3.	Fisuración en la zona afectada por el calor .....	25
3.	TIPOS Y CAUSAS DE LAS FISURACIONES EN LOS CORDONES DE SOLDADURA .....	27
3.1.	Agrietamiento en caliente .....	27
3.1.1.	Por contracción de solidificación.....	27

3.1.2.	Por fusión de eutécticos, quemado o desgarre en caliente .....	29
3.1.3.	Fisuración por tratamiento térmico .....	30
3.2.	Agrietamiento en caliente durante la solidificación.....	31
3.2.1.	Causas.....	31
3.3.	Agrietamiento en frío .....	32
3.3.1.	Causas.....	32
3.4.	Agrietamiento en frío en el metal base.....	33
3.4.1.	Causas.....	33
3.5.	Desgarre laminar .....	34
3.5.1.	3.5.1 Causas.....	34
3.6.	Fisura transversal .....	35
3.6.1.	Fisura transversal en frío .....	36
3.6.2.	Fisura transversal en caliente .....	36
3.7.	Fisuras en las juntas .....	36
3.7.1.	Causas.....	36
3.8.	Fisuras en el material base.....	37
3.8.1.	Causas.....	37
4.	INSPECCIÓN Y RECONSTRUCCIÓN DE FALLAS MEDIANTE EL USO DE END Y MÉTODOS DE RECONSTRUCCIÓN DE SOLDADURA.....	39
4.1.	Inspección de una falla por fatiga en un balancín .....	39
4.1.1.	Características de la falla .....	39
4.1.2.	Diagnóstico .....	40
4.1.3.	Práctica de reconstrucción .....	41
4.1.4.	Resultados y conclusiones.....	43
4.2.	Inspección de una falla de un horno de clinker .....	44
4.2.1.	Características de la falla.....	44

4.2.2.	Diagnóstico.....	46
4.2.3.	Práctica de reconstrucción .....	46
4.2.4.	Resultados y conclusiones .....	48
4.3.	Inspección de una falla en un crisol para galvanización de chapas de acero.....	49
4.3.1.	Características de la falla .....	49
4.3.2.	Diagnóstico.....	51
4.3.3.	Conclusiones y recomendaciones .....	51
5.	ANÁLISIS DE FISURAS EN SOLDADURAS POR MEDIO DE INSPECCIÓN VISUAL DEPENDIENDO DE LAS CONDICIONES DE APLICACIÓN.....	53
5.1.	Análisis de la falla por medio de inspección visual .....	53
5.1.1.	Tipos de fisuras .....	54
5.2.	Características y aplicaciones de los electrodos más comunes utilizados en las soldaduras de aceros al carbono ...	57
5.2.1.	Características del electrodo 7018 .....	58
5.2.2.	Características del electrodo 6013 .....	58
5.3.	Análisis en la reducción de calidad en la soldadura .....	59
5.3.1.	Variación de amperaje dependiendo del electrodo .....	59
5.4.	Análisis de resultados .....	64
	CONCLUSIONES .....	67
	RECOMENDACIONES .....	69
	BIBLIOGRAFÍA.....	71
	ANEXO.....	75

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Fisura longitudinal .....	15
2.	Fisuras transversales .....	17
3.	Fisuras alrededor del cordón (ZAC) .....	18
4.	Líneas por fisuración en frío en cordón de soldadura .....	19
5.	Fisuración en el centro del cordón .....	22
6.	Fisuración inducida por la forma del cordón .....	23
7.	Fisuración inducida por el perfil de la superficie .....	24
8.	Fisuración en la zona afectada por el calor .....	25
9.	Agrietamiento en caliente .....	32
10.	Agrietamiento en frío .....	33
11.	Agrietamiento en frío en el metal base .....	34
12.	Desgarre laminar.....	35
13.	Falla original de swing- lever. Revelación por partículas magnéticas ...	40
14.	Zona de desprendimiento de la primera reparación .....	41
15.	Terminación del proceso de reconstrucción .....	43
16.	Fallas en las soldaduras de acero austenítico .....	45
17.	Fallas en las zonas afectadas por el calor creciendo en direcciones caprichosas .....	45
18.	Inspección por partículas magnéticas de las fisuras existentes, antes de iniciar el proceso de soldadura .....	47
19.	Presentación final de una reparación, por uno de los lados extremos del casco del horno.....	48
20.	Revelación de la fisura mayor con aplicación de luz ultravioleta. ....	50

21.	Revelación de partículas magnéticas .....	50
22.	Ramificación de una fisura transversal y una fisura longitudinal en el centro del cordón .....	54
23.	Fisura horizontal al cordón de soldadura .....	55
24.	Fisura transversal atravesando completamente el cordón de soldadura.....	56
25.	Fisura longitudinal.....	57
26.	Electrodo E7018 Amp. 120 .....	59
27.	Electrodo E7018 Amp 135 .....	60
28.	Electrodo E7018 Amp. 150 .....	60
29.	Electrodo E7018 Amp. 200 .....	61
30.	Electrodo E6013 Amp. 75 .....	62
31.	Electrodo E6013 Amp. 85 .....	62
32.	Electrodo E6013 Amp. 100 .....	63
33.	Electrodo E6013 Amp. 150 .....	63
34.	Cordón con fisuras expuestas .....	65
35.	Fisura longitudinal en el centro del cordón.....	66
36.	Prueba de amperajes con un electrodo E7018 .....	66



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>S</b>	Azufre
<b>B</b>	Boro
<b>C</b>	Carbono
<b>AC</b>	Corriente alterna
<b>CC</b>	Corriente continua
<b>Cr</b>	Cromo
<b>P</b>	Fósforo
<b>°C</b>	Grados centígrados
<b>mm</b>	Milímetro
<b>Mo</b>	Molibdeno
<b>O</b>	Oxígeno
<b>(-)</b>	Polo negativo
<b>(+)</b>	Polo positivo
<b>OCV</b>	Tensión de circuito abierto: tensión de vacío
<b>Ti</b>	Titanio
<b>V</b>	Vanadio



## GLOSARIO

<b>Cordón o pasada</b>	Pasada simple del metal de aporte depositado sobre la superficie del metal base.
<b>Defecto</b>	Discontinuidad cuyo tamaño, forma, orientación, ubicación o propiedades son inadmisibles para alguna norma específica. En particular, al realizar un END se cataloga como defecto a toda discontinuidad o grupo de discontinuidades cuyas indicaciones no se encuentran dentro de los criterios de aceptación especificados por la norma aplicable.
<b>Discontinuidad</b>	Falta de continuidad; falta de cohesión (de unión); interrupción en la estructura física normal del material o producto.
<b>END</b>	Ensayo no destructivo.
<b>High-strength low-alloy steel (HSLA)</b>	Acero micro aleado o HSLA, aleación metálica que proporciona propiedades mecánicas superiores o mejor resistencia a la corrosión.
<b>Indicación</b>	Respuesta o evidencia de una discontinuidad resultante de la aplicación en un END.

<b>Input térmico</b>	Calor aportado.
<b>Longitud del arco</b>	Distancia entre la punta del electrodo y la superficie del baño de fusión.
<b>Metal base</b>	Material del cual está constituida la pieza o elemento a ser soldado.
<b>Método de ensayo</b>	Procedimiento de aplicación de una técnica de inspección de falla o defecto.
<b>Metal depositado</b>	Material que se aporta a la unión mediante el electrodo o hilo de aportación, con el fin de construir el perfil soldado.
<b>Penetración del cordón</b>	Zona del metal base que se llega a fundir durante el proceso de soldeo.
<b>ZAC, HAZ o ZAT (zona afectada por el calor)</b>	Es la zona del metal base que sin haber llegado a fundir ha sufrido un fuerte calentamiento y posterior enfriamiento, que ha afectado a las estructuras y como consecuencia han variado las características mecánicas y metalográficas de la misma.

## RESUMEN

La aplicación industrial de soldadura es una de las técnicas más frecuentadas a nivel mundial, esta se constituye en uno de los ejes principales de la metalurgia; sin embargo, todos los procesos no son perfectos y en el caso de la soldadura trae consigo la aparición de defectos y discontinuidades que pueden ocasionar fallos menores, los cuales pueden llegar a ser catastróficos e irreparables.

La aplicación de los END es una solución para el análisis de los defectos de la soldadura, aunque la aplicación de estos ensayos debe realizarse por personal calificado y bajo las Normas AWS, ASTM y API, entre otras. Si bien estas técnicas no son capaces de indicar cuáles fueron las causas, ni de predecir su ocurrencia, contribuyen con gran precisión a su identificación. Es importante destacar que los aceros al carbono tienen una reacción distinta dependiendo de la concentración de carbono; para ello se deben de utilizar técnicas de reconstrucción en donde se debe tomar en cuenta diferentes variables.

En función de lo anterior, en el presente trabajo se analizarán, específicamente, los diversos tipos de fisuras o agrietamientos producidos durante el proceso de soldadura tipificándose cada caso en particular. Para esto, se ha recurrido a las especificaciones más importantes señaladas en las normas citadas y, el análisis de fallas obtenido mediante la práctica del proceso, tanto en trabajos publicados por especialistas en el tema, como por resultados obtenidos en la práctica durante el desarrollo del proyecto.



# OBJETIVOS

## General

Determinar los procedimientos para identificar las fisuras en los cordones de soldadura en aceros de bajo carbono que se puedan dar en los procesos de soldadura, conociendo las causas que los producen y, por consiguiente, su efecto, para luego diseñar los procedimientos con el propósito de reacondicionar la soldadura defectuosa.

## Específicos

1. Determinar el efecto de las fisuras en los cordones de soldadura.
2. Conocer los ensayos no destructivos para la detección de fallas o discontinuidades en aceros de bajo carbono.
3. Determinar las variables que afectan a la soldadura.
4. Determinar las causas de las fisuras en los cordones de soldadura en aceros de bajo carbono.
5. Conocer y analizar el material base y de aporte utilizado para soldar.





## JUSTIFICACIÓN

Los defectos de soldadura dependen directamente de los materiales utilizados, el ambiente y el factor humano, por lo cual la reparación o reconstrucción de las estructuras afectadas beneficia tanto a empresas a nivel industrial, como a usuarios particulares. Por ello es necesaria la continuación de las investigaciones en cuanto al origen de las fisuras en los cordones de soldadura que se originan durante los procesos de la misma, por lo que se logra la optimización de los costos directos, así como para evitar los riesgos que ello con lleva. En este sentido se orienta los objetivos de la investigación, lo cual justifica la realización del proyecto.



## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se realiza dentro de las líneas de investigación de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la FIUSAC, específicamente dentro del Proyecto de Investigaciones Metalúrgicas, en lo relativo al área de soldadura.

Una de las ramas importantes de la metalurgia es la soldadura, pero el proceso trae consigo la aparición de defectos de causas variadas. Las fisuras constituyen uno de los defectos más relevantes y pueden ser ocasionadas por falta de conocimiento del material a soldar, del material de aporte y por la incompatibilidad del material base y el electrodo utilizado. A esto se suman factores relacionados con el ambiente que proporciona un problema serio en la aplicación de la soldadura, por efecto de la humedad y la temperatura.

Los practicantes de la soldadura, por falta de conocimiento en los procesos específicos, juegan un papel importante en la formación de defectos, a lo que hay que agregar el desconocimiento de los materiales en general. Para la detección de dichas fallas existen diferentes métodos de prueba como los ensayos no destructivos. Por consiguiente, de este problema se origina la mala calidad de la reparación o reconstrucción de estructuras, lo cual repercute en costos elevados y la posibilidad de accidentes inesperados, juntamente a nuevas fallas que produce el desconocimiento de estos procesos, ya que los aceros al carbono reaccionan en forma distinta dependiendo de la concentración del soluto.



# **1. GENERALIDADES DE SOLDADURA, DISCONTINUIDADES, DEFECTOS Y ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS**

## **1.1. Definición de la soldadura**

La calidad de la soldadura depende de un sin número de causas, como se verá más adelante y, la metodología más importante para verificar la calidad, se basa en la utilización de los ensayos no destructivos (END). Estos ensayos se aplican a equipos y componentes en general, para determinar su calidad sin afectar su uso. Se aplican END para detectar discontinuidades en la soldadura y evitar fallas. Siempre que se suelda es necesario realizar inspecciones periódicas, y estas se complementan con la utilización de los END, de los cuales el más importante es la inspección visual.

La soldadura de buena calidad es aquella que cumple con los requisitos correspondientes al equipo o estructura a la que pertenece, estos requisitos están vinculados a una norma técnica como AWS D 1.1 que relaciona las estructuras de la soldadura.

“La soldadura moderna de los metales, al igual que la soldadura antigua por forjado, logra la unión de los metales por fusión. Sin embargo, con el desarrollo de la tecnología de la soldadura y el mejoramiento de los métodos de prueba, se observó que podía lograrse una fusión completa y permanente entre dos o más metales, y que el área soldada tenía mayor resistencia que cualquiera de las piezas que se habían unido. Utilizando las técnicas y los

materiales correctos, casi cualesquiera dos piezas de metal pueden fundirse para formar una sola unidad”<sup>1</sup>.

“La economía que, en su origen, proporcionó la aplicación de la soldadura casi únicamente en la reparación y recuperación de toda clase de equipo y piezas metálicas desgastadas o deterioradas, ha sido sobrepasada en gran escala, por la economía lograda en sus más recientes aplicaciones en los distintos procedimientos de corte y soldadura”<sup>2</sup>.

## **1.2. Diferencias entre discontinuidad y defecto**

En la publicación de soldadura de la Comisión de Energía Atómica en 2009, define la diferencia entre defecto y discontinuidad de la siguiente manera:

### **1.2.1. Discontinuidad**

“Cualquier aspecto o detalle geométrico, metalúrgico o mecánico que no se encuentre previsto en el diseño original del componente que por su magnitud o características no afecte la performance ni la vida útil del componente”<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup> HORWITZ, Henry. Soldadura: aplicaciones y práctica. p. 1.

<sup>2</sup> BONIFACE E., Rossi. *La Soldadura y sus aplicaciones*. p. 70.

<sup>3</sup> [http://materias.fi.uba.ar/6716/Modos\\_de\\_falla\\_en\\_componentes\\_estructurales\\_1.pdf](http://materias.fi.uba.ar/6716/Modos_de_falla_en_componentes_estructurales_1.pdf).

Consulta: enero de 2013.

### **1.2.2. Defecto**

“Cualquier aspecto o detalle geométrico, metalúrgico o mecánico que no se encuentre previsto en el diseño original del componente que por su magnitud o características pueda afectar la performance o la vida útil del componente”<sup>4</sup>.

En general, todas las soldaduras sufren defectos. En pocas palabras no existe soldadura perfecta, ya que cada una de ellas presenta discontinuidades diferentes. Existen criterios de aceptación que establecen límites entre la aceptación o el rechazo de una soldadura, y están regulados por normas internacionales.

Algunas de las discontinuidades que se dan en la soldadura pueden ser: las fisuras, sobre-monta excesiva, porosidad, cráteres de soldadura, concavidad, rechupe de raíz, exceso de penetración, socavado lateral o mordedura, falta de alineación (HI/LOW), picadura de arco, solape, oxidación, falta de penetración, falta de fusión, inclusiones de escoria, escorias alineadas e inclusiones de tungsteno.

### **1.2.3. Tipos de discontinuidades**

Las discontinuidades o defectos pueden producirse cuando se practica la soldadura y esta puede ser en cualquier pieza metálica.

---

<sup>4</sup> [http://materias.fi.uba.ar/6716/Modos\\_de\\_falla\\_en\\_componentes\\_estructurales\\_1.pdf](http://materias.fi.uba.ar/6716/Modos_de_falla_en_componentes_estructurales_1.pdf).

Consulta: enero de 2013.

#### **1.2.4. Discontinuidad inherente**

El estado de fusión es la creación de esta discontinuidad, desde que inicia la producción en este punto.

#### **1.2.5. Discontinuidad de proceso**

Este tipo de discontinuidad surge en procesos terminados o posteriores a su elaboración.

#### **1.2.6. Discontinuidades de servicio**

Las discontinuidades de servicio son a causa de factores naturales como artificiales en donde se puede determinar el ambiente y/o cargas.

### **1.3. Clasificación de las discontinuidades**

Las discontinuidades se clasifican en:

#### **1.3.1. Superficiales**

Este tipo de discontinuidades están en el exterior del material observándose a simple vista.

#### **1.3.2. Internas**

Tipo de discontinuidades que están en el interior del material y no se pueden observar a simple vista.



## **1.4. Tipos de indicaciones**

Los indicadores se dividen en tres tipos los cuales son:

### **1.4.1. Indicaciones relevantes**

Fallas que son lo suficientemente relevantes o serias para afectar el funcionamiento de servicio de la pieza.

### **1.4.2. Indicaciones no relevantes**

Son fallas que no son serias y por lo tanto no afectarían el funcionamiento de la pieza.

### **1.4.3. Indicaciones falsas**

Este tipo de indicaciones son un gran problema y pueden producirse por superficies muy ásperas o causadas por intromisión eléctrica.

“Define que la calidad de soldadura es una expresión cuyo significado depende del uso final que se dé a la soldadura. Las soldaduras de calidad pueden clasificarse como buenas y muy buenas. Las buenas soldaduras son las que cumplen con los requisitos de aspecto y que a la vez se comportan de acuerdo con lo previsto hasta que son retiradas del servicio por decisión del usuario. Las soldaduras muy buenas son las efectuadas bajo condiciones de intenso control de calidad y para las cuales la única diferencia es el aumento del

costo de producción. Todo método de inspección que no sirva algún objetivo útil es innecesario y representa un desperdicio”<sup>5</sup>.

En la publicación de soldadura de la Comisión de Energía Atómica en 2009, se definen las discontinuidades que se dan en la soldadura:

“Es importante lograr una soldadura de buena calidad para evitar estas discontinuidades, para ello los procedimientos de soldadura y soldadores deben ser calificados. Para calificar una soldadura es necesario seguir procedimientos específicos establecidos por las Normas AWS en las que básicamente se deben realizar ensayos mecánicos y END en una probeta soldada. En relación con el soldador se necesita tener las condiciones y materiales adecuados para la soldadura, una buena preparación, una buena limpieza de escoria, eliminación de porosidad superficial, evitar socavaduras, evitar salpicaduras y arranques de arco y tener una dimensión adecuada de la soldadura”<sup>6</sup>.

### **1.5. Clasificación de los ensayos no destructivos**

Entre los ensayos que se pueden utilizar para determinar los defectos de una soldadura están:

- Ensayo visual (VT)
- Líquidos penetrantes (PT)
- Partículas magnética (MT)

---

<sup>5</sup> HORWITZ, Henry. Soldadura: aplicaciones y práctica. p. 682.

<sup>6</sup> [http://materias.fi.uba.ar/6716/Modos\\_de\\_falla\\_en\\_componentes\\_estructurales\\_1.pdf](http://materias.fi.uba.ar/6716/Modos_de_falla_en_componentes_estructurales_1.pdf).

Consulta: enero de 2013.

- Ultrasonido (UT)
- Radiografía (RT)

Enrique Soria, hace énfasis en los ensayos no destructivos como:

### **1.5.1. Método de ensayo visual**

"Es el método más simple y ampliamente utilizado; sin embargo, tiene su metodología y sigue un procedimiento ordenado. Acarrea resultados rápidos y normalmente tiene costos bajos"<sup>7</sup>.

"De acuerdo a todos los códigos y normas conocidas, este método de ensayo es obligatorio y debe aplicarse a la pieza sujeta a control de calidad, antes que cualquier otro método que se quiera o deba utilizarse"<sup>8</sup>.

"Por ejemplo, el ensayo visual de una soldadura por un inspector calificado, puede revelar entre otras cosas, la siguiente información sobre la calidad de la misma"<sup>9</sup>.

- "La ausencia o presencia de discontinuidades superficiales tales como: socavado, falta de penetración, falta de fusión, porosidades, así como la

---

<sup>7</sup> SORIA LEMUS, Enrique Humberto. *Laboratorio de ensayos no destructivos de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería*. p. 23.

<sup>8</sup> Ibid. p. 23.

<sup>9</sup> Ibid. p. 23.

orientación de estas en relación con las varias regiones de la soldadura"<sup>10</sup>.

"De esta manera, los resultados obtenidos en la inspección visual pueden auxiliar en mucho, la aplicación posterior de otros ensayos no destructivos"<sup>11</sup>.

"El principio básico del ensayo visual es iluminar bien la pieza, en la región a inspeccionar; esta será examinada directamente al ojo humano o por medio de un accesorio tal como un baroscopio o una lupa"<sup>12</sup>.

### **1.5.2. Método de ensayo por líquidos penetrantes**

"El método puede ser considerado como una extensión de la inspección por ensayo visual, ya que muchas de las discontinuidades podrían no ser detectadas a través de este mismo, pero dicho ensayo debe ser llevado a cabo por un inspector experimentado"<sup>13</sup>.

"El efecto que se produce es el mismo; es decir, el líquido penetrante se aloja en la posible fisura; se remueve el exceso de penetrante por medio de un líquido removedor o agua, según sea el caso. Finalmente, se aplica talco atomizado llamado revelador, haciendo este el mismo efecto de chupar y

---

<sup>10</sup> SORIA LEMUS, Enrique Humberto. *Laboratorio de ensayos no destructivos de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería*. p. 23.

<sup>11</sup> Ibid. p. 25.

<sup>12</sup> Ibid. p. 25.

<sup>13</sup> Ibid. p. 25.

revelar el penetrante alojado en la discontinuidad, dibujando literalmente la fisura"<sup>14</sup>.

"Además, todas las discontinuidades reveladas pueden tener una indicación de profundidad y tamaño aproximados, dependiendo de varios factores, tales como el grado de dureza de material, combinando con el ancho de la indicación"<sup>15</sup>.

"El equipo que se requiere para la aplicación de este método de ensayo es extremadamente simple, de bajo costo, siendo, sin embargo, fundamental, la calidad de los líquidos utilizados"<sup>16</sup>.

### **1.5.3. Método de ensayo por partículas magnéticas**

"Este método de ensayo se utiliza para la detección y localización de discontinuidades superficiales y subsuperficiales (próximas a la superficie mas no abiertas a la misma), en materiales ferromagnéticos"<sup>17</sup>.

"Su operación está basada en el hecho de que cuando la pieza a examinar, o un área de la misma, se magnetiza, las discontinuidades existentes causarán un campo de fuga en el campo magnético"<sup>18</sup>.

---

<sup>14</sup> SORIA LEMUS, Enrique Humberto. *Laboratorio de ensayos no destructivos de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería*. p. 25.

<sup>15</sup> Ibid. p. 25.

<sup>16</sup> Ibid. p. 28.

<sup>17</sup> Ibid. p. 28.

"La presencia de este campo de fuga será detectada a través del uso de partículas ferromagnéticas finamente divididas, aplicadas sobre la superficie magnetizada, pues las mismas serán atraídas por el campo de fuga y se aglomerarán en el contorno del mismo, indicando su localización, forma y extensión"<sup>19</sup>.

#### **1.5.4. Método de ensayo por ultrasonido**

"La inspección ultrasónica es un método de ensayo no destructivo para el cual grupos de ondas de alta frecuencia introducidas en el material inspeccionado, son utilizadas para detectar discontinuidades superficiales e internas"<sup>20</sup>.

"Las ondas atraviesan el material con cierta atenuación y son reflejadas en las interfaces; este haz reflejado es detectado y analizado definiendo entonces, la presencia y localización de discontinuidades"<sup>21</sup>.

---

<sup>18</sup> SORIA LEMUS, Enrique Humberto. *Laboratorio de ensayos no destructivos de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería*. p. 28.

<sup>19</sup> Ibid. p. 28.

<sup>20</sup> Ibid. p. 28.

<sup>21</sup> Ibid. p. 31.

### 1.5.5. Método de ensayo por radiografía industrial

"Es probablemente el método de ensayo más utilizado en la actualidad en Guatemala; sin embargo, es el más delicado en cuanto a su uso, debido a que para su ejecución aprovecha la energía de radiación a través de material radioactivo o bien, por medio de rayos X"<sup>22</sup>.

"El método consiste en la obtención de una imagen del espécimen de prueba por medio de una película sensible a la radiación, la cual registra tanto la parte interna, como la parte externa de dicha pieza, incluyendo todas las discontinuidades paralelas al haz de energía de la radiación que puedan estar dentro del área de incidencia"<sup>23</sup>.

"Es importante, siempre que se suelda, realizar el cien por ciento de inspección visual por parte de un inspector calificado y utilizar los END según sea el caso"<sup>24</sup>.

---

<sup>22</sup> SORIA LEMUS, Enrique Humberto. *Laboratorio de ensayos no destructivos de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería*. p. 31.

<sup>23</sup> Ibid. p. 31.

<sup>24</sup> Ibid. p. 31.





## **2. ANÁLISIS DE LAS FISURAS EN LOS CORDONES DE SOLDADURA**

Las fisuras y discontinuidades de la soldadura repercuten en la mala calidad de la reparación o reconstrucción, así como en la posibilidad de nuevas fallas y costos elevados por accidentes inesperados. Por consiguiente, el impacto y magnitud de las mismas, repercute altamente en la operación de los sistemas estructurales en donde ocurra.

### **2.1. Definición de las fisuras en los cordones de soldadura**

Cuando existen tensiones locales que sobrepasan la carga de ruptura de un material se producen las fisuras en las uniones soldadas, sin embargo, se puede deformar la soldadura durante el proceso o al momento de finalizarla generando esto fisuras en los cordones.

Cuando se aplica la soldadura se debe tener el sumo cuidado en el primer cordón depositado, ya que en este es muy probable de ocurran las fisuras y hará que conforme se depositen más cordones, vaya incrementando la fisura a través de los demás.

Según lo anterior, la inspección visual debe ser minuciosa al ir depositando cada cordón de soldadura, ya que las fisuras son más probables en la primera pasada aunque siempre pueden resurgir en las siguientes.

## **2.2. Clasificación de las fisuras**

Las fisuras se pueden clasificar en:

### **2.2.1. Fisuras longitudinales**

Este tipo de fisuras son muy comunes en la aplicación de soldadura y estas se pueden producir en el centro del cordón y en la interface del material base con el de aporte (el primero por movimientos en la aplicación y el segundo por enfriamientos bruscos sin previo tratamiento térmico), como se puede apreciar en la figura 1.

La fisura de solidificación es cuando aparece en la soldadura y la fisura de licuación es cuando aparece en la ZAC.

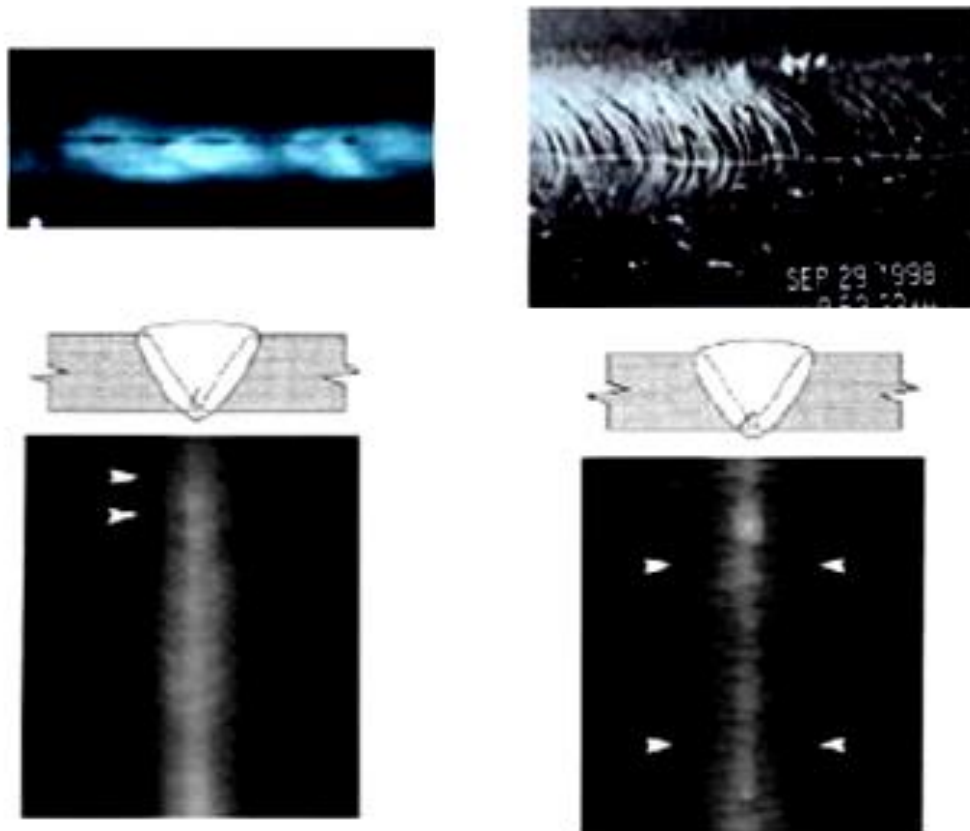
#### **2.2.1.1. Fisuración en caliente**

Este tipo de fisuras depende de la composición química, si esta es desfavorable como en el caso del azufre que forma sulfuro de hierro (SFe) estos son elementos que forman precipitados a bajo punto de fusión y generan tensiones de solidificación. Para casos particulares como este no influye el precalentamiento en el defecto, pero si es posible soldar con bajo aporte térmico.

### 2.2.1.2. Fisuración en frío

Las fisuras longitudinales son menos frecuentes que las transversales, estas son similares al espesor de un cabello y son líneas muy finas que se ven el centro del cordón como se aprecia en la figura 1.

Figura 1. Fisuras longitudinal



Fuente:

[http://soldadura.org.ar/img/2009/IMPERFECCIONES\\_EN\\_SOLDADURA\\_TIPOS\\_DE\\_DISCONTINUIDADES/09.jpg](http://soldadura.org.ar/img/2009/IMPERFECCIONES_EN_SOLDADURA_TIPOS_DE_DISCONTINUIDADES/09.jpg). Consulta: enero de 2013.

### **2.2.1.3. Fisuras transversales**

Estas fisuras, generalmente son producidas al enfriarse el material y llegar a su temperatura normal, son muy comunes en aceros duros y pueden o no continuar en el metal base. Estas se dividen en dos, las cuales son:

### **2.2.1.4. Fisuras en caliente**

Esas fisuras pueden tener diversidad de direcciones, pudiéndose presentar en cualquier material ferroso y no ferroso; estas se producen durante la solidificación de la junta siendo intergranulares.

### **2.2.1.5. Fisuras en frío**

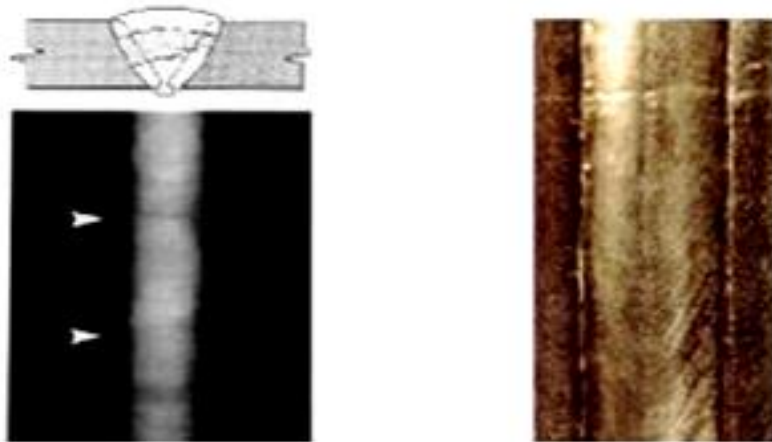
Las fisuras en frío se generan en el proceso de enfriamiento del material conforme se va acercando a la temperatura ambiente como se puede observar en la figura 2.

Estas fisuras suelen agruparse en las zonas fundidas de la junta, ya que son fisuras muy pequeñas y en algunos casos son llamadas fisuras de hidrógeno.

Este tipo de fisuras, generalmente son muy pequeñas, sin embargo, en algunos casos pueden ser tan grandes que atraviesen el cordón completamente; esto suele suceder en aceros que tienen una resistencia muy elevada.

En la radiografía que aparece en la figura 2 se puede observar una línea muy fina transversal al cordón soldado.

Figura 2. **Fisuras transversales**



Fuente: <http://josecarlosrobles.files.wordpress.com/2012/07/fisuras-en-frio.jpg>. Consulta: enero de 2013.

### **2.2.2. Fisura de interrupción o arranque (o de cráter)**

Las fisuras en caliente suelen darse cuando existen cambios bruscos de temperatura como en el caso del cambio de electrodo se somete la pieza a enfriamiento brusco y recalentamiento del material. Figura 3.

Se puede producir segregación cuando el material que es solidificado se hace a tensiones muy elevadas, el problema de interrumpir el arco es la formación de cráteres de contracción lo que genera puntos defectuosos en la soldadura.

Radiográficamente se pueden observar las fisuras teniendo una en el sentido del cordón que es más larga que las otras tres que concluyen rápidamente.

Figura 3. **Fisuras alrededor del cordón (ZAC)**



Fuente:

[http://soldadura.org.ar/img/2009/IMPERFECCIONES\\_EN\\_SOLDADURA\\_TIPOS\\_DE\\_DISCONTINUIDADES/11.jpg](http://soldadura.org.ar/img/2009/IMPERFECCIONES_EN_SOLDADURA_TIPOS_DE_DISCONTINUIDADES/11.jpg). Consulta: enero de 2013.

### **2.2.2.1. Fisuras en frío**

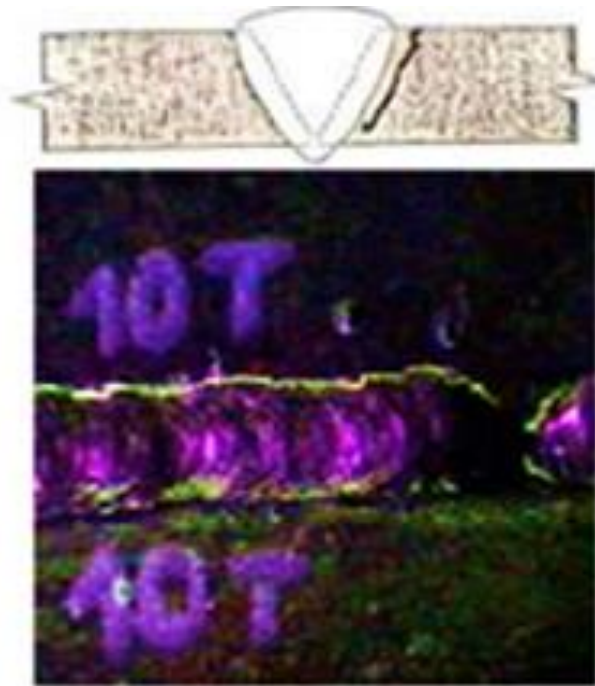
Este tipo de fisuras son comunes cuando escasea el tratamiento térmico previo, durante y post soldadura cuando existen aceros de mucho espesor.

El hidrógeno es uno de los componentes que más afectan a la soldadura y generan este tipo de defectos, cuando los granos son más gruesos existe posibilidad de fisuración; esto es evitable haciendo un precalentamiento y manteniendo la temperatura durante la aplicación de la soldadura en 200

grados centígrados durante el tiempo determinado. Por las contracciones de la junta en este caso pueden producirse tensiones muy elevadas y esto puede resurgir como fisuras en los cordones. Generalmente, estas fisuras tienen una dirección longitudinal, sin embargo, en algunos casos pueden ser transversales o al lado del cordón, como se muestra en la figura 4.

Radiográficamente la fisura tiene muy poca ondulación y se representa en la zona adyacente del cordón de soldadura.

Figura 4. **Líneas por fisuración en frío en cordón de soldadura**



Fuente:

[http://soldadura.org.ar/img/2009/IMPERFECCIONES\\_EN\\_SOLDADURA\\_TIPOS\\_DE\\_DISCONTINUIDADES/12.jpg](http://soldadura.org.ar/img/2009/IMPERFECCIONES_EN_SOLDADURA_TIPOS_DE_DISCONTINUIDADES/12.jpg). Consulta: enero de 2013.

### **2.2.3. Desgarre laminar**

Estas fisuras, generalmente se dan debajo de la ZAC y aparecen en aceros dulces y de baja aleación, de acuerdo a su geometría hace producir muchas tensiones perpendiculares al plano, sin embargo, el desgarre laminar es típico de juntas en T y/o en L y cuando se encuentran asociadas con soldaduras tensionadas.

### **2.3. Fisuración en la soldadura por su posición**

Según Aguilar Rivas en su libro: Solidificación de metales y aleaciones, comenta que las fisuras son los defectos más peligrosos que se pueden dar en la soldadura y zonas afectadas por el calor, aunque pueden darse porosidad, inclusiones, etc.

Estas nunca pueden ser aceptables en una soldadura, ya que si existen fisuras directamente en la soldadura o en la zona afectada por el calor indica problemas los cuales tienen que ser investigados antes de tener fallas catastróficas. Es necesario determinar con base en una investigación previa la causa raíz de las fisuras para tomar medidas correctoras al problema. Mientras que hay límites aceptables para otros defectos las fisuras nunca podrán ser aceptadas.

Las contracciones de la soldadura son las causantes de producir la solidificación, las tensiones y el enfriamiento que produce la fisuración en la soldadura. Estas se dividen en fisuras en caliente que, generalmente se relacionan con la solidificación y se dan a temperaturas elevadas, por otro lado están las fisuras en frío, estas se relacionan con el hidrógeno (humedad) y



surgen después de haber soldadura en el enfriamiento a temperatura ambiente. Estas fisuras no son a causa de cargas externas sino propias del proceso.

El esfuerzo de contracción que se da en el enfriamiento a temperatura ambiente es el causante de la fisuración en la soldadura en la mayoría de los casos.

Es importante saber que los esfuerzos de contracción son mayores cuando el volumen del metal a contraer es mayor, dimensiones inmensas de soldadura y procesos muy profundos de penetración son generadores de una gran cantidad de estos esfuerzos. Existen dos fuerzas opuestas, y la de tensiones producidas por contracción es una, pero la otra es por la rigidez del material base. Mientras la compatibilidad de estos dos materiales sea mayor habrá menores tensiones inducidas por estos esfuerzos.

La temperatura de precalentamiento en proceso y los tratamiento térmicos posteriores a la aplicación de soldadura son esenciales para tener un proceso inherente a estos defectos teniendo en cuenta el diseño de la unión, procedimientos de soldadura y material de aporte.

### **2.3.1. Fisuración en el centro del cordón**

Este tipo de fisuras en el centro del cordón son muy comunes y se representa como una separación en el centro del cordón de la soldadura, esto es característico de una soldadura de una sola pasada y se ven en el centro de la unión.

Por otro lado, las soldaduras de varias pasadas (varias capas de soldadura), en este caso la fisura no está en el centro del cordón geométrico, pero siempre estará en el centro del cordón como se representa en la figura 5.

Figura 5. **Fisuración en el centro del cordón**



Fuente: <http://www.duerosoldadura.es/images/tema4/1.jpg>. Consulta: 11 de enero de 2013.

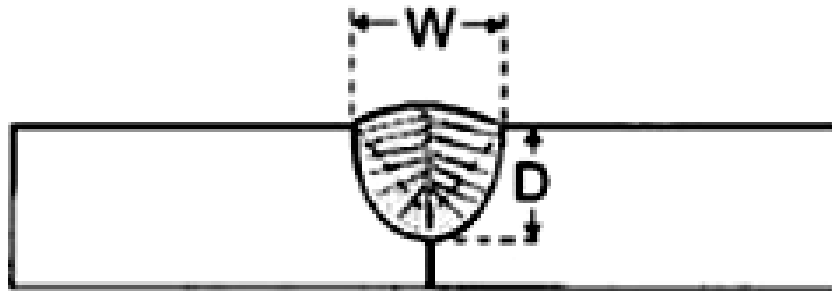
Entre las causas que pueden producir una fisura en el centro del cordón están: la fisuración inducida por segregación, fisuración inducida por la forma del cordón o fisuración inducida por el perfil superficial. Sin embargo, estos tres fenómenos es difícil diferenciar en la fisura, cuál es el causante, ya que los tres producen una fisura idéntica en el centro del cordón.

La fisuración inducida por segregación se da cuando en el proceso de solidificación de la soldadura los constituyentes de bajo punto de fusión (cinc, cobre, azufre) se separan de la mezcla. Estos componentes son inducidos hacia el centro de la unión, ya que para solidificar son los últimos en el proceso y esto hace separar el material cuando este se contrae.

### 2.3.2. Fisura inducida por la forma del cordón

Este tipo de fisura depende directamente del ancho y la profundidad en la aplicación del cordón y se da en procesos como en el arco sumergido, según se muestra en la figura 6.

Figura 6. Fisuración inducida por la forma del cordón



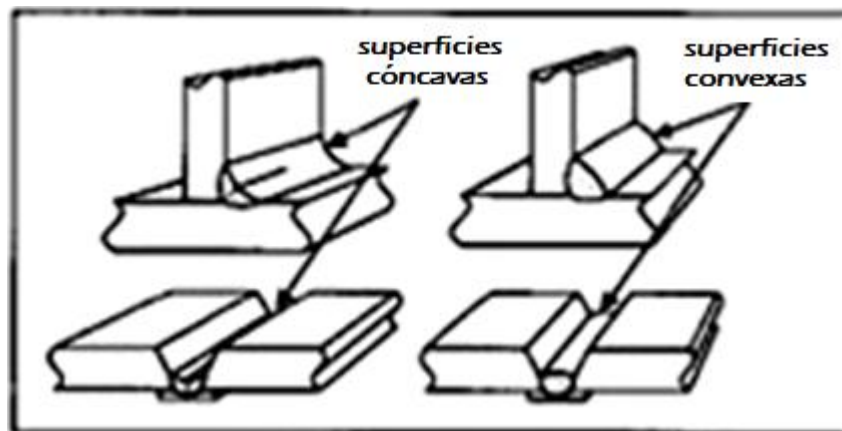
Fuente: <http://www.duerosoldadura.es/ima/tema4/3.jpg>. Consulta: 19 de enero 2013.

Para corregir este defecto de la soldadura, es necesario que las condiciones de los cordones tengan la misma anchura y profundidad, sin embargo, la recomendación es que se mantenga en una relación ancho-profundidad de 1:1 a 1.4:1.

Las fisuras en el centro del cordón dependen, en su mayoría, del perfil superficial. Si se tienen superficies cóncavas existirán contracciones que generen tensiones para la superficie y si son superficies convexas estas fuerzas actuarán en compresión.

La condición del perfil puede ser un factor determinante para la generación de fisuras en el centro del cordón. Los esfuerzos internos de contracción se darán cuando existan superficies cóncavas, y estos serán los causantes de poner bajo tensión la superficie de la soldadura. Por el contrario, las fuerzas internas de contracción pueden actuar en compresión si la superficie de la soldadura es convexa. Este tipo de superficies se observan en la figura 7. Este problema puede ser originado por un gran número de causas como las velocidades de avance altas, las tensiones de arco altas; pudiéndose corregir si se disminuye la velocidad de aporte y del arco.

Figura 7. **Fisuración inducida por el perfil de la superficie**



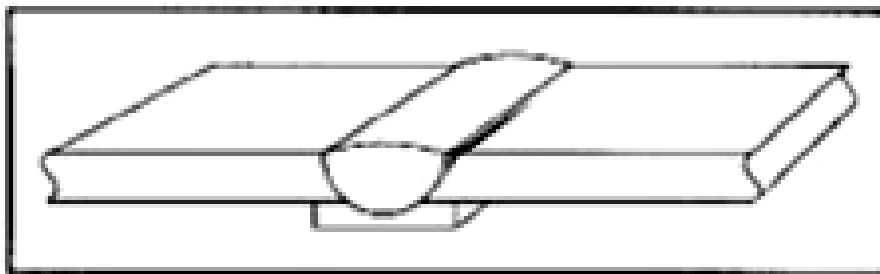
Fuente: <http://www.duerosoldadura.es/images/tema4/4.jpg>. Consulta: 20 de enero 2013.

Este tipo de superficies cóncavas son muy susceptibles a generar fisuras, tal es el caso de la soldadura en vertical descendente.

### 2.3.3. Fisuración en la zona afectada por el calor

La fisuración en la zona afectada térmicamente (ZAT), (figura 8), se produce en la zona paralela al cordón de soldadura, esta ocurre en el metal base no en la soldadura. Esta fisuración aparece luego de que el material inició su proceso de enfriado y atraviesa los 205 grados centígrados, punto en donde la humedad empieza hacer efecto y se produce una fisuración en frío.

Figura 8. Fisuración en la zona afectada por el calor



Fuente: <http://www.duerosoldadura.es/images/tema4/5.jpg>. Consulta: 21 de enero 2013.

El hidrógeno (humedad) puede afectar la soldadura desde varios puntos de vista, desde el acero, material de aporte y está presente en la atmósfera.

Las fisuras en la zona afectada por el calor dependen de la temperatura del metal base, los espesores y el bajo aporte térmico del proceso de soldadura, generando una gran velocidad de enfriamiento. Controlar el precalentamiento y tener un buen aporte térmico son los principales medios para evitar defectos en la zona afectada por el calor.



### **3. TIPOS Y CAUSAS DE LAS FISURACIONES EN LOS CORDONES DE SOLDADURA**

Las causas de fisuras en los cordones de soldadura que se analizan en este capítulo son debidas a la solidificación del metal fundido, la fusión de eutécticos, quemado o desgarre en caliente, el desgarre laminar, la fisuración en frío y la fisuración por tratamiento térmico, entre otros.

#### **3.1. Agrietamiento en caliente**

El agrietamiento en caliente contempla la fisuración producida a temperaturas elevadas durante la solidificación del metal fundido de la soldadura, la permanencia a alta temperatura de un cordón a causa del calentamiento producido por el siguiente cordón o durante un tratamiento térmico. Estos agrietamientos tienen aspectos comunes y diferenciados que justifican su análisis por separado.

##### **3.1.1. Por contracción de solidificación**

“El agrietamiento por contracción de solidificación se produce durante el paso del metal depositado desde el estado líquido al estado sólido. Ocurre a unos 200-300 grados centígrados por debajo de la temperatura de fusión y suele presentarse en el eje del depósito o entre los granos columnares pudiendo, en ocasiones, no aflorar a la superficie”<sup>25</sup>.

---

<sup>25</sup> AGUILAR RIVAS, Roberto Alejandro. *Solidificación de metales y aleaciones* p. 15.

La susceptibilidad de una soldadura a este agrietamiento depende, principalmente, de tres factores:

- La micro estructura basta de solidificación
- La segregación de constituyentes
- La geometría de la unión

El tamaño de grano del metal depositado es una consecuencia heredada del tamaño de grano de la ZAC. Si este crece, debido a una prolongada permanencia a alta temperatura por un elevado aporte térmico durante el proceso de soldeo, la epitaxis provoca que la microestructura columnar del metal depositado sea más basta.

Las segregaciones se producen durante la solidificación por el reparto de los elementos de aleación entre el sólido y el líquido y resultan inevitables. Como no todos los elementos se reparten de la misma forma su segregación será también diferente.

Los elementos que más tienden a segregarse en los aceros son: S, P, O, B, C, Ti, N e H. Si estos elementos logran combinarse para formar compuestos que se sitúen a lo largo de los bordes de grano constituirán entre estos separaciones con bajo punto de fusión.

La geometría de la unión genera tensiones durante el ciclo térmico. Cuanto mayor es el espesor de la unión mayor será el nivel de tensiones, que podrían llegar a alcanzar el valor del límite elástico a dicha temperatura. Las



tensiones tienden a ser máximas en la línea central de la soldadura y en los extremos de la misma.

Las tensiones longitudinales pueden provocar grietas transversales al cordón de soldadura. Según se desprende de las fisuras las tensiones longitudinales de tracción son superiores a las transversales que existen en el cordón de soldadura, siendo las grietas transversales más susceptibles de formarse que las longitudinales. Sin embargo, es más frecuente la presencia en las soldaduras de grandes fisuras longitudinales que puede explicarse por el hecho de que estas grietas crecen sobre sí mismas al propagarse una pequeña formada inicialmente, en tanto que las transversales deben formarse cada una de ellas y no se propagan más allá de la anchura del cordón.

### **3.1.2. Por fusión de eutécticos, quemado o desgarre en caliente**

El agrietamiento por fusión de eutécticos, quemado o desgarre en caliente, tiene su origen en las segregaciones en bordes de grano y la fusión de los mismos en la proximidad de la línea de fusión.

Las impurezas de baja solubilidad en la matriz tienden a segregarse en los bordes de grano. Durante el enfriamiento pueden formar películas de bajo punto de fusión entre los granos o eutécticos de bajo punto de fusión. La permanencia a elevada temperatura y la cantidad y tipo de impurezas en el metal base influyen en este agrietamiento, que se localiza preferentemente en la zona de la línea de fusión y en la ZAT. También podría afectar a los cordones de soldadura durante el depósito de pasadas posteriores.

### **3.1.3. Fisuración por tratamiento térmico**

La fisuración por tratamiento térmico se produce durante el calentamiento de los aceros en el rango de temperatura comprendido entre 500/650 grados centígrados y afecta la zona de grano grueso de la ZAT más que al metal depositado. Junto a la mayor facilidad de que se generen estructuras duras en las zonas de grano grueso, este no permite el deslizamiento entre granos provocando su fractura durante el tratamiento térmico de alivio de tensiones.

Las grietas suelen ser discontinuas, aunque también pueden ser continuas. Los aceros micro aleados son más sensibles a esta fisuración que los aceros al C. La utilización de precalentamiento en el soldeo de los aceros microaleados origina un apreciable crecimiento del grano.

Este efecto es frecuente en aceros estructurales y en los HSLA de baja aleación y alta resistencia cuando se manejan secciones grandes y entre los elementos de aleación se encuentren el Cr, Mo y V. Es también característico este tipo de fallo en los aceros Cr-Mo resistentes a la fluencia en caliente. En estos casos, las causas son la baja ductilidad a alta temperatura, unida a las tensiones de origen térmico. La existencia de discontinuidades como micro grietas, fallas de penetración o de fusión favorecen la aparición de grietas debidas al tratamiento térmico.

Para evitar este tipo de fallos se recomienda:

- Utilizar durante el tratamiento las más bajas temperaturas de mantenimientos posibles.

- Emplear la técnica de pasadas múltiples para afinar el grano recocido de la ZAT, junto con el uso de un metal de aporte que no sea susceptible a dicho fenómeno.

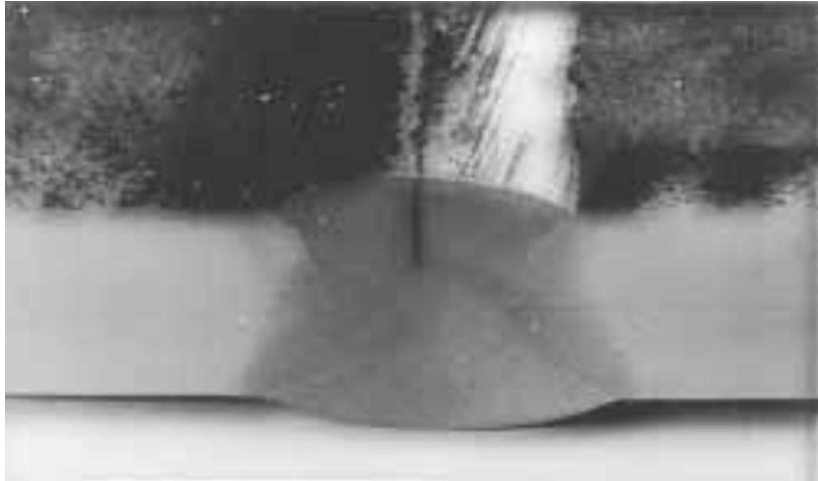
### **3.2. Agrietamiento en caliente durante la solidificación**

Las principales causas que producen el agrietamiento en caliente durante la solidificación son:

#### **3.2.1. Causas**

- Mala relación de anchura-profundidad.
- Alta velocidad de aplicación.
- Bordes con gran separación.
- Exceso de humedad.
- Incompatibilidad del material base con el material de aporte.
- Falta de tratamiento térmico previo y posterior a la aplicación de soldadura.
- Falta de control sobre las variables termodinámicas durante el soldeo.
- Discrepancia entre los índices de contracción de ambos metales.

Figura 9. **Agrietamiento en caliente**



Fuente: Manual básico - Control de la ejecución en obra de las uniones soldadas. Ingeniería de Materiales y Fabricación. p. 26.

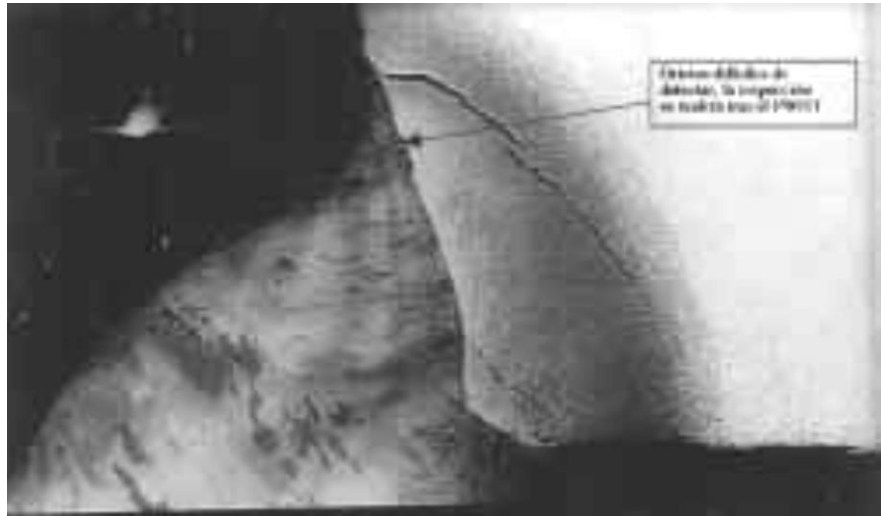
### **3.3. Agrietamiento en frío**

Las principales causas del agrietamiento en frío son:

#### **3.3.1. Causas**

- Exceso de humedad
- Espesor de la pieza es muy grande
- Exceso de carbono
- Concentración de tensiones
- Alta velocidad de aplicación

Figura 10. **Agrietamiento en frío**



Fuente: Manual básico - Control de la ejecución en obra de las uniones soldadas. Ingeniería de Materiales y Fabricación. p. 26.

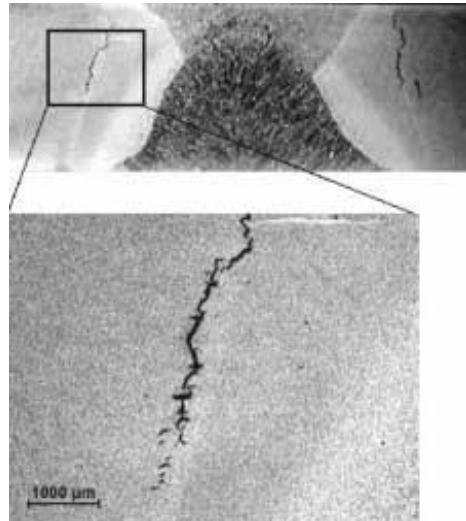
### **3.4. Agrietamiento en frío en el metal base**

El agrietamiento en frío en el metal base se debe a las siguientes razones:

#### **3.4.1. Causas**

- Falta de compatibilidad en el material de aporte y el material base
- Falta de precalentamiento en el proceso
- Exceso de humedad
- Enfriamientos bruscos
- Existencia de concentradores de tensiones

Figura 11. **Agrietamiento en frío en el metal base**



Fuente: Manual básico - Control de la ejecución en obra de las uniones soldadas. Ingeniería de Materiales y Fabricación. p. 27.

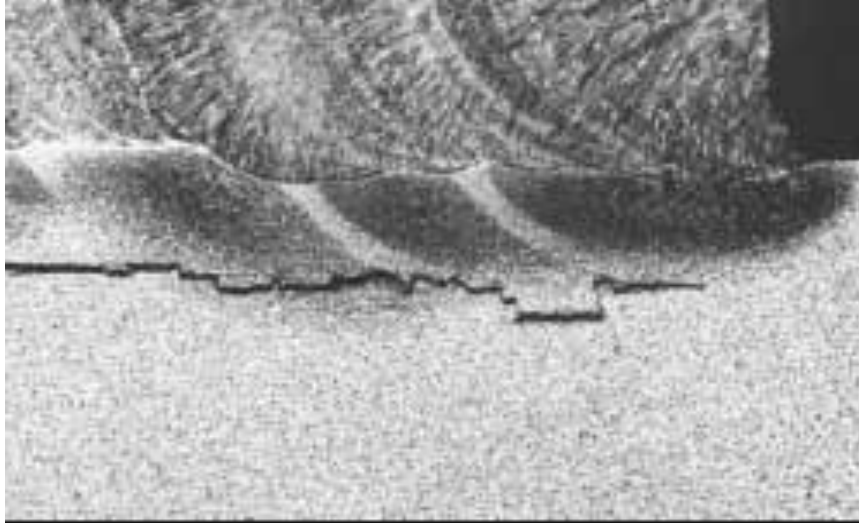
### **3.5. Desgarre laminar**

El desgarre laminar se produce por los siguientes motivos:

#### **3.5.1. 3.5.1 Causas**

- Materiales contaminados (Inclusiones no metálicas).
- Fallo por unión.
- Exceso de concentración de tensiones.
- Típico fallo de uniones en ángulo, en T, en esquina, en cruz, allí donde la concentración de tensión es alta.
- Material laminado susceptible a desgarre.

Figura 12. **Desgarre laminar**



Fuente: Manual básico - Control de la ejecución en obra de las uniones soldadas. Ingeniería de Materiales y Fabricación. p. 27.

### 3.6. **Fisura transversal**

Las fisuras transversales se clasifican en:

- Fisuras en frío
- Fisuras en caliente

### **3.6.1. Fisura transversal en frío**

Según lo estudiado de las fisuras transversales en frío se tienen las principales causas de este defecto en los aceros al carbono las cuales son:

- Metal base con alto contenido de carbono
- Metal base contaminado con impurezas
- Gran cantidad de tensiones de contracción

### **3.6.2. Fisura transversal en caliente**

Las fisuras transversales en caliente se generan por las siguientes causas:

- Gran porcentaje de humedad en la zona fundida
- Enfriamiento brusco
- Gran velocidad de enfriamiento produciendo tensiones en el cordón

## **3.7. Fisuras en las juntas**

Según lo estudiado en el capítulo anterior, las fisuras en las juntas se producen por las siguientes causas:

### **3.7.1. Causas**

- El material es de alta dureza
- Soldadura defectuosa
- Electrodo defectuosos



- Mala relación ancho-profundidad
- Material base con excesivo C
- Tensión a la raíz del cordón
- Grietas en el cráter

### **3.8. Fisuras en el material base**

Los motivos principales que generan una fisura en el material base son:

#### **3.8.1. Causas**

- Falta de precalentamiento del material base
- Exceso de humedad en el proceso
- Aceros con alta dureza
- Alta temperatura de transmisión (tratamientos térmicos)



## **4. INSPECCIÓN Y RECONSTRUCCIÓN DE FALLAS MEDIANTE EL USO DE END Y MÉTODOS DE RECONSTRUCCIÓN DE SOLDADURA**

Para la investigación y caracterización de las fallas se utilizan los ensayos no destructivos, como se verá en la aplicación de las siguientes tres fallas, por consiguiente se analizarán la solución y reconstrucción de cada una de estas fallas por medio de la aplicación de técnicas especializadas de soldadura.

### **4.1. Inspección de una falla por fatiga en un balancín**

A continuación se analizará la falla por fatiga en un balancín de trituración de clinker, identificando las características para posteriormente generar un diagnóstico que permita la reconstrucción de la pieza afectada.

#### **4.1.1. Características de la falla**

“El balancín de trituración de clinker (producto primario en la fabricación de cemento), denominado swing lever, que se aprecia en la fig. 13, constituye una masa de once toneladas métricas de peso, que sirve para la molienda de piedra y fabricación de Clinker en los molinos que, para el efecto, se usan en la industria cementera. Esta masa sufrió una fractura por fatiga desde el agujero

central, por donde se acuna el eje que sirve de pivote y de elemento de transporte de la fuerza motriz del sistema hasta la periferia”<sup>26</sup>.

Figura 13. **Falla original de *swing-lever*. Revelación por partículas magnéticas**



Fuente: AGUILAR RIVAS, Roberto Alejandro; SORIA LEMUS, Enrique Humberto. *Inspección y reparación de falla por fatiga en un balancín para la trituración de piedra en la fabricación de cemento*. p. 7.

#### **4.1.2. Diagnóstico**

La falla fue inspeccionada con base en los ensayos no destructivos según la Norma AWS, los ensayos utilizados para el análisis fueron la inspección visual, líquidos penetrantes, partículas magnéticas y ultrasonido.

---

<sup>26</sup> AGUILAR RIVAS, Roberto Alejandro; SORIA LEMUS, Enrique Humberto. *Inspección y reparación de falla por fatiga en un balancín para la trituración de piedra en la fabricación de cemento*. p. 7.

El diagnóstico dio como resultado que las condiciones de trabajo de la pieza no eran las adecuadas, fallando por fatiga mecánica y produciendo agrietamiento con ramificaciones no definidas, pudiendo dejar tensiones residuales en el lugar del fallo y por esto producir nuevas fallas como se puede observar en la figura 13.

#### **4.1.3. Práctica de reconstrucción**

Con base a los resultados de los END se procedió a reparar la falla, utilizando electrodo de Cromo-Níquel (70/15) sin la aplicación de tratamientos térmicos, sin embargo, no se consideró que el material base era diferente al material de aporte y, por consiguiente, eso implica una disimilitud de los coeficientes de transferencia calórica y de contracción de ambos materiales, habiendo fallado la reparación horas después. En la figura 14 se muestra la primera reparación.

Figura 14. **Zona de desprendimiento de la primera reparación**



Fuente: AGUILAR RIVAS, Roberto Alejandro; SORIA LEMUS, Enrique Humberto. *Inspección y reparación de falla por fatiga en un balancín para la trituración de piedra en la fabricación de cemento*. p. 9.

Luego de la primera reparación se llevó a cabo el ensayo a la chispa, para determinar el tipo de acero del material base, ubicándolo en un acero AISI 1015/18. De acuerdo a lo determinado se procedió a generar el procedimiento de reparación teniendo en cuenta el tipo de material base y sus coeficientes de transferencia calórica, habiendo seleccionado el material de aporte compatible con el material base y determinando la necesidad de aplicar tratamientos térmicos antes, durante y después de la soldadura.

Estos ensayos fueron desarrollados artesanalmente por medio de multiflamas aplicando calor en forma directa en el sitio de operación.

Para los efectos de protección del proceso por el ambiente, se construyó un recinto de aislamiento para evitar fallas y defectos durante el procedimiento de reparación.

En la figura 15 se puede observar la reparación final del balancín, teniendo en cuenta todos los factores para evitar una nueva falla como en el caso de la primera reparación.

Figura 15. **Terminación del proceso de reconstrucción**



Fuente: AGUILAR RIVAS, Roberto Alejandro; SORIA LEMUS, Enrique Humberto. *Inspección y reparación de falla por fatiga en un balancín para la trituración de piedra en la fabricación de cemento.* p. 10.

#### **4.1.4. Resultados y conclusiones**

El proceso de soldadura fue realizado con exactitud en el cordón, manteniendo la calidad desde el inicio hasta el final, siendo evaluado por medio de la aplicación de los END, dando como resultado ninguna discontinuidad ni defecto en la soldadura de acuerdo a las Normas AWS.

Se puede concluir que el proceso de investigación e identificación de fallas por END, es confiable, y la soldabilidad depende no solo del material de aporte y la relación del material base (coeficiente de transferencia calórica y dilatación) sino de la calificación de los soldadores. Teniendo en cuenta las Normas AWS y ASM.

## **4.2. Inspección de una falla de un horno de clinker**

A continuación se analizará la falla de un horno de clinker, identificando las características, el diagnóstico y el método de reconstrucción de la falla:

### **4.2.1. Características de la falla**

“El horno de clinker analizado, es un horno preparador de materia prima para la fabricación del cemento en la industria de dicho material. El material de construcción es acero al bajo carbono”<sup>27</sup>.

Por las características del horno es susceptible a solicitaciones del tipo mecánico, térmico y por fatiga. Por tanto, las fallas que se pueden presentar en la chapa del horno son en forma de fisuras, y se identifican cuando ya tienen un tamaño considerable produciendo fallas catastróficas.

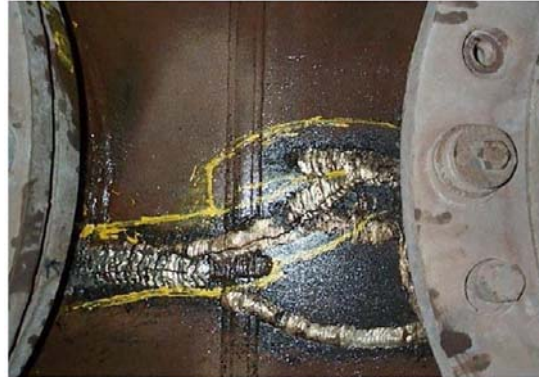
Empleando los ensayos no destructivos (END): inspección visual, ultrasonido y partículas magnéticas, se puede apreciar las fallas en las zonas de aplicación de acero inoxidable (figura 16), principalmente en las zonas afectadas por el calor (figura 17).

---

<sup>27</sup> AGUILAR RIVAS, Roberto Alejandro; SORIA LEMUS, Enrique Humberto. *Inspección y reparación de falla de un horno de clinker en la industria cementera*. p. 6.

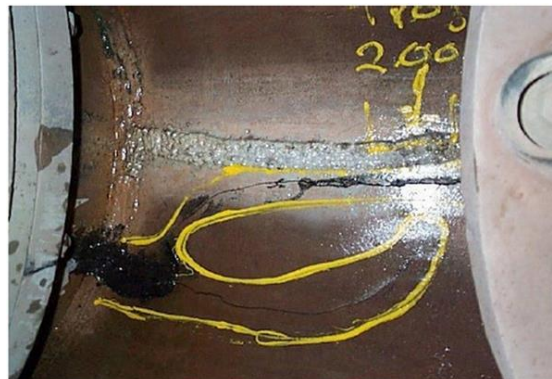


Figura 16. **Fallas en las soldaduras de acero austenítico aplicado en metal base de acero al carbono**



Fuente: AGUILAR RIVAS, Roberto Alejandro; SORIA LEMUS, Enrique Humberto. *Inspección y reparación de falla de un horno de clinker en la industria cementera*. p. 6.

Figura 17. **Fallas en las zonas afectadas por el calor y en el metal base creciendo en direcciones caprichosas**



Fuente: AGUILAR RIVAS, Roberto Alejandro; SORIA LEMUS, Enrique Humberto. *Inspección y reparación de falla de un horno de clinker en la industria cementera*. p. 8.

#### **4.2.2. Diagnóstico**

Como se observa en las figuras 18 y 19, las fisuras se encuentran en la chapa de la virola, según el análisis del diagnóstico se determinó que eran producidas por fatiga mecánica, aunque el estudio demostró también, que existía una combinación de fatiga térmica. Dado que la pieza ya había sido reparada y se llegó a la conclusión que las fisuras encontradas en la soldadura de acero inoxidable y la zona afectada por el calor eran consecuencia de un mal diseño de la soldadura y de la diferencia de las propiedades termodinámicas entre el material base y el material de aporte: coeficiente de transferencia calórica y de contracciones disímiles.

#### **4.2.3. Práctica de reconstrucción**

De acuerdo al diagnóstico realizado se procedió a diseñar un procedimiento de reparación, tomando en cuenta el material base y las condiciones de trabajo del horno. Por su complejidad se procedió a la utilización de partículas magnéticas durante todo el proceso de reconstrucción, para garantizar la calidad de todos los cordones.

Basados en lo anterior y de acuerdo a las Normas AWS, se escogió un material de aporte para la reparación, similar a la del material base (composición química) y tratamiento térmicos pre, durante y postsoldadura, utilizando un multiflamas para la elaboración.

Anterior al proceso de soldadura se realizó la inspección por partículas magnéticas como se observa en la figura 18, para identificar las fisuras.

Figura 18. **Inspección por partículas magnéticas de las fisuras, antes de iniciar el proceso de soldadura**



Fuente: AGUILAR RIVAS, Roberto Alejandro; SORIA LEMUS, Enrique Humberto. *Inspección y reparación de falla de un horno de clinker en la industria cementera*. p. 9.

El proceso de reconstrucción continúa con la preparación del área a soldar, empleando pulidoras mecánicas, dimensionado de biseles, tratamientos térmicos para llegar hacer una reparación, como se observa en la figura 19, cumpliendo con todos los estándares de calidad.

Figura 19. **Presentación final de una reparación, por uno de los lados extremos del casco del horno**



Fuente: AGUILAR RIVAS, Roberto Alejandro; SORIA LEMUS, Enrique Humberto. *Inspección y reparación de falla de un horno de clinker en la industria cementera*. p. 12.

#### **4.2.4. Resultados y conclusiones**

La soldabilidad de los materiales fue total, los materiales que se seleccionaron para la reparación fueron los indicados y estos se pueden observar en la figura 19, además se aplicó un tratamiento térmico específico para su reparación. Por último, se aplicó ultrasonido con el fin de verificar si la pieza había sido bien reparada, y efectivamente, se confirmó la correcta soldadura.

Es importante apoyarse permanentemente en las normas específicas de las AWS, API, ASTM, etc., y evitar los procesos de reparación sin fundamentos científico-técnicos, para evitar incurrir en costos de mala aplicación de soldadura.

### **4.3. Inspección de una falla en un crisol para galvanización de chapas de acero**

A continuación se analizará la falla en un crisol para la galvanización para chapas de acero, identificando las características para generar un diagnóstico que permita la reconstrucción de la pieza.

#### **4.3.1. Características de la falla**

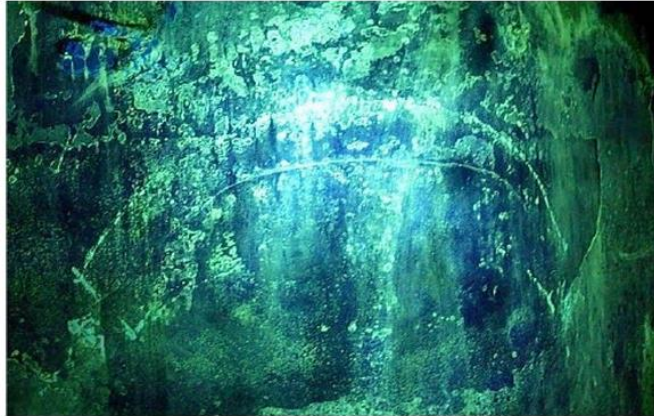
Se analizan las fallas en un crisol para galvanización de chapas de acero al carbono, AISI 1006, mediante el uso de ensayos no destructivos: inspección visual, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, ultrasonido.

“Se realizó la inspección visual debido a la apariencia de la falla, sin embargo, hubo necesidad de aplicar líquidos penetrantes con luz ultravioleta como se observa en la figura 20, partículas magnéticas (figura 21) y ultrasonido en toda la periferia cercana a las fallas, sin encontrar discontinuidades adicionales”<sup>28</sup>.

---

<sup>28</sup> AGUILAR RIVAS, Roberto Alejandro; SORIA LEMUS, Enrique Humberto. *Inspección y reparación de una falla en un crisol para galvanización de chapas de acero*. p. 8.

Figura 20. **Revelación de la fisura mayor con aplicación de luz ultravioleta**



Fuente: AGUILAR RIVAS, Roberto Alejandro; SORIA LEMUS, Enrique Humberto. *Inspección y reparación de una falla en un crisol para galvanización de chapas de acero*. p. 8.

Figura 21. **Revelación de la misma fisura por partículas magnéticas**



Fuente: AGUILAR RIVAS, Roberto Alejandro; SORIA LEMUS, Enrique Humberto. *Inspección y reparación de una falla en un crisol para galvanización de chapas de acero*. p. 11.

### **4.3.2. Diagnóstico**

Al ver las fallas que se presentan en el crisol, se analiza que este es sometido a temperaturas de trabajo fluctuantes, manteniendo temperaturas elevadas con cambios severos y así lograr la temperatura de galvanización adecuada en el baño de zinc.

En las fallas, también se vio involucrado el manejo del equipo con fluctuaciones térmicas, dando como diagnóstico que fueron producidas por la combinación de la fatiga mecánica y térmica, teniendo ciclos constantes y repetidos de incrementos y reducciones de temperatura.

### **4.3.3. Conclusiones y recomendaciones**

La práctica de los ensayos no destructivos es vital para el reconocimiento de fallas como se observó en las figuras 20 y 21, ya que es una herramienta de investigación de fallas y discontinuidades de los equipos utilizados en la industria. Los resultados que los END proporcionan facilitan el diseño y ejecución de los procesos de recuperación. Es de vital importancia utilizar procesos de soldadura respaldados con la utilización de las Normas AWS, ASTM y API.





## **5. ANÁLISIS DE FISURAS EN SOLDADURAS POR MEDIO DE INSPECCIÓN VISUAL DEPENDIENDO DE LAS CONDICIONES DE APLICACIÓN**

El siguiente capítulo presenta una serie de casos reales, enfocados en los defectos de la soldadura, haciendo un análisis por medio de la inspección visual; estos defectos dependerán de la incompatibilidad del material base con el material de aporte así como de la variación de amperaje en la aplicación de la soldadura simulando un soldador inexperto creador de tales defectos.

Para el análisis de la falla se recurrirá a la utilización del END: inspección visual, ya que las fallas provocadas serán evidentes para la investigación.

### **5.1. Análisis de la falla por medio de inspección visual**

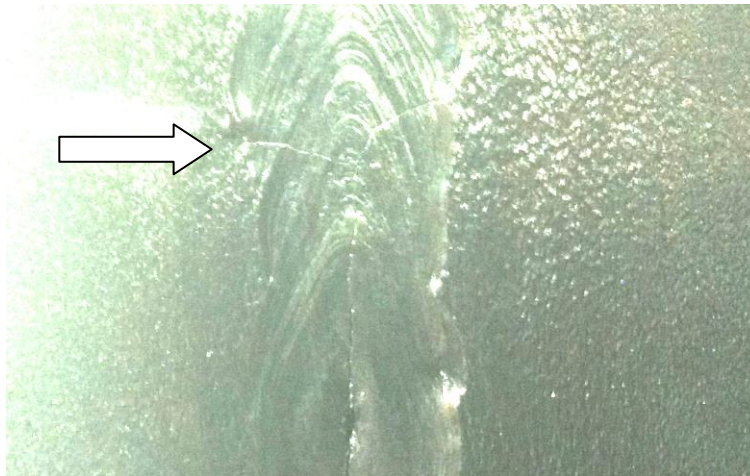
Existe gran variedad de defectos en la aplicación de soldadura, sin embargo, las fisuras son uno de los defectos más recurrentes, ya sea por una mala práctica o por falta de conocimiento del soldador.

La falla se analiza por medio de inspección visual, con el fin de determinar el tipo de fisuras que se encuentran en la soldadura. Las soldaduras analizadas fueron realizadas para reparar la falla de una pieza.

### 5.1.1. Tipos de fisuras

Los tipos de fisuras analizados en esta soldadura se dividen en dos: longitudinales al centro del cordón y transversales al mismo. En la figura 22 se muestra una ramificación de una fisura transversal teniendo una unión con una fisura longitudinal, esto es apreciable en la inspección visual de la soldadura.

Figura 22. **Ramificación de una fisura transversal y una fisura longitudinal en el centro del cordón**

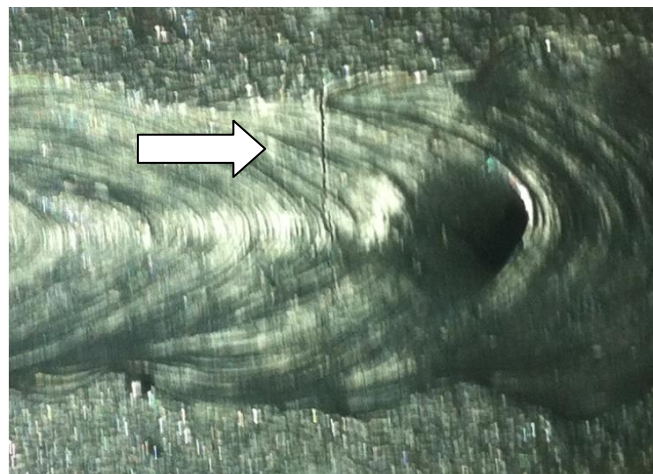


Fuente: elaboración propia.

Se puede observar cómo la fisura atraviesa el cordón de soldadura tanto horizontal/transversal y longitudinalmente; por consiguiente, la pieza soldada tenderá a fallar en estos puntos generando otras fisuras a su alrededor por las tensiones superficiales que la falla generará.

En la figura 23 se observa una fisura transversal, la cual se produjo por combinación de elementos que al momento de enfriarse o alcanzar la temperatura ambiente produjeron la fisura en el cordón, sin embargo, existen casos donde este tipo de fisuras se prolongan al metal base.

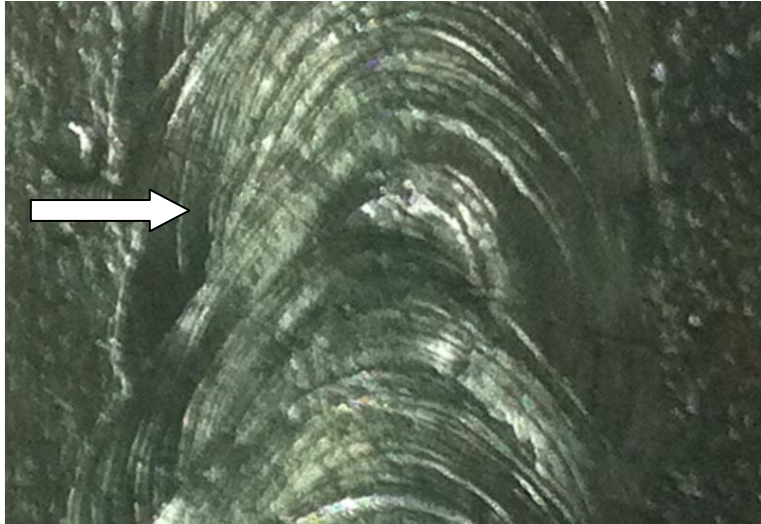
Figura 23. **Fisura transversal al cordón de soldadura**



Fuente: elaboración propia.

Al inspeccionar este tipo de fisura se observa que inicia directamente en el cordón de soldadura sin prolongación en el material base; sin embargo, para aclarar todas las dudas se requeriría de un END más minucioso, aunque concluyendo en el defecto de la fisura perceptible al ojo humano se descarta la pieza para una nueva reparación y no incurrir en costos de análisis de mayores recursos. La figura 23 muestra una fisura horizontal que corta totalmente el cordón de soldadura.

Figura 24. **Fisura transversal atravesando completamente el cordón de soldadura**



Fuente: elaboración propia.

Las fisuras longitudinales encontradas en la pieza se dan, generalmente, por movimientos que se producen cuando se aplica la soldadura o después de ya aplicada, pudiendo ser un causal de ella el enfriamiento brusco, y en algunos casos de aplicación industrial, en espesores grandes, la falta de precalentamiento de la pieza. En la figura 25 se muestra un caso gráfico de lo antes explicado, se puede observar una fisura longitudinal en el centro del cordón dejando inhabilitada la pieza para usos posteriores sin previa reparación.

Figura 25. **Fisura longitudinal**



Fuente: elaboración propia.

Las fisuras analizadas muestran daños catastróficos en las piezas debiendo ser reparadas antes de su utilización, es importante conocer las causas de este tipo de defecto por la recurrencia que tiene en soldadores con falta de experiencia y conocimiento en la aplicación de la soldadura.

Las fisuras se producen, frecuentemente, en la primera aplicación, por ello es importante la inspección visual minuciosamente antes de las otras aplicaciones.

## **5.2. Características y aplicaciones de los electrodos más comunes utilizados en las soldaduras de aceros al carbono**

Según el Manual de electrodos ESAB CONARCO se explicarán las características y aplicaciones de los electrodos utilizados en las soldaduras.

### **5.2.1. Características del electrodo 7018**

La clasificación del electrodo es AWS A5.1 E7018-1, siendo un electrodo con polvo de hierro en su revestimiento y bajo hidrógeno. Escoria básica que deposita cordones de calidad radiográfica. Excelentes propiedades de impacto a bajas temperaturas. Construcciones soldadas de gran responsabilidad, con aceros al C-Mn y de baja aleación con resistencia a la tracción hasta 560 MPa. Soldadura de aceros hasta 0,45 por ciento de carbono y aceros para uso naval de grados A, D y E. Apto para juntas disímiles entre aceros de bajo carbono y alta resistencia y de aceros al C-Mn que deban trabajar a bajas temperaturas (hasta -29 grados centígrados) o altas temperaturas (hasta 540 grados centígrados). Su composición química es C 0,08 por ciento, Mn 1,25 por ciento y Si 0,45 por ciento. Teniendo estas características operativas CC (+).

### **5.2.2. Características del electrodo 6013**

La clasificación del electrodo es AWS A5.1 E6013, siendo un electrodo de revestimiento rutílico con muy buena terminación de cordón y fácil desprendimiento de escoria. Penetración mediana y cordón convexo. Es el electrodo más usado en chapa fina y de filete. Amplio rango de intensidades. Se utiliza en carrocerías, carpintería metálica, conductos de ventilación, hornos, vagones y aplicaciones similares.

Su composición química es C 0,08 por ciento, Mn 0,39 por ciento y Si 0,29 por ciento. Teniendo estas características operativas CC (-) CA OCV (50 V).

### **5.3. Análisis en la reducción de calidad en la soldadura**

Según el análisis de las fisuras encontradas como se indicó anteriormente y conociendo las características del material de aporte, se procedió a realizar el diagnóstico que generó estos defectos, haciendo un análisis de la relación de amperaje dependiendo del tipo de material de aporte.

#### **5.3.1. Variación de amperaje dependiendo del electrodo**

En las siguientes figuras se verá representada la variación de amperaje en la aplicación de soldadura y como esto puede representarse como defectos ocasionados por falta de conocimiento y experiencia del soldador.

Las figuras 26, 27, 28 y 29 representa el electrodo E7018-1 teniendo una variación de amperaje y demostrando como esto repercute en la aparición de defectos en la soldadura.

Figura 26. **Electrodo E7018 amp. 120**



Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Electrodo E7018 amp. 135**



Fuente: elaboración propia.

Se observa que en la figura 26 se tiene un cordón con falta de amperaje, proporcionando baja calidad en su acabado, al incrementar el amperaje a 135 como se observa en la figura 27, la calidad del cordón mejora considerablemente.

Figura 28. **Electrodo E7018 amp. 150**



Fuente: elaboración propia.



Figura 29. **Electrodo E7018 amp. 200**



Fuente: elaboración propia.

En la figura 29 se observa cómo la calidad de la soldadura es afectada por la variación en el amperaje, teniendo en la figura 28 una soldadura casi perfecta tal y como lo indica el punto de fusión del E7018. Cabe destacar que conforme se aumenta el amperaje como se ve en la figura 29 se da la aparición de porosidad en la soldadura y conforme se reduce se convierte en una soldadura de baja calidad susceptible a defectos como se indica en el análisis.

Las figuras 30, 31 y 32, representan el electrodo E6013-1 teniendo una variación de amperaje y demostrando cómo esto repercute en la aparición de defectos en la soldadura.

Figura 30. **Electrodo E6013 amp. 75**



Fuente: elaboración propia.

En la figura 30 se encuentra un cordón con falta de amperaje proporcionando falta de continuidad y calidad en el mismo. Al ir incrementando el amperaje a 85 como lo demuestra la figura 31, el cordón va siendo más uniforme y con menor susceptibilidad a defectos.

Figura 31. **Electrodo E6013 amp. 85**



Fuente: elaboración propia.

Figura 32. **Electrodo E6013 amp. 100**



Fuente: elaboración propia.

En la figura 32 se muestra un cordón de soldadura de buena calidad, sin mostrar defectos trabajando a un amperaje de 100, dado que el fabricante recomienda trabajarse entre este rango.

Figura 33. **Electrodo E6013 amp. 150**



Fuente: elaboración propia.

En estas soldaduras se observa cómo la calidad se degrada conforme se aleja de lo recomendado por el fabricante del material de aporte, teniendo en cuenta que es de penetración mediana y cordón convexo, sin embargo, en la figura 33 se observa que la forma ya no es de un cordón convexo sino de un material sobrecalentado, teniendo el lado opuesto que es la figura 30 donde el bajo amperaje hace que la soldadura no sea continua y sea de mala calidad.

#### **5.4. Análisis de resultados**

Al realizar un análisis de los resultados obtenidos por inspección visual en las gráficas precedentes, se observa como las soldaduras pueden disminuir su calidad variando un componente del proceso. Se puede destacar el uso de los END como una alternativa confiable para el análisis de los defectos y determinar que la soldabilidad de los materiales en juego no depende solo de la compatibilidad del material base y material de aporte sino de la experiencia y conocimiento del soldador, así como las aplicaciones de tratamientos térmicos específicos.

Se pueden observar fisuras expuestas transversales y longitudinales causadas por movimientos durante y posteriores a la soldadura, teniendo cambios bruscos de temperaturas en lo que el material se acerca o alcanza la temperatura ambiente.

Por otro lado se observa cómo la variación de amperaje hace tener soldaduras de menor calidad simulando la inexperiencia y la falta de conocimiento del soldador, así como diferente material de aporte, y por consiguiente, obteniendo defectos en la soldadura que se han estudiado en los capítulos anteriores.

Es recomendable apoyarse en normas establecidas tales como ASTM, API, etc., para evitar reparaciones momentáneas y sin fundamento. Y tener en cuenta la asesoría de personal calificado para tomar decisiones al momento de alguna reparación y así evitar riesgos para la seguridad de las personas. Es evidente, que se deben tener claros los conceptos de transferencia calórica y dilatación sobre el material base y material de aporte para lograr soldaduras perfectas, junto con la experiencia de personal calificado y las buenas condiciones de trabajo.

Los prototipos utilizados en la investigación fueron de gran ayuda para la explicación de la misma, sin embargo, quedaron ciertas figuras que a continuación se analizan para esclarecer cualquier duda.

Figura 34. **Cordón con fisuras expuestas**



Fuente: elaboración propia.

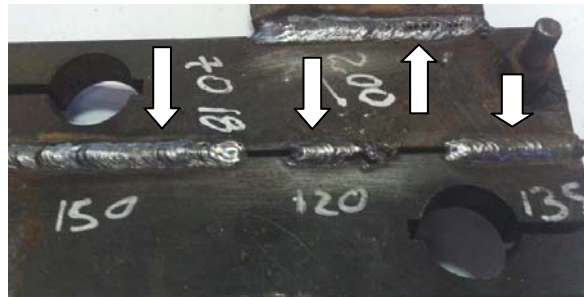
En la figura 34 se muestra una variedad de fisuras transversales y, en la figura 35 se muestra claramente una fisura longitudinal que atraviesa el cordón en el centro.

Figura 35. **Fisura longitudinal en el centro del cordón**



Fuente: elaboración propia.

Figura 36. **Prueba de amperajes con un electrodo E7018**



Fuente: elaboración propia.

La figura 36 representa pruebas para simular la inexperiencia del soldador y variando las condiciones de operación para determinar sobre qué factores repercutía la aparición de defectos y mala calidad de la soldadura.

## CONCLUSIONES

1. De acuerdo a lo expuesto en el desarrollo del presente trabajo, el aparecimiento de fisuras y fallas totales en las piezas soldadas depende de tres aspectos fundamentales, a saber:
  - Incompatibilidad entre el material de aporte y el metal base de la junta. Esto debido a diferencias considerables en la composición química de ambos metales que produce diferencia entre los índices de contracción o dilatación de los mismos, debido a diferentes coeficientes de transferencia calórica, generando como consecuencia los diferentes tipos de fisuración citados, y que pueden crecer durante el proceso de soldeo, o bien posterior al mismo.
  - Falta de control sobre las variables termodinámicas durante el soldeo, tales como temperatura y velocidad de avance del cordón en sí, humedad, medio ambiente, velocidad de enfriamiento, etc.
  - Falta de conocimiento de la aplicación de tratamientos térmicos específicos durante el proceso, que pueden señalarse como precalentamiento de la junta que se va a realizar; mantenimiento de temperatura definida durante el proceso, revenido posterior y/o calentamiento de la junta realizada.
  
2. La soldabilidad depende de la compatibilidad del material base y el material de aporte, así como del control de las variables termodinámicas señaladas en el párrafo precedente.

3. Es importante realizar el diseño ingenieril de soldadura de acuerdo a las normas preestablecidas, tales como las especificadas por la AWS, ASME, ASTM, API, entre otras.
4. Es importante la inspección durante todo el proceso de soldadura para evitar fallos que conlleven a fallas catastróficas.
5. Los métodos de END son indispensables para el análisis de los defectos de la soldadura, para poder tomar decisiones y tener un proceso de reconstrucción efectivo y consistente.



## RECOMENDACIONES

1. Es importante que los practicantes del mantenimiento curativo en la industria se avoquen al personal calificado en soldadura para la toma de decisiones y así evitar recurrir en gastos elevados como también riesgos humanos por falta de conocimiento y experiencia.
2. Tomar en cuenta en el análisis y proceso de reconstrucción, las normas específicas según sea el caso, como las AWS, ASTM y API entre otras.
3. La asesoría del proveedor sobre el material de aporte debe explicar claramente las características y aplicaciones del mismo para evitar incompatibilidades con el material base. Sin embargo, ingeniería de planta la será la responsable de la selección o diseño de los procesos específicos.
4. El factor humano es el más importante y por ello debe de trabajarse bajo normas de seguridad industrial y EPP al momento de la aplicación de soldadura.
5. A la Escuela de Ingeniería Mecánica, especialmente en lo atinente al proyecto de investigaciones metalúrgicas en el área de soldadura, continuar con las investigaciones sobre las causas que puedan originar fallas y defectos en los procesos así como el desarrollo de procesos especiales de soldadura.



## BIBLIOGRAFÍA

1. AGUILAR RIVAS, Roberto Alejandro. *Introducción a la inspección de soldaduras*. Proyecto de investigación de Ingeniería Mecánica. Universidad San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1989. 97 p.
2. \_\_\_\_\_. SORIA LEMUS, Enrique Humberto. *Inspección y reparación en la falla de un horno de clinker en la industria cementera*. Proyecto de investigación aplicada mediante el uso de END y métodos empíricos de reconstrucción por soldadura de Ingeniería Mecánica. Universidad San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2009. 104 p.
3. \_\_\_\_\_. *Inspección y reparación en la falla por fatiga en un balancín para la trituración de piedra en la fabricación de cemento*. Proyecto de investigación aplicada mediante el uso de END y métodos empíricos de reconstrucción por soldadura de Ingeniería Mecánica. Universidad San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2008. 201 p.
4. \_\_\_\_\_. *Solidificación de Metales y Aleaciones*. Proyecto de investigaciones metalúrgicas de Ingeniería Mecánica. Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2011. 117 p.

5. BERCERUELO RODRÍGUEZ, Mario, et al. *Fisuración de soldadura*. [en línea]. <<http://www.duerosoldadura.es/tema4.php>> [Consulta: 3 de febrero de 2013].
6. BONIFACE E., Rossi. *La soldadura y sus aplicaciones: Manual para el estudio de la técnica y prácticas industriales*. España: Reverté, 1950. 407 p.
7. CONARCO. *Electrodos, características y aplicaciones. F-CO 001-005*. Argentina: ESAB, 2006. 310 p.
8. ENCARNACIÓN FRANCO, Elizabeth Alexandra. *Implementación de inspección no destructiva de soldadura en la empresa Índima S.A.* Tesis de Ing. Mecánico. Director. Ing. Miguel Villacrés. Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2010. 255 p.
9. GRANJÓN, Humberto. *Bases metalúrgicas de la soldadura*. 2a ed. Francia: Masson, 2012. 250 p. ISBN: 978-84-604-7421-0.
10. HORWITZ, Henry. *Soldadura: aplicaciones y práctica*. México: Alfaomega, 2003. 787 p. ISBN: 9789701502303.
11. LÓPEZ BARREIRO, René. *Defectología de soldadura*. [en línea]. <<http://www.scribd.com/doc/6164030/Defectologia-de-La-Soldadura>> [Consulta: 16 de febrero de 2013].

12. *Modos de falla en componentes estructurales soldados*. [en línea] <[http://materias.fi.uba.ar/6716/Modos\\_de\\_falla\\_en\\_componentes\\_estructurales\\_1.pdf](http://materias.fi.uba.ar/6716/Modos_de_falla_en_componentes_estructurales_1.pdf)> [Consulta: 6 de enero de 2013].
13. PÉREZ NAVARRO, Julián, et al. *Control de la ejecución en obra de las uniones soldadas*. Cartagena: Consejería de Obras Públicas, Vivienda y Transporte de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia, 2007. 41 p.
14. REINA GÓMEZ, Manuel. *Soldadura de los aceros: aplicaciones*. 4a ed. Madrid: Manuel Reina Gómez, 2003. 506 p. ISBN: 9788460774877.
15. ROSARIO FRANCIA, Samuel. *Imperfecciones en soldadura tipos de discontinuidades*. [en línea]. Perú: 2013. <[http://www.soldadura.org.ar/index.php?option=com\\_content&view=article&id=186:imperfecciones-en-soldadura-tipos-de-discontinuidades&catid=20:investigacion](http://www.soldadura.org.ar/index.php?option=com_content&view=article&id=186:imperfecciones-en-soldadura-tipos-de-discontinuidades&catid=20:investigacion)> [Consulta: 23 de marzo 2013].
16. SÁNCHEZ MANRÍQUEZ, Elias Octavio. *Uso y aprovechamiento de electrodos en la soldadura manual*. Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile, 2005. 105 p.
17. SMITH, William F.; HASHEMI, Javad; PELLEJERO, Larena Alicia. *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. 3a ed. México: McGraw-Hill Interamericana, 2006. 719 p. ISBN 978-970-10-5638-7.

18. SORIA LEMUS, Enrique Humberto. *Laboratorio de ensayos no destructivos de la carrera de Ingeniería Mecánica*. Trabajo de graduación de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2004. 68 p.

## ANEXO

La Normas AWS D1.1-2004 es una fuente de indicación en busca de la mejor calidad del proceso.

### 6. Inspección

- 6.1. Parte A – Requisitos generales
- 6.2. Parte B – Responsabilidad del contratista
- 6.3. Parte C – Criterio de aceptación
- 6.4. Parte D – Procedimientos del NDT
- 6.5. Parte E – Ensayos radiográficos
- 6.6. Parte F – Prueba ultrasónica
- 6.7. Parte G – Otros métodos de inspección

Preparado por la American Welding Society (AWS) Comité D1 de Soldadura Estructural Bajo la dirección del AWS Technical Activities Committee  
Aprobado por el AWS Board of Directors.

Según el Ing. Xavier Ycasa de la Universidad Politécnica de Madrid, publica los defectos de la soldadura en 4 básicas tablas donde indica causas y soluciones que se presentan a continuación:

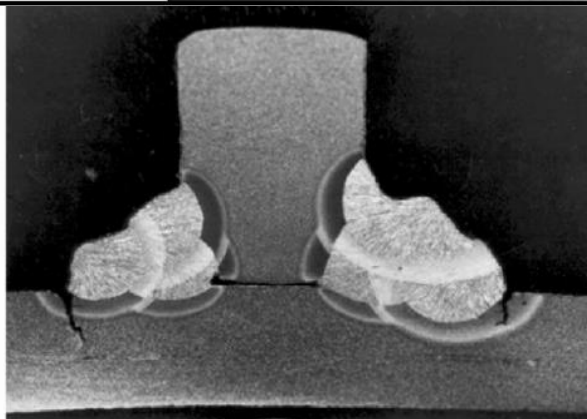
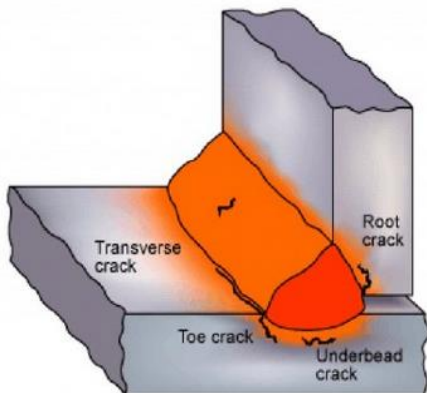
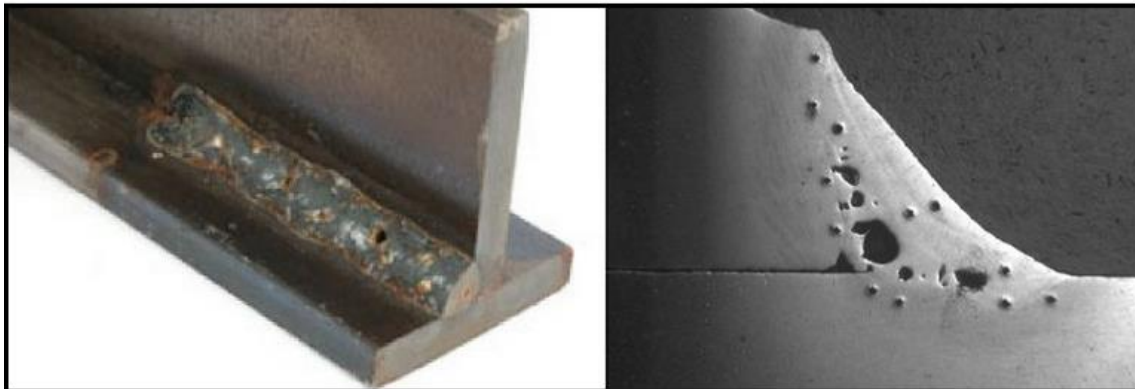
<b>DEFECTOS EN SOLDADURAS --- CAUSAS Y SOLUCIONES</b>	
<b>A.- GRIETAS EN LAS JUNTAS</b>	
<b>CAUSAS</b>	<b>SOLUCIONES</b>
1.- Elevada rigidez en la junta	1.- Pre calentamiento: Usar golpeteo; cambiar la sucesión de la soldadura por retroceso o aumentar la sección transversal del cordón.
2.- Soldadura defectuosa	2.- Ver capítulo de porosidades o inclusiones
3.- Electrodo defectuosos (excentricidad, humedad en el revestimiento, núcleo de alambre pobre)	3.- Cambiar electrodos, controlar la humedad debido a posible almacenamiento defectuoso
4.- Dilución pobre	4.- Reducir la separación de raíz
5.- Cordón de escasa profundidad, a ancho	5.- Aumentar la sección transversal, la profundidad o el ancho del cordón, cambiar tipo de electrodo
6.- Excesivo carbón o aleación tomado del metal de base	6.- Reducir la penetración bajando la corriente y la velocidad de avance, cambiar el tipo de electrodo
7.- Distorsión angular, causando tensión a la raíz del cordón	7.- Compensar la soldadura en ambos lados. Use martilleo o golpeteo, pre calentamiento
8.- Excesivo azufre en el metal base	8.- Use E XX15 16 electrodos
9.- Grietas en el cráter	9.- Rellene el cráter. Retroceda si es necesario retire lentamente el electrodo



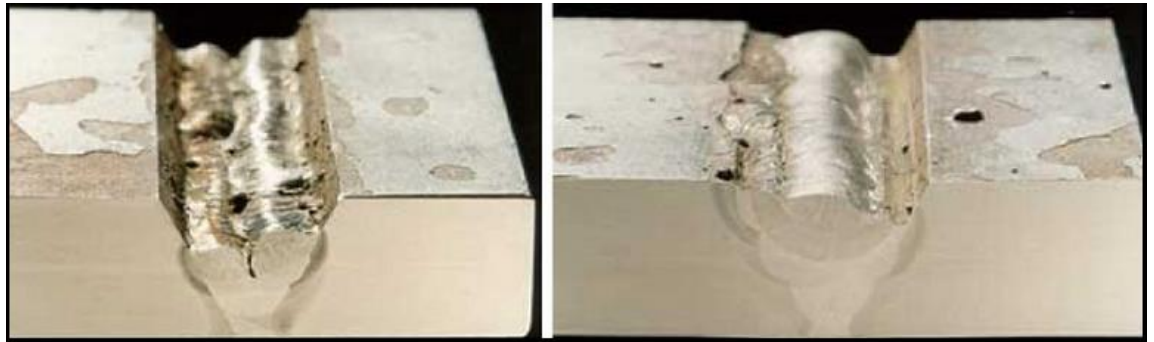
<b>B.- GRIETAS EN EL METAL BASE</b>	
<b>CAUSAS</b>	<b>SOLUCIONES</b>
1.- Hidrógeno en la atmósfera del arco	1.- Usar condiciones libres de hidrógeno. Usar E XX15 16; arco sumergido o gas inerte o proceso de arco protegido; precalentamiento después de soldado haga un envejecimiento o recocido.
2.- Alta dureza (Aceros)	2.- Precalentamiento, aumentar el calor absorbido en la soldadura, postcalentamiento sin enfriar, después de soldada, soldar con electrodo austenístico.
3.- Alta resistencia, con baja ductilidad	3.- Usar metal recocido o normal
4.- Alta temperatura de transmisión	4.- Prioridad de tratamiento térmico para soldar dentro de sus condiciones de dureza o diferentes aleaciones.
5.- Fases Frágiles	5.- Tratamiento térmico antes de soldar para poner las fases frágiles en solución.
6.- Excesivo esfuerzo	6.- Rediseñar, cambiar la sucesión o usar recocidos intermedios.

<b>B.- GRIETAS EN EL METAL BASE</b>	
<b>CAUSAS</b>	<b>SOLUCIONES</b>
1.- Hidrógeno en la atmósfera del arco	1.- Usar condiciones libres de hidrógeno. Usar E XX15 16; arco sumergido o gas inerte o proceso de arco protegido; precalentamiento después de soldado haga un envejecimiento o recocido.
2.- Alta dureza (Aceros)	2.- Precalentamiento, aumentar el calor absorbido en la soldadura, postcalentamiento sin enfriar, después de soldada, soldar con electrodo austenístico.
3.- Alta resistencia, con baja ductilidad	3.- Usar metal recocido o normal
4.- Alta temperatura de transmisión	4.- Prioridad de tratamiento térmico para soldar dentro de sus condiciones de dureza o diferentes aleaciones.
5.- Fases Frágiles	5.- Tratamiento térmico antes de soldar para poner las fases frágiles en solución.
6.- Excesivo esfuerzo	6.- Rediseñar, cambiar la sucesión o usar recocidos intermedios.

<b>C.- POROSIDAD</b>	
<b>CAUSAS</b>	<b>SOLUCIONES</b>
1.- Excesivo H <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> o humedad en la atmósfera	1.- Cambiar el electrodo a E XX15 16 o usar proceso de gas. Bajo hidrógeno MIG-TIG (arco sumergido)
2.- Alta velocidad de enfriamiento en la soldadura	2.- Aumentar el calor absorbido, precalentamiento
3.- Mucho Azufre en el metal base	3.- Usar E XX15 16 acero bajo en azufre
4.- Aceite, pintura o herrumbre en el acero	4.- Limpiar la superficie de las juntas
5.- Longitud del arco inadecuada corriente o manipulación	5.- Usar arco adecuado, controlar la técnica de soldar
6.- Excesiva humedad en el electrodo o en la junta	6.- Usar electrodos y materiales secos
7.- Revestimientos galvanizados	7.- Usar E-6010 para remover el Zn



<b>D.- INCLUSIONES</b>	
<b>CAUSAS</b>	<b>SOLUCIONES</b>
<b>1.- Fracaso al remover la escoria de los depósitos previos</b>	<b>1.- Limpiar cuidadosamente las superficies y los cordones previos</b>
<b>2.- Atmósfera oxidante en la soldadura</b>	<b>2.- Regular la llama de gas a neutra</b>
<b>3.- Deficiente diseño de junta</b>	<b>3.- Observar la correcta longitud de acero y manipulación</b>
<b>4.- Insuficiente protección de arco</b>	<b>4.- Proveer la correcta protección y cubrimiento</b>



En estas 4 tablas se explican las grietas en la junta, grietas en el metal base, porosidad e inclusiones donde se aclaran de una forma muy práctica las causas por las que se producen tales defectos y las soluciones inmediatas para evitarlos.

Fuente: YCASA, Xavier. *Defectos de soldadura*. p. 4.