



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Determinación del efecto de la temperatura de precalentamiento sobre la sensibilidad al agrietamiento en caliente para cordones de soldadura en metales disímiles.

Félix E. Escalante G.

Luis F. Rodríguez H.

Naguanagua, Noviembre de 2009



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Determinación del efecto de la temperatura de precalentamiento sobre la sensibilidad al agrietamiento en caliente para cordones de soldadura en metales disímiles.

Trabajo especial de grado presentado ante la Ilustre Universidad de Carabobo para optar al título de Ingeniero Mecánico

Tutor académico:
Prof. *Ing.* Oswaldo Urbano.

Autores:
Félix E. Escalante G.
Luis F. Rodríguez H.

Naguanagua, Noviembre de 2009

DEDICATORIA

Al TODO PODEROSO Dios, Jesús y El Espíritu Santo por estar conmigo en los momentos buenos y en los de más necesidad en mi vida.

A mis padres Ennuis y Félix por enseñarme todo lo que soy y he puesto en práctica; sabiduría y paciencia, todo lo necesario para enfrentar al mundo.

A mi hermana Kitzí y mi sobrino Víctor por enseñarme a ver la vida desde otras perspectivas y darme la oportunidad de aprender de ellas.

A mi novia Yleana por estar a mi lado en todos los momentos enseñándome a no caer y vencer obstáculos.

Félix Escalante

DEDICATORIA

Al TODOPODEROSO Dios, Jesús, la Virgen Maria y El Espíritu Santo por estar conmigo en los momentos buenos y en los de más necesidad en mi vida.

A mi mamá Ana por todo su amor y apoyo incondicional que me ha dado desde que nací hasta hoy en día. A mi papá su cariño, consejos y carácter que me formó como un hombre correcto. A ambos por su sapiencia y todos los esfuerzos que han realizado para que cumpliera este sueño.

A mis hermanas Mayi y Astrid por enseñarme a ver la vida desde otras perspectivas y darme la oportunidad de aprender de ellas.

A todos mis tíos que me han apoyado entre ellos Nelson, Aura, Renee, Victoria y especialmente mi tía Yura que en vida siempre en momentos muy difíciles de mi carrera, con sus oraciones me ayudaba y ahora desde el cielo nos acompaña como siempre.

A mis abuelos Rosa y Pedro, Fernando e Isabel.

A mi novia Susana por apoyarme y soportarme en el tiempo que llevamos juntos.

Luis Rodríguez

AGRADECIMIENTO

A nuestros padres por todo el apoyo incondicional y colaboración otorgada.

A la Universidad de Carabobo por haber sido nuestra casa de estudio.

A nuestro tutor Ingeniero Oswaldo Urbano, por su orientación y el aporte de sus conocimientos.

A los T.S.U Nestor, Omar Coronel por la ayuda prestada en el transcurso de los ensayos metalúrgicos.

Al Sr. Domenico por la colaboración prestada para la elaboración de las probetas utilizadas.

A nuestros compañeros de línea de investigación Fimaoche Hernández y Juan Aponte por la colaboración prestada en pro de nuestra tesis.

A nuestros amigos Alirio Martínez, Andrés Uribe y Emerson Milone por siempre brindar su apoyo incondicional en todo momento.

RESUMEN

Siendo el proceso de soldadura manual de arco eléctrico con electrodo revestido en aceros disímiles un proceso común en la industria y a nivel particular pero que a su vez cuenta con poca información respecto a las condiciones idóneas para realizar estas soldaduras, se obtiene así microestructuras no deseadas en el cordón de soldadura como es el caso de agrietamientos. Para el estudio de esta problemática, se evalúa la temperatura de precalentamiento como solución, determinando como varía el número de grietas presente en los cordones e igualmente evaluando la microestructura, específicamente en el acero inoxidable AISI 304 y acero al carbono SAE 1020 con los materiales de aporte E 308L-16 y E 310-16 y así obtener una base de comparación de la sensibilidad al agrietamiento de la soldadura en estos acero disímiles. En el tratado de esta problemática se utilizo los ensayos de microscopía y de Varestraint, variando la temperatura de precalentamiento así como las intensidades de corriente. Luego de realizado los mencionados ensayos se llego a la conclusión de que la unión de estos metales disímiles a pesar de siempre ser propenso al agrietamiento por las característica que cada uno posee, aplicándole temperaturas de precalentamiento a los materiales de aporte y una intensidad de corriente que aporte mayor calor, se logra reducir esta sensibilidad al agrietamiento; mejorando así las características del cordón de soldadura, tanto macroscópico como microscópicamente al evidenciar una estructura de características más favorables para el material .

INDICE GENERAL

	Página
Dedicatoria	v
Agradecimiento	vii
Resumen	viii
Introducción	1
 CAPITULO I. PROBLEMA Y OBJETIVOS	
I.1 Planteamiento del problema	3
I.2 Objetivos	4
I.3 Limitaciones	5
I.4 Alcances y/o delimitaciones	5
I.5 Justificación del problema	6
I.6 Antecedentes de la investigación	7
 CAPITULO II. MARCO TEÓRICO	
II.1 Materiales ferrosos y no ferrosos	10
II.2 Acero	10
II.2.1 Clasificación del acero	11
II.3 Metalografía	17
II.3.1 Examen microscópico de los metales	18
II.3.2 Preparación de la muestra	20

II.3.3 Pulido de la muestra	21
II.3.4 Ataque químico de la muestra	22
II.3.5 Microestructura de los aceros	24
II.4 Soldadura	30
II.4.1 Tipos de soldadura	31
II.5 Modos de falla en soldadura donde el precalentamiento no tiene influencia	45
II.5.1 Fisuración en caliente	45
II.5.2 Desgarre laminar	46
II.5.3 Fisuración por desgarramiento	47
II.6 Evaluación de agrietamiento en caliente en soldaduras	48
II.6.1 Ensayo de Varestraint	48

CAPITULO III. MARCO METODOLÓGICO

III.1 Nivel de la investigación	53
III.2 Diseño de la investigación	53
III.3 Población y muestra	54
III.4 Tipo de muestreo	54
III.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	54
III.6 Técnicas de procesamiento y análisis de datos	55
III.7 Aspectos administrativos	55
III.8 Técnicas y procedimientos para llevar a cabo la investigación	55
III.8.1 Diseño experimental	55
III.8.2 Material a usar	57
III.8.3 Prueba de Varestraint	57

III.8.4 Evaluación de las muestras	64
III.8.5 Evaluación de los resultados del ensayo	68
III.9 Recolección de datos obtenidos	68
III.9.1 Cuadro resumen de recolección de características y evalúo en muestras ensayadas	68

CAPITULO IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS

IV.1 Resultados de ensayos de Varestraint	72
IV.2 Resultados de microscopía	85
IV.2.1 Cordón de soldadura	85
IV.2.2 Sección transversal	85
IV.3 Análisis de resultados	89
IV.3.1 Análisis de ensayo de Varestraint	89
IV.3.2 Análisis de microscopía	93

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones	95
Recomendaciones	97
Referencias bibliograficas	99

INDICE DE FIGURAS

	Página
Figura II.1 Estructura metalográfica de un acero A-36 a una vista de 100x	19
Figura II.2 Estructura de un acero A-36 con una ataque químico a una vista de 100x.	24
Figura II.3 Proceso de soldadura con acero eléctrico	35
Figura II.4. Cortes de biseles en varillas de grueso calibre que sirven para ampliar la superficie de amarre durante la soldadura	36
Figura II.5 Equipos fabricados con acero al carbón	44
Figura II.6 Equipos fabricados con acero inoxidable	44
Figura II.7 Fisuración por Recalentamiento en una soldadura de un acero austenítico	48
Figura II.8 Detalle del proceso Varestraint y ubicación de probeta	50
Figura II.9 Técnica de múltiples pasadas y región del ensayo con mayor aumento	51
Figura III.1 Organigrama experimental	56
Figura III.2 Probetas sometidas al ensayo de Varestraint bajo las mismas condiciones de Radio (R), Temperatura (T) e Intensidad (I)	62
Figura III.3 Máquina para realizar ensayos de Varestraint	63
Figura III.4 Probeta modelo, antes de ser sometida al ensayo de Varestraint	64
Figura III.5 Probetas enderezadas después de realizado el ensayo	65
Figura III.6 Visualización de grietas en formato jpg para posterior medida en el programa conociendo el zoom en que fue tomada la	

imagen, para este caso 100x	66
Figura III.7 Probetas lijadas y pulidas	67
Figura III.8 Microscopio óptico modelo MITUTOYO y programa donde se visualiza la imagen obtenida por el microscopio	67
Figura IV.1 Curva de longitud promedio de grieta presente en electrodo AWS 310 en función de la deformación para $T= 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $I = 75\text{ A}$	75
Figura IV.2 Curva de longitud promedio de grieta presente en electrodo AWS 310 en función de la deformación para $T= 140\text{ }^{\circ}\text{C}$, $I = 75\text{ A}$	75
Fig. IV.3. Curva de longitud promedio de grieta presente en electrodo AWS 310 en función de la deformación para $T= 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $I = 100\text{ A}$.	76
Figura IV.4 Curva de longitud promedio de grieta presente en electrodo AWS 310 en función de la deformación para $T= 140\text{ }^{\circ}\text{C}$, $I = 100\text{ A}$	76
Figura IV.5 Curva de longitud promedio de grieta presente en electrodo AWS 308 en función de la deformación para $T= 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $I = 75\text{ A}$	77
Figura IV.6 Curva de longitud promedio de grieta presente en electrodo AWS 308 en función de la deformación para $T= 140\text{ }^{\circ}\text{C}$, $I = 75\text{ A}$	77
Figura IV.7 Curva de longitud promedio de grieta presente en electrodo AWS 308 en función de la deformación para $T= 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $I = 100\text{ A}$	78
Figura IV.8 Curva de longitud promedio de grieta presente en	

electrodo AWS 308 en función de la deformación para $T= 140\text{ }^{\circ}\text{C}$, $I = 100\text{ A}$	78
Figura IV.9 Curva de longitud promedio de grieta presente en electrodo AWS 310 en función de la deformación para los distintos parámetros y condiciones estudiadas	79
Figura IV.10 Curva de longitud promedio de grieta presente en electrodo AWS 308 en función de la deformación para los distintos parámetros y condiciones estudiadas	79
Figura IV.11 Curva de longitud promedio de grieta presente en electrodo AWS 310 vs AWS 308 en función de la deformación para los distintos parámetros y condiciones estudiadas	80
Figura IV.12 Variación de longitud promedio de grietas (ΔLPG) al aumentar la temperatura de precalentamiento vs porcentaje de deformación e (%) para el electrodo AWS 310 y AWS 308, con distintos tipos de intensidades de corriente	82
Figura IV.13 Microscopía realizada a la muestra AWS 310 – 100X; en condiciones de $T= 140\text{ }^{\circ}\text{C}$, $I= 100\text{ A}$.	83
Figura IV.14 Microscopía realizada a la muestra AWS 308 – 200X; en condiciones de $T= 140\text{ }^{\circ}\text{C}$, $I= 75\text{ A}$.	83
Figura IV.15 Microscopía realizada a la muestra AWS 310 – 200X; en condiciones de $T= 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $I= 75\text{ A}$.	84
Figura IV.16 Microscopía realizada a la muestra AWS 308 – 200X; en condiciones de $T= 140\text{ }^{\circ}\text{C}$, $I= 100\text{ A}$.	84
Figura IV.17 Microscopía realizada a la muestra AWS 308 – 100X; en condiciones de $T= 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $I= 75\text{ A}$., $e = 9,34\%$	85
Figura IV.18 Microscopía realizada a la muestra AWS 308 – 200X;	

en condiciones de $T= 140\text{ }^{\circ}\text{C}$, $I= 100\text{ A.}$, $e = 9,34\text{ }%$	86
Figura IV.19 Microscopía realizada a la muestra AWS 310 - 100X;	
en condiciones de $T= 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $I= 75\text{ A.}$, $e = 9,34\text{ }%$	86
Figura IV.20 Microscopía realizada a la muestra AWS 310 – 200X;	
en condiciones de $T= 140\text{ }^{\circ}\text{C}$, $I= 100\text{ A.}$, $e = 9,34\text{ }%$	86
Figura IV.21 Microscopía transversal realizada a la muestra	
AWS 308; en condiciones de $T= 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $I= 75\text{ A.}$, $e = 9,34\text{ }%$	87
Figura IV.22 Microscopía transversal realizada a la muestra	
AWS 308; en condiciones de $T= 140\text{ }^{\circ}\text{C}$, $I= 100\text{ A.}$, $e = 9,34\text{ }%$	87
Figura IV.23 Microscopía transversal realizada a la muestra	
AWS 310; en condiciones de $T= 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $I= 75\text{ A.}$, $e = 9,34\text{ }%$ tanto	
al Material Base como a la soldadura a nivel transversal a 200 X	88
Figura IV.24 Microscopía realizada a la muestra AWS 310; en	
condiciones de $T= 140\text{ }^{\circ}\text{C}$, $I= 100\text{ A.}$, $e = 9,34\text{ }%$ Cerca a la ZAC,	
a 200 X	88

INDICE DE TABLAS

	Página
Tabla III.1. Composición Química de los materiales (%)	57
Tabla III.2. Radios de curvatura de la máquina de Varestraint	58
Tabla III.3. Tabla de resumen de características y evaluó de muestras para electrodo 310	69
Tabla III.4. Tabla de resumen de características y evaluó de muestras para electrodo 308	70
Tabla IV.1 Valores de deformación para cada radio de curvatura de la máquina de ensayo de Varestraint	72
Tabla IV.2. Número de grietas y tamaño de grietas para el electrodo AWS 310 con I = 75 A	73
Tabla IV.3. Número de grietas y tamaño de grietas para el electrodo AWS 310 con I = 100 A	73
Tabla IV.4. Número de grietas y tamaño de grietas para el electrodo AWS 308 con I = 75 A	74
Tabla IV.5. Número de grietas y tamaño de grietas para el electrodo AWS 308 con I = 100 A	74
Tabla IV.6. Variación en la longitud promedio de grietas al aumentar la temperatura, para electrodo AWS 310 con I = 75 A	81
Tabla IV.7. Variación en la longitud promedio de grietas al aumentar la temperatura, para electrodo AWS 310 con I = 100 A	81
Tabla IV.8. Variación en la longitud promedio de grietas al aumentar la temperatura, para electrodo AWS 308 con I = 75 A	81

Tabla IV.9. Variación en la longitud promedio de grietas al aumentar la temperatura, para electrodo AWS 308 con $I = 100 \text{ A}$

82

INTRODUCCIÓN

En la práctica, muchas industrias entre las que cuenta las petroleras así como las de alimentos, tienen la necesidad de usar estructuras de almacenaje como son los tanques, caracterizados por usar uniones soldadas de materiales disímiles los cuales van a estar sometidas a altas presiones y a los efectos de la corrosión. Sabiendo que estas uniones, así como la fabricación de equipos industriales y estructuras metálicas se hacen mayormente con un proceso de soldadura manual por arco eléctrico con electrodo revestido, es de importancia el estudio de la soldadura en materiales disímiles, así como el conocimiento de temperaturas de precalentamiento en estos para la industria y particulares en general.

Debido a la importancia existente en este tipo de soldaduras, este trabajo de investigación, basándose en la unión de soldadura por arco eléctrico entre un acero inoxidable AISI 304 y con el acero al carbono SAE 1020, usando electrodos E 308L-16 y E 310-16; aplicara ensayos de Varestreint y ensayos de microscopía para así cumplir con los objetivos de determinación del efecto que tiene la temperatura de precalentamiento sobre cordones de soldadura en los aceros disímiles mencionados a nivel macroscópico y microscópico.



Determinación del efecto de temperatura de pre calentamiento sobre la sensibilidad al agrietamiento en caliente para cordones de soldadura en metales disímiles.

CAPITULO I

PROBLEMA Y OBJETIVOS

I.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad existen una amplia cantidad de metales diferentes que sirven como materiales de construcción; los diseñadores pueden escoger el metal que mejor se comporte de acuerdo a las necesidades particulares. Estos materiales difieren no solo de su composición sino también en la forma como han sido manufacturados; los que los hace más o menos soldables.

En equipos, máquinas, accesorios, entre otros, destinados a la industria química, petroquímica e hidroeléctrica; es frecuente encontrar en ellos las aplicaciones de soldaduras en aceros disímiles. Tal es el caso de uniones entre materiales de este tipo para secciones helicoidales (como es el caso de tuberías y/o tanques tipos serpentín), que ameritan una soldadura continua y en caliente enrollándose como un espiral a lo largo de la sección a soldar; siendo para el caso de la junta entre aceros disímiles, uniones de alto riesgo donde es necesario poseer un mejor conocimiento de las condiciones presentes en el cordón de soldadura que deben ser curvadas en caliente. En especial, de aceros inoxidable con acero al carbón (debido a que el alto contenido de cromo presente en el acero inoxidable, tienden a comportarse de una manera diferente al acero al carbón con respecto a la soldabilidad).

De lo anteriormente expuesto, se plantea la necesidad del estudio del agrietamiento en caliente de los cordones de soldadura presente entre estos

materiales; para así tener en cuenta condiciones que hagan más factible la eficacia de esta, ya que es la parte fundamental en la fabricación de elementos necesarios y cotidianos en la industria (como ya es referencia), que ejercen funciones importantes en las mismas y que basada en exigencias técnicas y/o económicas, se debe asegurar su calidad en el momento de su elaboración.

I.2 OBJETIVOS

I.2.1 Objetivo General

Determinar el efecto de la temperatura de precalentamiento sobre la sensibilidad al agrietamiento en caliente para cordones de soldadura en metales disímiles utilizando electrodos AWS 310, AWS 308.

I.2.2 Objetivos Específicos

Determinar el porcentaje de agrietamiento en la zona fundida del cordón con electrodo AWS 310, variando la temperatura de precalentamiento y la intensidad de corriente.

Determinar el porcentaje de agrietamiento en la zona fundida del cordón con electrodo AWS 308, variando la temperatura de precalentamiento y la intensidad de corriente.

Evaluar la microestructura en la zona fundida del cordón con electrodo AWS 310, variando la temperatura de precalentamiento y la intensidad de corriente.

Evaluar la microestructura en la zona fundida del cordón con electrodo AWS 308, variando la temperatura de precalentamiento y la intensidad de corriente.

I.3 LIMITACIONES

- Disponibilidad financiera para la compra de probetas, electrodos y demás materiales relacionados al ensayo de Varestraint.
- Disponibilidad de operario calificado para realizar las soldaduras.
- El electrodo AWS 308 comercialmente se encuentra como E 308L-16, manteniendo la misma descripción, aplicación y operación.
- El electrodo AWS 310 comercial mas adecuado a este trabajo de grado es el denominado E 310-16; cumpliendo con la misma descripción, aplicación y operación.

I.4 ALCANCES Y/O DELIMITACIONES

- Los ensayos se realizaran utilizando el Método Varestraint, donde se aplicaran cuatro tipos de radios para el doblado de las probetas.
- Para las pruebas se utilizaran 96 probetas de aceros disímiles; las cuales serán de acero inoxidable AISI 304 y acero al carbono SAE 1020.

- Se realizara soldadura manual por arco eléctrico (SMAW), utilizando electrodos AWS 310 y/o AWS 308.
- Se aplicarán dos temperaturas de precalentamiento y estarán en el rango de los 100 y 140 ° C.
- Los valores de intensidades serán dos y variaran entre 75 y 100 A.
- El número de repeticiones por ensayo será de tres.

I.5 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Muy a menudo, la medida principal usada para juzgar la calidad de una soldadura es su resistencia y la fortaleza del material alrededor de ella. Muchos factores distintos influyen en esto, incluyendo el método de soldadura, la cantidad y la concentración de la entrada de calor, el material base, el material de relleno, el material fundente, el diseño del empalme, y las interacciones entre todos estos factores. Para probar la calidad de una soldadura se usan tanto ensayos no destructivos como ensayos destructivos, para verificar que las soldaduras están libres de defectos, tienen niveles aceptables de tensiones y distorsión residuales, y tienen propiedades aceptables de zona afectada por el calor.

Además de las recomendaciones que se encuentran en los catálogos de fabricantes de metales de aporte, que son muy funcionales cuando la soldadura son entre materiales similares y hechas de forma longitudinal; es necesario poseer un mejor conocimiento de las condiciones presentes en el cordón de soldadura cuando de materiales disímiles y en soldaduras que deben ser curvadas en caliente se trata. Para ello es de mucha importancia aplicar los

referidos ensayos (destructivos y/o no destructivos), específicamente el ensayo de Varestraint.

Esto lleva a la necesidad de investigar y ensayar, con el fin de observar y determinar condiciones bajo las cuales dichas uniones se encuentran, ya que son de importancia en el proceso de fabricación y utilización de equipos que contengan uniones de metales disímiles; considerando estas juntas, las más críticas desde el punto de vista del funcionamiento de un componente.

Con el referido estudio se pretende que las personas tengan un conocimiento de los factores que llegan afectar este tipo de soldadura que comúnmente no son tomadas en cuenta a la hora de la fabricación de una pieza que requiera materiales disímiles.

I.6 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

“Evaluación del efecto de la dilución en la soldadura de aceros disímiles”.
Alí Guerrero, Trabajo Especial de Grado, 2002. Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad de Carabobo.

La finalidad del trabajo fue evaluar, a través de la microestructura y de las propiedades mecánicas, el efecto que tiene la dilución en la soldadura de aceros inoxidable disímiles. Los metales utilizados fueron combinaciones de aceros inoxidable austeníticos, como AISI-304 y AISI-316 en forma de planchas. La conclusión más relevante fue que la dilución no tuvo gran influencia en la soldadura de los aceros antes mencionados y, tanto los ensayos

mecánicos, como el diagrama de Schaeffler indican que hay buena soldabilidad entre estos dos metales disímiles. Se recomendó seguir profundizando en el campo de los aceros disímiles.

“Evaluación de la metalurgia en la soldadura por fricción de materiales disímiles”. Dieguez Miguel y Rivas Sheila, Trabajo Especial de Grado, 2002. Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad de Carabobo.

El objetivo principal de este trabajo fue evaluar la metalurgia en la soldadura por fricción de los materiales SAE-1020, SAE-4140 y AISI-316. Todos los ensayos arrojaron los valores mínimos, de las variables de carga y frecuencia de giro, con los cuales se obtiene una buena soldadura, que fueron: P=400 psi y N= 1200 rpm, para las siguientes combinaciones de materiales: 1020-1020, 1020-4140, 4140-4140, 316-316 y; P= 600 psi y N = 1600 rpm, para 1020-316.

La conclusión mas relevante fue que este tipo de soldadura por fricción no influyo significativamente en las propiedades mecánicas cuando se sueldan aceros similares o disímiles, a excepción de las combinaciones del AISI-316 con el SAE-1020 y SAE-4140, que presentaron mala soldabilidad.

Se recomendó profundizar en el estudio de la soldabilidad donde interviene el acero inoxidable AISI-316, para verificar con que tipo de aleación se comportaría con una buena soldadura.

“Análisis de los efectos detectados en la soldadura de prefabricación de la tubería”. Castillo Enna, Franco Indira, Trabajo Especial de Grado, 2001, Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad de Carabobo, Valencia.

La finalidad del trabajo fue evaluar, a través de la microestructura y de las propiedades mecánicas, el estado de la soldadura realizada en tuberías de aceros, específicamente; combinaciones de aceros inoxidable. La conclusión más relevante fue que estas juntas se caracterizan por ser muy críticas desde el punto de vista del funcional. Se recomendó seguir profundizando en el análisis de de esta.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

II.1 MATERIALES FERROSOS Y NO FERROSOS

Los metales y las aleaciones empleados en la industria y en la construcción pueden dividirse en dos grupos principales: Materiales FERROSOS y NO FERROSOS. Ferroso viene de la palabra Ferrum que los romanos empleaban para el fierro o hierro. Por lo tanto, los materiales ferrosos son aquellos que contienen hierro como su ingrediente principal; es decir, las numerosas calidades del hierro y el acero.

Los materiales No Ferrosos no contienen hierro. Estos incluyen el aluminio, magnesio, zinc, cobre, plomo y otros elementos metálicos. Las aleaciones, el latón y el bronce, son una combinación de algunos de estos metales No Ferrosos y se les denomina Aleaciones No Ferrosas.

Uno de los materiales de fabricación y construcción más versátil, más adaptable y más ampliamente usado es el ACERO. A un precio relativamente bajo, el acero combina la resistencia y la posibilidad de ser trabajado, lo que se presta para fabricaciones mediante muchos métodos. Además, sus propiedades pueden ser manejadas de acuerdo a las necesidades específicas mediante tratamientos con calor, trabajo mecánico, o mediante aleaciones.

II.2 ACERO

El Acero es básicamente una aleación o combinación de hierro y carbono (alrededor de 0,05% hasta menos de un 2%). Algunas veces otros elementos de

aleación específicos tales como el Cr (Cromo) o Ni (Níquel) se agregan con propósitos determinados. Ya que el acero es básicamente hierro altamente refinado (más de un 98%), su fabricación comienza con la reducción de hierro (producción de arrabio) el cual se convierte más tarde en acero.

El hierro puro es uno de los elementos del acero, por lo tanto consiste solamente de un tipo de átomos. No se encuentra libre en la naturaleza ya que químicamente reacciona con facilidad con el oxígeno del aire para formar óxido de hierro - herrumbre. El óxido se encuentra en cantidades significativas en el mineral de hierro, el cual es una concentración de óxido de hierro con impurezas y materiales térreos.

II.2.1 Clasificación del acero

Los diferentes tipos de acero se clasifican de acuerdo a los elementos de aleación que producen distintos efectos en el Acero:

II.2.1.2 Aceros al carbono

Más del 90% de todos los aceros son aceros al carbono. Estos aceros contienen diversas cantidades de carbono y menos del 1,65 % de manganeso, el 0,60 % de silicio y el 0,60 % de cobre. Entre los productos fabricados con aceros al carbono figuran máquinas, carrocerías de automóvil, la mayor parte de las estructuras de construcción de acero, cascos de buques, somieres y horquillas.

II.2.1.3 Aceros aleados

Estos aceros contienen una proporción determinada de vanadio, molibdeno y otros elementos, además de cantidades mayores de manganeso, silicio y cobre que los aceros al carbono normales. Estos aceros de aleación se pueden sub clasificar en:

Estructurales

Son aquellos aceros que se emplean para diversas partes de máquinas, tales como engranajes, ejes y palancas. Además se utilizan en las estructuras de edificios, construcción de chasis de automóviles, puentes, barcos y semejantes. El contenido de la aleación varía desde 0,25 % a un 6 %.

Herramientas

Aceros de alta calidad que se emplean en herramientas para cortar y modelar metales y no-metales. Por lo tanto, son materiales empleados para cortar y construir herramientas tales como taladros, escariadores, fresas, terrajas y machos de roscar.

Especiales

Los Aceros de Aleación especiales son los aceros inoxidables y aquellos con un contenido de cromo generalmente superior al 12 %. Estos aceros de gran dureza y alta resistencia a las altas temperaturas y a la corrosión, se emplean en turbinas de vapor, engranajes, ejes y rodamientos.

II.2.1.4 Aceros de baja aleación ultra resistentes

Esta familia es la más reciente de las cuatro grandes clases de acero. Los aceros de baja aleación son más baratos que los aceros aleados convencionales ya que contienen cantidades menores de los costosos elementos de aleación. Sin embargo, reciben un tratamiento especial que les da una resistencia mucho mayor que la del acero al carbono. Por ejemplo, los vagones de mercancías fabricados con aceros de baja aleación pueden transportar cargas más grandes porque sus paredes son más delgadas que lo que sería necesario en caso de emplear acero al carbono. Además, como los vagones de acero de baja aleación pesan menos, las cargas pueden ser más pesadas. En la actualidad se construyen muchos edificios con estructuras de aceros de baja aleación. Las vigas pueden ser más delgadas sin disminuir su resistencia, logrando un mayor espacio interior en los edificios.

II.2.1.5 Aceros inoxidable

Los aceros inoxidable contienen cromo, níquel y otros elementos de aleación, que los mantienen brillantes y resistentes a la herrumbre y oxidación a pesar de la acción de la humedad o de ácidos y gases corrosivos. Algunos aceros inoxidable son muy duros; otros son muy resistentes y mantienen esa resistencia durante largos periodos a temperaturas extremas. Debido a sus superficies brillantes, en arquitectura se emplean muchas veces con fines decorativos. El acero inoxidable se utiliza para las tuberías y tanques de refinерías de petróleo o plantas químicas, para los fuselajes de los aviones o para cápsulas espaciales. También se usa para fabricar instrumentos y equipos quirúrgicos, o para fijar o sustituir huesos rotos, ya que resiste a la acción de

los fluidos corporales. En cocinas y zonas de preparación de alimentos los utensilios son a menudo de acero inoxidable, ya que no oscurece los alimentos y pueden limpiarse con facilidad.

El extenso rango de propiedades y características secundarias, presentes en los aceros inoxidables hacen de ellos un grupo de aceros muy versátiles. La selección de los aceros inoxidables puede realizarse de acuerdo con sus características:

- Resistencia a la corrosión y a la oxidación a temperaturas elevadas.
- Propiedades mecánicas Del acero.
- Características de los procesos de transformación a que será sometido.
- Costo total (reposición y mantenimiento).

Los aceros inoxidables tienen una resistencia a la corrosión natural que se forma automáticamente, es decir no se adiciona. Tienen una gran resistencia mecánica, de al menos dos veces la del acero al carbono, son resistentes a temperaturas elevadas y a temperaturas criogénicas. Son fáciles de transformar en gran variedad de productos y tiene una apariencia estética, que puede variarse sometiendo el acero a diferentes tratamientos superficiales para obtener acabado a espejo, satinado, coloreado, texturizado, entre otras.

Clasificación de los Aceros Inoxidables

Los aceros inoxidables no son indestructibles, sin embargo con una selección cuidadosa, someténdolos a procesos de transformación adecuados y

realizando una limpieza periódica, algún integrante de la familia de los aceros inoxidable resistirá las condiciones corrosivas y de servicio más severas.

Serie 400

Aceros Inoxidables Martensíticos

Son la primera rama de los aceros inoxidable, llamados simplemente al Cromo y fueron los primeros desarrollados industrialmente (aplicados en cuchillería). Tienen un contenido de Carbono relativamente alto de 0.2 a 1.2 % y de Cromo de 12 a 18 %. Los tipos más comunes son el AISI 410, 420 y 431. Las propiedades básicas son: Elevada dureza (se puede incrementar por tratamiento térmico) y gran facilidad de maquinado, resistencia a la corrosión moderada. Principales aplicaciones: Ejes, flechas, instrumental quirúrgico y cuchillería.

Serie 400

Aceros Inoxidables Ferríticos

También se consideran simplemente al Cromo, su contenido varia de 12 a 18 %, pero el contenido de Carbono es bajo < 0.2 %.

Los tipos más comunes son el AISI 430, 409 y 434. Las propiedades básicas son: Buena resistencia a la corrosión. La dureza no es muy alta y no pueden incrementarla por tratamiento térmico.

Principales aplicaciones: Equipo y utensilios domésticos y en aplicaciones arquitectónicas y decorativas.

Serie 300

Los Aceros Inoxidables Austeníticos.

Son los más utilizados por su amplia variedad de propiedades, se obtienen agregando Níquel a la aleación, por lo que la estructura cristalina del material se transforma en austenita y de aquí adquieren el nombre. El contenido de Cromo varía de 16 a 28 %, el de Níquel de 3.5 a 22 % y el de Molibdeno 1.5 a 6 %. Los tipos más comunes son el AISI 304, 304L, 316, 316L, 310 y 317. Las propiedades básicas son: Excelente resistencia a la corrosión, excelente factor de higiene y limpieza, fáciles de transformar, excelente soldabilidad, no se endurecen por tratamiento térmico, se pueden utilizar tanto a temperaturas criogénicas como a elevadas temperaturas.

Algunos Usos de los Aceros Inoxidables

Los aceros inoxidables ofrecen resistencia a la corrosión, una adecuada relación resistencia mecánica - peso, propiedades higiénicas, resistencia a temperaturas elevadas y criogénicas y valor a largo plazo. Son totalmente reciclables y amigables con el medio ambiente. Los aceros inoxidables son ampliamente utilizados en varios sectores, desde la más sofisticada aplicación industrial hasta los utensilios domésticos. Contribuyen, de manera indirecta, a satisfacer las necesidades humanas básicas tales como alimentación, salud, construcción, medio ambiente, transporte y energía.

Algunos ejemplos de productos fabricados con aceros inoxidables son los equipos de procesos químicos y petroquímicos, equipos de proceso de alimentos y bebidas, equipos farmacéuticos, cámaras de combustión, sistemas

de escape y filtros automotrices, vagones de ferrocarril, aplicaciones arquitectónicas y estructurales, mobiliario urbano, paneles de aislamiento térmico, intercambiadores de calor, tanques y recipientes, barriles de cerveza, instrumentos quirúrgicos, agujas hipodérmicas, monedas, tarjas, ollas y sartenes, cubiertos, lavadoras, lavavajillas y utensilios de cocina.

En la industria química y petroquímica, los aceros inoxidable ofrecen elevada resistencia a la corrosión y excelentes propiedades mecánicas así como un bajo costo de mantenimiento. En la industria de alimentos y bebidas y en la industria farmacéutica, proveen excelentes condiciones de higiene además de su resistencia a la corrosión y duración a largo plazo.

II.3 METALOGRAFÍA

Es la disciplina que estudia microscópicamente las características estructurales de un metal o de una aleación. Sin duda, el microscopio es la herramienta más importante del metalurgista tanto desde el punto de vista científico como desde el técnico. Es posible determinar el tamaño de grano, forma y distribución de varias fases e inclusiones que tienen gran efecto sobre las propiedades mecánicas del metal. La microestructura revelará el tratamiento mecánico y térmico del metal y, bajo un conjunto de condiciones dadas, podrá predecirse su comportamiento esperado.

La experiencia ha demostrado que el éxito en el estudio microscópico depende en mucho del cuidado que se tenga para preparar la muestra. El procedimiento que se sigue en la preparación de una muestra es comparativamente sencillo y requiere de una técnica desarrollada sólo después

de práctica constante. El último objetivo es obtener una superficie plana, sin rayaduras, semejante a un espejo.

II.3.1 Examen microscópico de los metales

Los detalles de la estructura de los metales no son fácilmente visibles, pero las estructuras de grano de los metales pueden verse con un microscopio. Las características del metal, el tamaño de grano y el contenido de carbono pueden determinarse estudiando la micrografía.

El porcentaje aproximado de carbón puede estimarse por medio de porcentaje de perlita (zonas oscuras) en los aceros al carbono recocidos. Para este propósito, se utilizan un microscopio metalúrgico y técnicas asociadas de foto microscopia. El microscopio metalúrgico de luz reflejada es similar a aquellos utilizados para otros propósitos, excepto que contiene un sistema de iluminación dentro del sistema de lentes para proveer iluminación vertical.

Algunos microscopios también tienen un retículo y una escala micrométrica para medir la imagen aumentada. Otro retículo que se utiliza contiene los diferentes tamaños de grano a aumentos de 100X y se utiliza para comparar o medir el tamaño de grano relativo. Los filtros y polarizadores se utilizan en la iluminación o el sistema óptico para reducir el brillo y mejorar la definición de las estructuras de grano. En poder de aumento del microscopio puede determinarse si se multiplica el poder de la lente objetivo por el del ocular. Por tanto, un lente objetivo de 40X con un ocular de 12.5X agrandaría la imagen hasta 500X (500 diámetros).

Los microscopios de platina invertida ofrecen un diseño más moderno. En este instrumento la muestra se coloca boca abajo en la platina. Se utiliza un

microscopio de platina invertida, junto con una cámara de video y un monitor de TV de circuito cerrado. El del microscopio tiende a perder resolución, pero tiene como mayor ventaja que de este arreglo se puede obtener una visualización de grupo. Los instrumentos de metalografía también permiten una observación en grupo del aumento metalúrgico. La imagen se proyecta sobre una pantalla de brillo mate. En los grandes laboratorios metalúrgicos se utilizan modelos de gran tamaño. Muchos instrumentos metalográficos tienen la capacidad de producir microfotografías de color instantáneas o estándar. Para obtener fotografías existen adaptadores para la mayoría de los microscopios. Los acaparadores de manga sencilla pueden utilizarse con una cámara SLR de 35mm para la toma de foto micrografías. Con este arreglo simple, el obturador se abre y se permite la entrada de la luz durante pocos segundos (6 a 8 segundos con una película Panatomic-X de 32 ASA). El enfoque se realiza sobre le vidrio mate de la cámara.



Fig. II.1. Estructura metalográfica de un acero inoxidable AISI 304 a 250x
(Soldadura. Casado L, José L. año 2003.)

II.3.2 Preparación de la muestra.

La muestra debe seleccionarse de la zona de la pieza que necesita eximirse y en la orientación apropiada. Es decir, si el flujo de grano o la distorsión es importante, puede ser que una sección transversal de la parte no muestre granos alargados; únicamente una tajada paralela a la dirección de laminado revelaría adecuadamente los granos alargados debido al laminado. Algunas veces se requiere más de una muestra. Usualmente, una soldadura se examina por medio de una sección transversal.

Los materiales blandos (en la escala de dureza Rockwell menor a 35 HRc, siendo se la letra referida a la aplicación) pueden seccionarse por aserrado, pero los materiales más duros deben cortarse con un disco agresivo. Las sierras de corte metalúrgico con hojas abrasivas y flujo de refrigerante son las herramientas que se usan para este propósito. La muestra no debe sobrecalentarse, no importa si es dura o blanda. Las estructuras de grano pueden alterarse con una alta temperatura de corte.

Las muestras pequeños o de forma incomoda deben montarse de alguna manera para facilitar el pulido intermedio y final. Alambres, varillas pequeños muestras de hoja metálica, secciones delgadas, etc. Deben montarse en un material adecuado o sujetarse rígidamente en una monta mecánica.

A menudo, se utiliza los plásticos termofijos conformándolos con calor y presión alrededor de la muestra. La resina termo fijada que más se emplea para montar muestras es la baquelita.

II.3.3 Pulido de la muestra.

Los granos y otras características de los metales no pueden verse al menos que la muestra se desbaste y se pule para eliminar las ralladuras. Se utilizan diferentes métodos de pulido tales como el electrolítico, el rotatorio o el de vibración.

El procedimiento más común consiste en desbastar primero la superficie de la muestra en una lijadora de la banda y luego a mano con papel abrasivo de varios grados, desde el número 240 hasta de 600 partículas por pulgada cuadrada.

- Pulido intermedio: La muestra se pule sobre una serie de hojas de esmeril o lija con abrasivos más finos, sucesivamente.

El primer papel es generalmente no. 1, luego 1/0, 2/0, 3/0 y finalmente 4/0. Por lo general, las operaciones de pulido intermedio con lijas de esmeril se hacen en seco; sin embargo, en ciertos casos, como el de preparación de materiales suaves, se puede usar un abrasivo de carburo de silicio. Comparado con el papel esmeril, el carburo de silicio tiene mayor rapidez de remoción y, como su acabado es a base de resina, se puede utilizar con un lubricante, el cual impide el sobrecalentamiento de la muestra, minimiza el daño cuando los metales son blandos y también proporciona una acción de enjuague para limpiar los productos removidos de la superficie de la muestra, de modo que el papel no se ensucie.

- Pulido fino: El tiempo utilizado y el éxito del pulido fino dependen en mucho del cuidado puesto durante los pasos de pulido previo. La última

aproximación a una superficie plana libre de ralladuras se obtiene mediante una rueda giratoria húmeda cubierta con un paño especial cargado con partículas abrasivas cuidadosamente seleccionadas en su tamaño. Existe gran posibilidad de abrasivos para efectuar el último pulido. En tanto que muchos harán un trabajo satisfactorio parece haber preferencia por la forma gama del óxido de aluminio para pulir materiales ferrosos y de los basados en cobre, y óxido de serio para pulir aluminio, magnesio y sus aleaciones. Otros abrasivos para pulido final que se emplean a menudo son la pasta de diamante, óxido de cromo y óxido de magnesio.

La selección de un paño para pulir depende del material que vaya a pulirse y el propósito del estudio metalográfico. Se pueden encontrar paños de lanilla o pelillo variable, desde aquellos que no tienen pelillo (como la seda) hasta aquellos de pelillo intermedio (como paño de ancho, paño de billar y lonilla) además de aquellos de pelillo profundo (como el terciopelo). También se pueden encontrar paños sintéticos para pulir con fines de pulido general, de los cuales el gamal y el micro paño son los que se utilizan más ampliamente. Una muestra pulida en forma de cuadro mostrará únicamente las inclusiones no metálicas; además, estará libre de ralladuras.

II.3.4 Ataque químico de la muestra

El propósito del ataque químico es hacer visibles las características estructurales del metal o aleación. El proceso debe ser tal que queden claramente diferenciadas las partes de la micro estructura. Esto se logra

mediante un reactivo apropiado que somete a la superficie pulida a una acción química. Los reactivos que se utilizan consisten en ácidos orgánicos o inorgánicos y los álcalis disueltos en alcohol, agua u otros solventes.

Las muestras pueden atacarse durante el tiempo necesario sumergiéndolas boca abajo en una solución contenida en una caja de Petri. Un método opcional consiste en aplicar el reactivo con un gotero. Si el tiempo de ataque es demasiado corto, la muestra quedará subatacada y los límites de grano y otras configuraciones se verán desvanecidos e indistintos cuando se observen en el microscopio. Si el tiempo de ataque es demasiado largo, la muestra se sobre atacará y quedará muy oscura, mostrando colores no usuales. El tiempo de ataque debe controlarse muy cuidadosamente.

La acción del ataque se detiene al colocar la muestra bajo una corriente de agua. Se limpia la muestra con alcohol y se utiliza una secadora de pelo para terminar de secarla. Se ha de cuidar de no frotar la muestra pulida y atacar con alguna tela o con los dedos, porque esto altera la condición superficial del metal.

Entre algunos reactivos se tienen:

- Nital: caracterizada por tener una composición de 2 a 5 % de ácido nítrico en alcohol metílico. Obscurece la perlita en aceros al carbono. Diferencia la perlita de la martensita (revela los límites de grano de la ferrita, muestra la profundidad del núcleo en los aceros nitrurados).Tiempo: 5 a 60 segundos
- Agua Regia: Compuesta de una parte ácido nítrico por tres partes de ácido clorhídrico, El agua regia es un disolvente poderoso debido al

efecto combinado de los iones H^+ , NO_3^- , y Cl^- en disolución. Es usada para atacar metales como el acero inoxidable con un tiempo de 5 a 30 segundos.

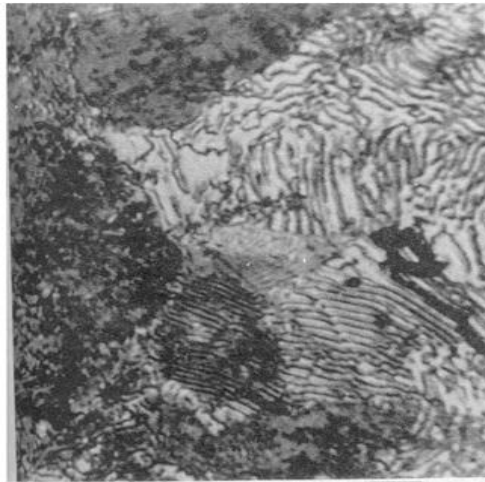


Fig. II.2. Estructura de un acero A-36 con una ataque químico a una vista de 100x.
(Internet: Universidad de Piura. Perú. Internet: www.udep.edu.pe 22-08-2009)

II.3.5 Microestructuras de los aceros

Los constituyentes metálicos que pueden presentarse en los aceros son: ferrita, cementita, perlita, sorbita, troostita, martensita, bainita, y rara vez austenita, aunque nunca como único constituyente. También pueden estar presentes constituyentes no metálicos como óxidos, silicatos, sulfuros y aluminatos.

II.3.5.1 Ferrita

Es una solución sólida de carbono en hierro alfa, su solubilidad a la temperatura ambiente es del orden de 0.008% de carbono, por esto se considera como hierro puro, la máxima solubilidad de carbono en el hierro alfa es de 0,02 % a 723 °C.

La ferrita es la fase más blanda y dúctil de los aceros, cristaliza en la red cúbica centrada en el cuerpo, tiene una dureza de 90 Brinell y una resistencia a la tracción de 28 kg/mm², llegando hasta un alargamiento del 40 %. La ferrita se observa al microscopio como granos poligonales claros. En los aceros, la ferrita puede aparecer como cristales mezclados con los de perlita, en los aceros de menos de 0.6 % de carbono; formando una red o malla que limita los granos de perlita, en los aceros de 0.6 a 0.85 % de carbono en forma de agujas o bandas circulares orientados en la dirección de los planos cristalográficos de la austenita como en los aceros en bruto de colada o en aceros que han sido sobrecalentados. Este tipo de estructura se denomina Widmanstatten.

La ferrita también aparece como elemento eutectoide de la perlita formando láminas paralelas separadas por otras láminas de cementita, en la estructura globular de los aceros de herramientas aparece formando la matriz que rodea los glóbulos de cementita, en los aceros hipoeutectoides templados, puede aparecer mezclada con la martensita cuando el temple no ha sido bien efectuado.

II.3.5.2 Cementita

Es el carburo de hierro de fórmula Fe₃C, contiene 6.67 % carbono y 93.33 % de hierro, es el microconstituyente más duro y frágil de los aceros al

carbono, alcanzando una dureza Brinell de 700 (68 HRc) y cristaliza en la red ortorrómbica.

Microestructura del acero 1 % carbono, red blanca de cementita. En las probetas atacadas con ácidos se observa de un blanco brillante y aparece como cementita primaria o proeutéctica en los aceros con más de 0.9 % C formando una red que envuelve los granos de perlita, formando parte de la perlita como láminas paralelas separadas por otras láminas de ferrita, se presenta en forma de glóbulos o granos dispersos en una matriz de ferrita, cuando los aceros de alto carbono se han sometido a un recocido de globulización, en los aceros hipoeutectoides que no han sido bien templados.

II.3.5.3 Perlita

Es el microconstituyente eutectoide formado por capas alternadas de ferrita y cementita, compuesta por el 88 % de ferrita y 12 % de cementita, contiene el 0.8 % C. Tiene una dureza de 250 Brinell, resistencia a la tracción de 80 kg/mm² y un alargamiento del 15%; el nombre de perlita se debe a las iridaciones que adquiere al iluminarla, parecidas a las perlas. La perlita aparece en general en el enfriamiento lento de la austenita y por la transformación isotérmica de la austenita en el rango de 650 a 723 °C.

Microestructura del acero al carbono, cristales oscuros de perlita. Si el enfriamiento es rápido (100-200 °C/seg.), la estructura es poco definida y se denomina Sorbita, si la perlita laminar se somete a un recocido a temperatura próxima a 723 °C, la cementita adopta la forma de glóbulos incrustados en la masa de ferrita, denominándose perlita globular.

II.3.5.4 Austenita

Es el constituyente más denso de los aceros y está formado por una solución sólida por inserción de carbono en hierro gamma. La cantidad de carbono disuelto, varía de 0.8 al 2 % C que es la máxima solubilidad a la temperatura de 1130 °C. La austenita no es estable a la temperatura ambiente pero existen algunos aceros al cromo-níquel denominados austeníticos cuya estructura es austenita a temperatura ambiente.

La austenita está formada por cristales cúbicos centrados en las caras, con una dureza de 300 Brinell, una resistencia a la tracción de 100 kg/mm² y un alargamiento del 30 %, no es magnética.

Microestructura de la austenita: La austenita no puede atacarse con nital, se disuelve con agua regia en glicerina apareciendo como granos poligonales frecuentemente maclados, puede aparecer junto con la martensita en los aceros templados.

II.3.5.5 Martensita

Es el constituyente de los aceros templados, está conformado por una solución sólida sobresaturada de carbono o carburo de hierro en ferrita y se obtiene por enfriamiento rápido de los aceros desde su estado austenítico a altas temperaturas.

El contenido de carbono suele variar desde 0.1 hasta el 1% de carbono, sus propiedades físicas varían con su contenido en carbono hasta un máximo de 0.7 % C.

Microestructura de la martensita: La martensita tiene una dureza de 50 a 68 HRc, resistencia a la tracción de 170 a 250 kg/mm² y un alargamiento del 0.5 al 2.5 %, muy frágil y presenta un aspecto acicular formando grupos en zigzag con ángulos de 60 grados.

Los aceros templados suelen quedar demasiado duros y frágiles, inconveniente que se corrige por medio del revenido que consiste en calentar el acero a una temperatura inferior a la crítica inferior (727 °C), dependiendo de la dureza que se desee obtener, enfriándolo luego al aire o en cualquier medio.

II.3.5.6 Troostita

Es un agregado muy fino de cementita y ferrita, se produce por un enfriamiento de la austenita con una velocidad de enfriamiento ligeramente inferior a la crítica de temple o por transformación isotérmica de la austenita en el rango de temperatura de 500 a 600 °C, o por revenido a 400 °C. Sus propiedades físicas son intermedias entre la martensita y la sorbita, tiene una dureza de 400 a 500 Brinell, una resistencia a la tracción de 140 a 175 kg/mm² y un alargamiento del 5 al 10 %. Es un constituyente nodular oscuro con estructura radial apreciable a unos 1000X y aparece generalmente acompañando a la martensita y a la austenita.

II.3.5.7 Sorbita

Es también un agregado fino de cementita y ferrita. Se obtiene por enfriamiento de la austenita con una velocidad de enfriamiento bastante inferior a la crítica de temple o por transformación isotérmica de la austenita en

la zona de 600 a 650 %, o por revenido a la temperatura de 600 %. Su dureza es de 250 a 400 Brinell, su resistencia a la tracción es de 88 a 140 kg/mm², con un alargamiento del 10 al 20 %.

Con pocos aumentos aparece en forma muy difusa como manchas, pero con 1000X toma la forma de nódulos blancos muy finos sobre fondo oscuro, figura 16; de hecho tanto la troostita como la sorbita pueden considerarse como perlita de grano muy fino.

II.3.5.8 Bainita

Es el constituyente que se obtiene en la transformación isotérmica de la austenita cuando la temperatura del baño de enfriamiento es de 250 a 500°C. Se diferencian dos tipos de estructuras: la bainita superior de aspecto arborescente formada a 500-580°C, compuesta por una matriz ferrítica conteniendo carburos. Bainita inferior, formada a 250-400 °C tiene un aspecto acicular similar a la martensita y constituida por agujas alargadas de ferrita que contienen delgadas placas de carburos.

La bainita tiene una dureza variable de 40 a 60 HRc comprendida entre las correspondientes a la perlita y a la martensita.

Los constituyentes que pueden presentarse en los aceros aleados son los mismos de los aceros al carbono, aunque la austenita puede ser único constituyente y además pueden aparecer otros carburos simples y dobles o complejos.

II.4 SOLDADURA

La soldadura, en ingeniería, se define como el procedimiento por el cual dos o más piezas de metal se unen por aplicación de calor, presión, o una combinación de ambos, con o sin el aporte de otro metal, llamado metal de aportación, cuya temperatura de fusión es inferior a la de las piezas que se han de soldar.

La mayor parte de procesos de soldadura se pueden separar en dos categorías: soldadura por presión, que se realiza sin la aportación de otro material mediante la aplicación de la presión suficiente y normalmente ayudada con calor, y soldadura por fusión, realizada mediante la aplicación de calor a las superficies, que se funden en la zona de contacto, con o sin aportación de otro metal. En cuanto a la utilización de metal de aportación se distingue entre soldadura ordinaria y soldadura autógena. Esta última se realiza sin añadir ningún material. La soldadura ordinaria o de aleación se lleva a cabo añadiendo un metal de aportación que se funde y adhiere a las piezas base, por lo que realmente éstas no participan por fusión en la soldadura. Se distingue también entre soldadura blanda y soldadura dura, según sea la temperatura de fusión del metal de aportación empleado; la soldadura blanda utiliza metales de aportación cuyo punto de fusión es inferior a los 450 °C, y la dura, metales con temperaturas superiores.

Gracias al desarrollo de nuevas técnicas durante la primera mitad del siglo XX, la soldadura sustituyó al atornillado y al remachado en la construcción de muchas estructuras, como puentes, edificios y barcos. Es una

técnica fundamental en la industria del motor, en la aeroespacial, en la fabricación de maquinaria y en la de cualquier producto hecho con metales.

El tipo de soldadura más adecuado para unir dos piezas de metal depende de las propiedades físicas de los metales, de la utilización a la que está destinada la pieza y de las instalaciones disponibles. Los procesos de soldadura se clasifican según las fuentes de presión y calor utilizadas.

El procedimiento de soldadura por presión original es el de soldadura de fragua, practicado durante siglos por herreros y artesanos. Los metales se calientan en un horno y se unen a golpes de martillo. Esta técnica se utiliza cada vez menos en la industria moderna.

II.4.1 Tipos de soldadura

II.4.1.1 Soldadura ordinaria o de aleación

Es el método utilizado para unir metales con aleaciones metálicas que se funden a temperaturas relativamente bajas. Se suele diferenciar entre soldaduras duras y blandas, según el punto de fusión y resistencia de la aleación utilizada. Los metales de aportación de las soldaduras blandas son aleaciones de plomo y estaño y, en ocasiones, pequeñas cantidades de bismuto. En las soldaduras duras se emplean aleaciones de plata, cobre y cinc (soldadura de plata) o de cobre y zinc.

Para unir dos piezas de metal con aleación, primero hay que limpiar su superficie mecánicamente y recubrirla con una capa de fundente, por lo general resina o bórax. Esta limpieza química ayuda a que las piezas se unan con más fuerza, ya que elimina el óxido de los metales. A continuación se calientan las

superficies con un soldador o soplete, y cuando alcanzan la temperatura de fusión del metal de aportación se aplica éste, que corre libremente y se endurece cuando se enfría. En el proceso llamado de resudación se aplica el metal de aportación a las piezas por separado, después se colocan juntas y se calientan. En los procesos industriales se suelen emplear hornos para calentar las piezas.

Este tipo de soldadura lo practicaban ya, hace más de 2.000 años, los fenicios y los chinos. En el siglo I después de Cristo, Plinio habla de la soldadura con estaño como procedimiento habitual de los artesanos en la elaboración de ornamentos con metales preciosos; en el siglo XV se conoce la utilización del bórax como fundente.

II.4.1.2 Soldadura por fusión

Este tipo agrupa muchos procedimientos de soldadura en los que tiene lugar una fusión entre los metales a unir, con o sin la aportación de un metal, por lo general sin aplicar presión y a temperaturas superiores a las que se trabaja en las soldaduras ordinarias. Hay muchos procedimientos, entre los que destacan la soldadura por gas; la soldadura por arco y la aluminotérmica. Otras más específicas son la soldadura por haz de partículas, que se realiza en el vacío mediante un haz de electrones o de iones, y la soldadura por haz luminoso, que suele emplear un rayo láser como fuente de energía.

Soldadura por gas

La soldadura por gas o con soplete utiliza el calor de la combustión de un gas o una mezcla gaseosa, que se aplica a las superficies de las piezas y a la varilla de metal de aportación. Este sistema tiene la ventaja de ser portátil ya

que no necesita conectarse a la corriente eléctrica. Según la mezcla gaseosa utilizada se distingue entre soldadura oxiacetilénica (oxígeno/acetileno) y oxhídrica (oxígeno/hidrógeno), entre otras.

Soldadura aluminotérmica

El calor necesario para este tipo de soldadura se obtiene de la reacción química de una mezcla de óxido de hierro con partículas de aluminio muy finas. El metal líquido resultante constituye el metal de aportación. Se emplea para soldar roturas y cortes en piezas pesadas de hierro y acero, y es el método utilizado para soldar los raíles o rieles de los trenes.

II.4.1.3 Soldadura por presión

Este método agrupa todos los procesos de soldadura en los que se aplica presión sin aportación de metales para realizar la unión. Algunos procedimientos coinciden con los de fusión, como la soldadura con gases por presión, donde se calientan las piezas con una llama, pero difieren en que la unión se hace por presión y sin añadir ningún metal. El proceso más utilizado es el de soldadura por resistencia; otros son la soldadura por fragua, la soldadura por fricción y otros métodos más recientes como la soldadura por ultrasonidos.

Soldadura por Resistencia

Este tipo de soldadura se realiza por el calentamiento que experimentan los metales debido a su resistencia al flujo de una corriente eléctrica. Los electrodos se aplican a los extremos de las piezas, se colocan juntas a presión y se hace pasar por ellas una corriente eléctrica intensa durante un instante. La

zona de unión de las dos piezas, como es la que mayor resistencia eléctrica ofrece, se calienta y funde los metales. Este procedimiento se utiliza mucho en la industria para la fabricación de láminas y alambres de metal, y se adapta muy bien a la automatización.

II.4.1.4 Soldadura por Arco

Los procedimientos de soldadura por arco son los más utilizados, sobre todo para soldar acero, y requieren el uso de corriente eléctrica. Esta corriente se utiliza para crear un arco eléctrico entre uno o varios electrodos aplicados a la pieza, lo que genera el calor suficiente para fundir el metal y crear la unión.

La soldadura por arco tiene ciertas ventajas con respecto a otros métodos. Es más rápida debido a la alta concentración de calor que se genera y por lo tanto produce menos distorsión en la unión. En algunos casos se utilizan electrodos fusibles, que son los metales de aportación, en forma de varillas recubiertas de fundente o desnudas; en otros casos se utiliza un electrodo refractario de wolframio y el metal de aportación se añade aparte. Los procedimientos más importantes de soldadura por arco son con electrodo recubierto, con protección gaseosa y con fundente en polvo.

La soldadura de arco eléctrico consiste en unir dos piezas de acero con acero fundido producido por el flujo de una enorme corriente eléctrica a través de una varilla llamada electrodo, como se indica en, la figura 2.1. El paso de la corriente eléctrica por las piezas que se sueldan produce la fusión de varios milímetros de la superficie.

Al enfriarse y solidificarse el material de aporte y de la superficie de las piezas, éstas quedan unidas.

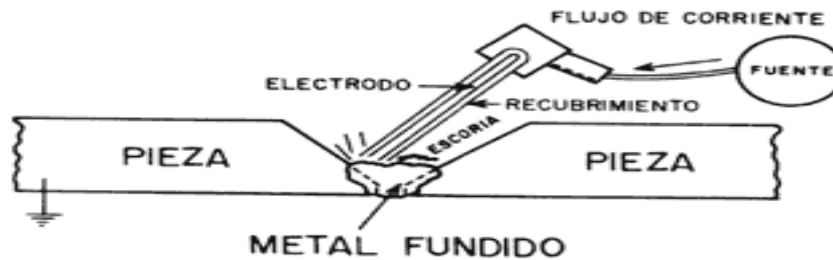


Figura II.3. Proceso de soldadura con acero eléctrico. El flujo de una enorme corriente eléctrica produce la fusión de la punta del electrodo y de la superficie de las piezas. El recubrimiento del electrodo ayuda a generar una atmósfera y una escoria que protegen al metal líquido de la oxidación y de otros agentes externos.

(http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/080/htm/sec_9.htm 21-10-08)

Los electrodos consisten en una varilla delgada de acero de bajo carbono recubierta con una mezcla de compuestos que sirven para estabilizar el arco eléctrico, generar una atmósfera protectora que evite la formación de óxidos y nitruros, promover la formación de una escoria también protectora y, en algunos casos, proveer de elementos de aleación. Entre los materiales que se utilizan para fabricar el recubrimiento destacan el rutilo (que es el óxido de titanio), el carbonato de calcio, la fluorita, el acetato de celulosa, algunos silicatos, arcillas, polvos de hierro y manganeso, y la mica.

Durante la elaboración de una soldadura ocurren muchas reacciones químicas y transformaciones en la estructura del acero, cuya combinación determina el éxito o fracaso de una soldadura. La experiencia acumulada de muchos años y la síntesis de muchas investigaciones han conducido al establecimiento de rutinas que deben observarse:

a) Conocer la composición química de los aceros que se van a soldar. La soldabilidad del acero es muy susceptible al contenido de carbono. Los aceros de bajo carbono, (con menos del 0.25%) se sueldan con alta probabilidad de éxito. Los aceros de medio carbono (0.3 a 0.45%, C) y alto carbono (0.5 a 1.4% C) tienen alto riesgo de agrietamiento y requieren cuidados especiales. La formación de estructuras frágiles como la martensita, causada por los cambios de temperatura al soldar, son más probables en la medida en que el contenido de carbono aumenta.

b) Las piezas que se van a soldar deben tener, cortes (como los que se indican en la **figura II.4**). Además, en el momento de la soldadura, las superficies deben estar limpias y libres de óxidos.

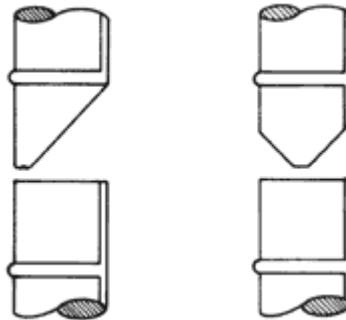


Figura II.4. Cortes de bisel en varillas de grueso calibre que sirven para ampliar la superficie de amarre durante la soldadura.

(http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/080/htm/sec_9.htm 21-10-08)

c) Los electrodos deben seleccionarse adecuadamente para que la resistencia de la soldadura concuerde con la de la varilla. Además, deben utilizarse con mucho cuidado. La humedad penetra fácilmente en el recubrimiento de los electrodos y propicia la entrada del hidrógeno durante la soldadura. El hidrógeno fragiliza el acero. Para evitar este problema los electrodos vienen

de fábrica empacados en bolsas de plástico selladas. Cuando la bolsa se abre, los electrodos se exponen a la humedad ambiente y se deben utilizar en las próximas dos o tres horas. Si no es así, los electrodos se deben llevar a un horno secador. Las manchas de grasa y las despostilladuras también degradan los electrodos.

d) Certificar la calificación profesional de los soldadores. La soldadura requiere de una gran destreza, visual y manual, y de un cúmulo de conocimientos. Es además una actividad de alto riesgo profesional donde el deterioro de órganos como los ojos y los pulmones debe evitarse al máximo. Los ojos se dañan severamente con la radiación luminosa que produce el arco eléctrico y por eso se usa el filtro de luz que lleva el casco del soldador en la mirilla. Los pulmones se exponen a los gases tóxicos que se desprenden, el bióxido de nitrógeno y el ozono, entre otros.

e) Supervisar continuamente el proceso de soldadura. Al inicio de cada obra conviene que se hagan varias soldaduras de ensayo que se verifiquen con pruebas de tensión hasta la ruptura. La soldadura tiene que ser de resistencia suficiente para que la ruptura de dos varillas soldadas ocurra fuera de una zona de unos diez centímetros alrededor de la unión. También debe ser posible hacer un dobléz de 180° en la zona soldada sin que se rompa o se agriete. Cuando se sueldan varillas de diámetro mayor, lo mejor es hacer una radiografía de cada soldadura para asegurar la calidad.

Soldadura por Arco con Electrodo Recubierto (SMAW)

También llamado Manual Metal Arc (MMA), en este tipo de soldadura el electrodo metálico, que es conductor de electricidad, está recubierto de fundente y conectado a la fuente de corriente. El metal a soldar está conectado al otro borne de la fuente eléctrica. Al tocar con la punta del electrodo la pieza de metal se forma el arco eléctrico. El intenso calor del arco funde las dos partes a unir y la punta del electrodo, que constituye el metal de aportación. Este procedimiento, desarrollado a principios del siglo XX, se utiliza sobre todo para soldar acero.

Con el calor producido por el arco, se funde el extremo del electrodo y se quema el revestimiento, produciéndose la atmósfera adecuada para que se produzca la transferencia de las gotas del metal fundido desde el alma del electrodo hasta el baño de fusión en el material de base.

En el arco las gotas del metal fundido se proyectan recubiertas de escoria fundida procedente del recubrimiento que por efecto de la tensión superficial y de la viscosidad flota en la superficie, solidificando y formando una capa de escoria protectora del baño fundido.

El material de aportación que se usa en el proceso MMA se conoce como electrodo y consiste en una varilla metálica, generalmente acero, recubierta de un revestimiento concéntrico de flux extruido y seco. La fabricación de electrodos se realiza en dos líneas en paralelo: varilla o alma, y revestimiento.

Fabricación de la varilla.

La materia prima es el alambro de 6 a 8 mm de diámetro, que la siderurgia suministra en rollos o bobinas, de aproximadamente 1.000 Kg. El

fabricante comprueba la composición a partir del análisis químico de un despunte de la bobina y posteriormente ésta pasa a una devanadora protegida por una campana metálica, en donde el alambón se retuerce y despende el óxido adherido en el tren de laminado en caliente. A esta etapa se le denomina decapado mecánico. Al ser la fabricación de electrodos un proceso continuo, los extremos de cada bobina se empalman por resistencia eléctrica, eliminando las rebabas de la soldadura con muela de esmeril.

Seguidamente el alambón pasa a las cajas de trefilado donde tiene lugar una reducción progresiva de diámetro hasta el deseado, utilizando sustancias lubricantes para facilitar la operación y evitar un endurecimiento del alambre, que le haga quebradizo. A continuación se desengrasa o se lava con agua el polvo de jabón adherido a su superficie. Los diámetros del almo son normalmente 1.6, 2, 2.5, 3, 3.25, 4, 5 y 6 mm, siendo los más utilizados los señalados en negrita. Una máquina endereza y corta las varillas a un ritmo entre 580 y 1400 cortes/minuto, en función de su diámetro.

Fabricación del revestimiento.

Para el revestimiento se suelen utilizar hasta cuarenta minerales y sustancias distintas, como arena de zirconio, rutilo, celulosa, caolín, mármol, polvo de hierro, FeSi, FeTi, FeMn, etc. Se realiza un análisis individualizado de la calidad y composición de estos productos.

La selección, origen y dosificación de cada componente que va a intervenir en la composición del revestimiento es un secreto celosamente guardado fabricante. Una vez escogido cada componente, se machaca y criba hasta conseguir la granulometría adecuada y se dosifica mediante un programa de computadora, pasando de un sistema de tolvas específicas de cada producto

a una tolva central, donde seguidamente se homogenizan mediante vibradores distribuyéndose después la mezcla en tolvas destinadas a producción.

Para aglutinar la mezcla seca y darle consistencia se agrega silicato sódico o silicato potásico. Una vez obtenida la mezcla húmeda se vierte en una prensa en donde penetra la varilla por un lado saliendo recubierta en toda su longitud por el lado opuesto. Se comprueba la excentricidad del recubrimiento y se cepillan ambos extremos de la varilla revestida. Uno, para el ajuste de la pinza portaelectrodos y el otro, para facilitar el cebado de arco. Se marcan con la identificación del fabricante y el tipo de electrodo según American Welding Society, AWS.

El secado previo se lleva a cabo haciéndolos pasar por un horno de funcionamiento continuo, cuya temperatura se incrementa gradualmente para evitar que se agriete y se desprenda el revestimiento. Para electrodos tipo rutilo normal, el secado previo a una temperatura es de aproximadamente 100 °C es suficiente. Para electrodos básicos, después de este secado previo se pasan a hornos convencionales de aire para darles un secado final a 400-450 °C, con el fin de que el contenido de H₂O a 1.000 °C según AWS, sea inferior a 0,4%.

La composición de los revestimientos suele ser muy compleja. Se trata generalmente de una serie de sustancias orgánicas y minerales. En la fabricación de la pasta para el revestimiento suelen intervenir:

- Óxidos naturales: óxidos de hierro, ilemita (50% óxido férrico y 50% óxido de titanio), rutilo (óxido de titanio), sílice (óxido de silicio).
- Silicatos naturales: caolín, talco, mica, feldepasto.
- Productos volátiles: celulosa, serrín.
- Fundentes.

- Productos químicos: carbonatos, óxidos.
- Ferroaleaciones: de Mn, Si, Ti.
- Aglomerantes: silicato sódico, silicato potásico.

Sin embargo, la naturaleza, dosificación y origen de los componentes permanece en secreto por parte del fabricante que en la práctica se limita a garantizar la composición química del metal depositados y sus características mecánicas: carga de rotura, límite elástico, alargamiento y resiliencia (tenacidad).

Funciones del revestimiento.

Eléctrica.

Cebado de arco. En general, las sustancias que se descomponen produciendo gases fácilmente dissociables exigen tensiones de cebado de arco más elevadas, debido al calor absorbido en la disociación, que es un proceso endotérmico. Con corriente alterna, se necesitan tensiones de cebado más altas. Los silicatos, carbonatos, óxidos de Fe, óxidos de Ti, favorecen el cebado y el mantenimiento del arco

Estabilidad del arco. La estabilidad del arco depende, entre otros factores, del estado de ionización de los gases comprendidos entre el ánodo y el cátodo. Para un arco en corriente alterna es imprescindible un medio fuertemente ionizado. Por este motivo se añaden al revestimiento, entre otras sustancias, sales de sodio y de potasio.

Física.

Una misión fundamental del revestimiento es evitar que el metal fundido entre en contacto con el oxígeno, el nitrógeno y el hidrógeno del aire, ya sea por la formación de un gas protector alrededor del camino que han de seguir las gotas del metal fundido y después, mediante la formación de una abundante escoria que flota por encima del baño de fusión.

El revestimiento debe ser versátil y permitir generalmente la soldadura en todas las posiciones. En ello interviene dos factores:

- El propio espesor del revestimiento.
- Su naturaleza, que determina la viscosidad de la escoria, que es necesaria para mantener la gota en su lugar a través de su propia tensión superficial y para proteger el baño fundido del contacto con el aire.

El revestimiento del electrodo se consume en el arco con una velocidad lineal menor que el alma metálica del mismo. Como resultado, el recubrimiento queda prolongado sobre el extremo del alma y forma un cráter que sirve para dirigir y concentrar el chorro del arco, disminuyendo sus pérdidas térmicas.

Metalúrgica.

El revestimiento dispone de elementos que se disuelven en el metal fundido con objeto de mejorar las características mecánicas del metal depositado.

La escoria:

- Reduce la velocidad de enfriamiento de la soldadura por su efecto aislante.
- Reduce el número de inclusiones en la soldadura, al eliminar un gran número de impurezas.
- Produce en el baño una verdadera micro metalurgia, desoxidando, desnitrurando, desfosforando y desulfurando el metal fundido.
- Aísla el baño de elementos con los que tiene gran afinidad: oxígeno, nitrógeno, hidrógeno ya sea a través de escorias o gases protectores.

Soldadura por Arco con Protección Gaseosa

Es la que utiliza un gas para proteger la fusión del aire de la atmósfera. Según la naturaleza del gas utilizado se distingue entre soldadura MIG, si utiliza gas inerte, y soldadura MAG, si utiliza un gas activo. Los gases inertes utilizados como protección suelen ser argón y helio; los gases activos suelen ser mezclas con dióxido de carbono. En ambos casos el electrodo, una varilla desnuda o recubierta con fundente, se funde para rellenar la unión.

Otro tipo de soldadura con protección gaseosa es la soldadura TIG, que utiliza un gas inerte para proteger los metales del oxígeno, como la MIG, pero se diferencia en que el electrodo no es fusible; se utiliza una varilla refractaria de wolframio. El metal de aportación se puede suministrar acercando una varilla desnuda al electrodo.

Soldadura por Arco con Fundente en Polvo

Este procedimiento, en vez de utilizar un gas o el recubrimiento fundente del electrodo para proteger la unión del aire, usa un baño de material fundente en polvo donde se sumergen las piezas a soldar. Se pueden emplear varios electrodos de alambre desnudo y el polvo sobrante se utiliza de nuevo, por lo que es un procedimiento muy eficaz.



Figura II.5. Equipos fabricados con acero al carbón.
(<http://materias.fi.uba.ar/6713/CursoIASListook.pdf> 17-11-08)



Figura II.6. Equipos fabricados con acero inoxidable.
(<http://materias.fi.uba.ar/6713/CursoIASListook.pdf> 17-11-08)

II.5 MODOS DE FALLA EN SOLDADURAS DONDE EL PRECALENTAMIENTO NO TIENE INFLUENCIA.

II.5.1 Fisuración en Caliente

Tiene lugar en el metal de soldadura cuando aún está a alta temperatura, en este caso se llaman Fisuras de Solidificación. Rara vez ocurre en la ZAC y en este caso se llaman Fisuras por Licuación.

A menudo son invisibles y es necesario un plegado de cara para evidenciarlas. Se presentan como pequeñas fisuras de no más de 3 mm de longitud distribuidas al azar sobre el cordón, a las que se las denomina microfisuras.

Se cree que el mecanismo es el resultado de la ruptura de una película intergranular líquida de bajo punto e fusión (1100 °C / 1200 °C), durante la contracción que tiene lugar cuando la Austenita se enfría desde su punto de fusión (1450 °C / 1500 °C).

Estos 300 °C de diferencia producen tensiones de contracción que cuando la soldadura tiene alto embridamiento produce fisuración. Se cree que además pueda influir la Transformación Peritectica de los aceros, que tiene lugar a esas temperaturas cercanas al punto de fusión.

Este tipo de fisuración es usual en Aceros Inoxidables totalmente Austeníticos. La presencia de Fósforo (P) y Azufre (S) promueven esta

fisuración. La presencia de 3 a 5 % de Ferrita delta (δ) en los bordes de grano de Austenita es el mejor remedio contra la fisuración en caliente de Aceros Inoxidables Austeníticos (Serie 300).

Otro factor a tener en cuenta es la Velocidad de Soldadura, cuanto mayor sea esta mayor será la tendencia a la Fisuración en Caliente. Para evaluar la sensibilidad a la fisuración en caliente se utilizan ensayos tales como el "Fisco-Schnadt" para el metal de Soldadura y el "Varestraint" para el metal de soldadura y el metal base. El efecto del Pre calentamiento sobre la aparición de este tipo de defectos es, si no perjudicial, por lo menos insignificante.

II.5.2 Desgarre Laminar

Esta Fisuración está asociada a soldaduras embridadas de tal manera que se producen Tensiones de Tracción demasiado elevadas (incluye a las Tensiones Residuales debidas al espesor) transversalmente al plano de laminación del material base, o sea perpendiculares al espesor.

En esta dirección, el material base, que en algún momento de su historia térmica ha sido laminado, tiene menor plasticidad (alargamiento) que en la dirección del laminado. La suma de estos dos factores genera fisuras paralelas a la superficie e invisibles desde el exterior.

El desgarre laminar ocurre generalmente durante el proceso de fabricación o montaje (no en servicio) donde la calidad del material base

(acero) es importante, las especificaciones de Ingeniería deben limitar el nivel de inclusiones en las especificaciones de compra.

El desgarre laminar se caracteriza y/o se les reconoce por estar fuera de la ZAC (zona afectada por el calor) a diferencia de la fisuración en caliente.

El Diseño debe especificar ensayos en la categoría de US (Upper Shelf) respecto al observado de probetas, luego de la fabricación o montaje o ambos para aquellas uniones Soldadas que pudieran estar sujetas a altos embridamiento en la dirección del espesor (juntas en T, entre otras).

El Pre calentamiento no es considerado apto para evitar este tipo de fisuración aunque en condiciones límites Podría reducir o distribuir más favorablemente las tensiones.

II.5.3 Fisuración por Recalentamiento

Es un tipo complejo de fisuración que afecta ciertas áreas específicas de la ZAC, que ha sido sujeta a varios ciclos térmicos de soldadura, y se puede observar solo después de un Tratamiento Térmico post Soldadura.

El mecanismo de fisuración pareciera estar asociado a la temperatura y a las tensiones inducidas en borde de grano de la ZAC por precipitados que impiden la deformación plástica durante el Tratamiento Térmico post Soldadura. El Pre calentamiento no influye en este tipo de fisuración.



Fig. II.7. Fisuración por Recalentamiento en una soldadura de un acero Austenítico.
(<http://materias.fi.uba.ar/6713/CursoIASListook.pdf> 17-11-08)

II.6 EVALUACIÓN DE AGRIETAMIENTO EN CALIENTE EN SOLDADURAS

Son numerosos los ensayos que se han desarrollado para investigar el agrietamiento en caliente de los aceros. La mayoría de estas experiencias se han concebido para evaluar el agrietamiento de solidificación, agrietamiento en la zona afectada térmicamente, entre otros.

II.6.1 Ensayo Varestraint

Savage y Lundin en 1966, desarrollaron el Ensayo Varestraint con el fin de aplicarlo en estudios de soldabilidad. El Ensayo Varestraint permite evaluar la soldabilidad de las distintas zonas de una soldadura y de un proceso de soldadura respecto de su comportamiento ante el agrietamiento en caliente. Es un ensayo que entrega resultados reproducibles de las condiciones de soldeo y deformación. La técnica de aumentar la deformación permite separar variables

metalúrgicas y mecánicas del proceso de soldadura en el agrietamiento en caliente.

El ensayo da valores directos sin necesidad de evaluación estadística de los resultados y permite estudiar además de la soldabilidad, los mecanismos de inicio y propagación de las grietas, las que generalmente ocurren en regiones ricas en soluto.

Para que se forme una grieta, se requiere fundamentalmente que:

1. El material presente una fase o combinación de fases que tengan una capacidad limitada de soportar deformaciones dentro de un rango crítico de temperatura.
2. La deformación impuesta a la soldadura por acción de la tensión, dentro del rango crítico de temperatura, exceda su tolerancia.

El primer factor es de origen metalúrgico y depende de la composición de la aleación, las variables térmicas y mecánicas del proceso, los parámetros de soldeo y la geometría de la soldadura, todos los cuales afectan la distribución de la temperatura en el cordón y en la zona afectada térmicamente.

El segundo factor es estrictamente mecánico, aunque los cambios de volumen que acompañan las transformaciones metalúrgicas contribuyen a la deformación total de la soldadura.

El ensayo V-restraint utiliza como probeta una pequeña muestra de 127 mm x 25,4 mm (5" x 1") y de espesor 3,175 mm (0,125").

Apoyada en sus dos extremos, dejando libre una zona de 86,76 mm que será sometida a deformación; bajo la probeta existe un bloque con un radio de curvatura predeterminado, cuya función es producir la deformación aumentada como se muestra en la **figura II.8**:

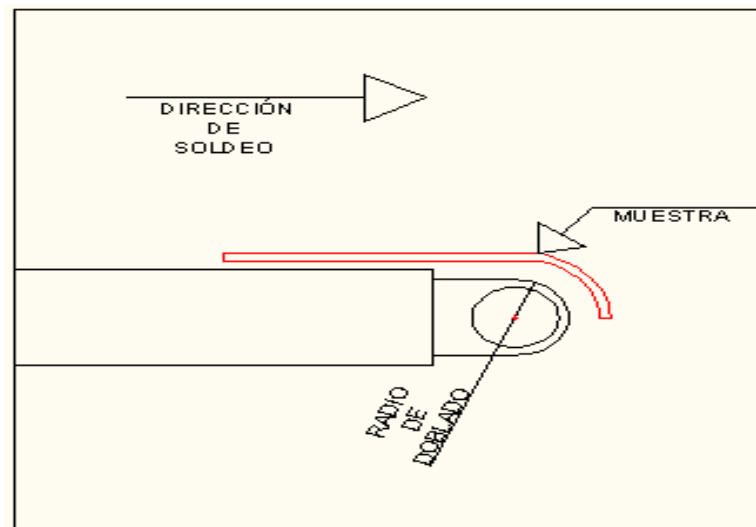


Fig. II.8. Detalle del proceso Varestraint y como ubicar la probeta.
(Soldadura. James A. Pender, tercera edición)

Para la ejecución del ensayo, se utiliza una pasada del material de aporte, donde en caliente se procede a realizar el doblado; en algunos casos (como es el ensayo de Varestraint por punto), se utiliza la técnica de múltiples pasadas. El método consiste en la realización de cuatro cordones de soldadura autógena TIG longitudinal a la muestra, a partir de un extremo de esta, con las condiciones de soldeo predeterminadas y equivalentes para todas las probetas. En la cuarta pasada, cuando el arco se aproxima al centro de la probeta, se aplica violentamente una carga que obliga a la probeta a seguir la

conformación del bloque curvo, produciendo una deformación aumentada justo cuando la poza del metal ha llegado a un punto preestablecido (ver figura II.9).

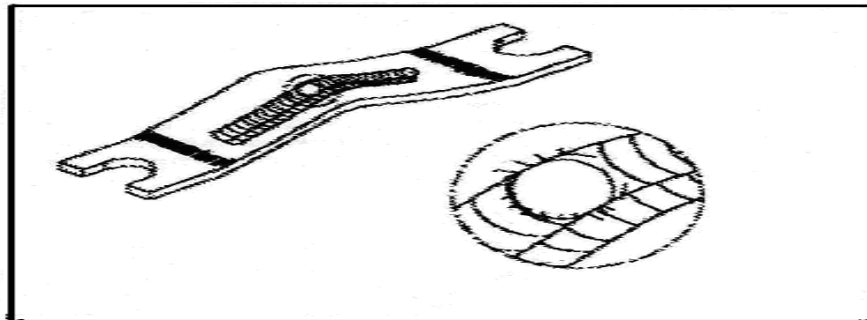


Fig. II.9. Técnica de múltiples pasadas y región del ensayo con mayor aumento para el caso de Varestreint por punto.

(Centro de información tecnológica - vol. 9 n° 5 – 1998. Editor: José O. Valderrama)

Para evaluar el agrietamiento, deben registrarse tanto, el número como la longitud de todas las grietas presentes. Para esto pueden usarse tres criterios:

1. Comienzo del agrietamiento. Deformación aumentada mínima requerida para producir agrietamiento.
2. Largo de todas las grietas. Suma de los largos de todas las grietas observadas.
3. Longitud máxima de grieta. La grieta de mayor largo observada.

Es interesante notar que cualquiera sea el material, se puede producir un agrietamiento inducido por deformación. Para ello basta seleccionar la adecuada deformación aumentada. Esto es una de las mayores ventajas de este ensayo, ya que permite experimentar con materiales incluso relativamente insensibles al agrietamiento y establecer una escala de sensibilidad al agrietado

donde se pueda ordenar en su posición relativa los diferentes materiales que existen.

Una forma de expresar los resultados, es establecer gráficamente el largo total de grietas en función del porcentaje de deformación para las diferentes muestras de acero.

CAPITULO III

MARCO METODOLÓGICO

Según el Manual UPEL para la elaboración de Trabajos de Grados, tesis Doctorales y Trabajos de Maestrías (2006), se pudo clasificar el trabajo de investigación respecto a factores definidos a continuación como:

III.1 NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN

Se cataloga de tipo descriptivo y del tipo exploratorio. Descriptivo ya que se miden las variables macroscópicas y microscópicas, las cuales permiten detectar defectos superficiales y observar la microestructura que forma el material respectivamente y así estudiar el fenómeno en las probetas de la sensibilidad al agrietamiento en soldadura de aceros disímiles cuando estas sean sometidas al ensayo de Varestreint.

Los estudios exploratorios, por su parte, pretenden examinar un tema o problema de investigación poco estudiado, es decir, cuando la revisión bibliográfica presenta ideas vagamente relacionadas con el problema en estudio. Este es el caso de la soldabilidad en aceros disímiles.

III.2 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Para alcanzar los objetivos planteados en este trabajo se siguen tanto los lineamientos de una investigación documental, como de una investigación del

tipo experimental; esto es, se recurrirá a la revisión bibliográfica y a la realización de ensayos normalizados.

III.3 POBLACIÓN Y MUESTRA

Se considera como población todos los posibles fenómenos que puedan ocurrir en la probeta soldada y como muestra las grietas causada en el material soldado de la probeta cuando esta sea sometida al ensayo de Varestraint.

III.4 TIPO DE MUESTREO

El posible tipo de muestreo de la investigación es probabilística, debido a que permitirá determinar o medir el tamaño del error en la medición del número de grietas presente en el material de la soldadura de la probeta cuando sea sometida al ensayo Varestraint

III.5 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

La técnica que se empleará para recolectar la información es la observación directa; mientras que los instrumentos empleados para recoger y almacenar la información son: el microscopio, proyector de imagen, fotografías, entre otros.

III.6 TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

Las técnicas de procesamiento de datos que se empleara en la presente investigación son las tablas, gráficas de barras y gráficos para los análisis y síntesis.

III.7 ASPECTOS ADMINISTRATIVOS

- Recursos materiales a utilizar: microscopio óptico, computador, soporte para el ensayo Varestraint, equipo de soldadura, entre otras.
- Recursos humanos: técnico soldador, técnicos de laboratorio.
- Recursos financieros: los recursos necesarios serán aportados por el investigador.

III.8 TÉCNICAS Y PROCEDIMIENTOS PARA LLEVAR A CABO LA INVESTIGACIÓN

III.8.1 DISEÑO EXPERIMENTAL

Para realizar la presente investigación se seguirá la secuencia del organigrama experimental presentado a continuación en la figura III.1, donde se presentan todos los pasos generales que se realizaran en las evaluaciones.

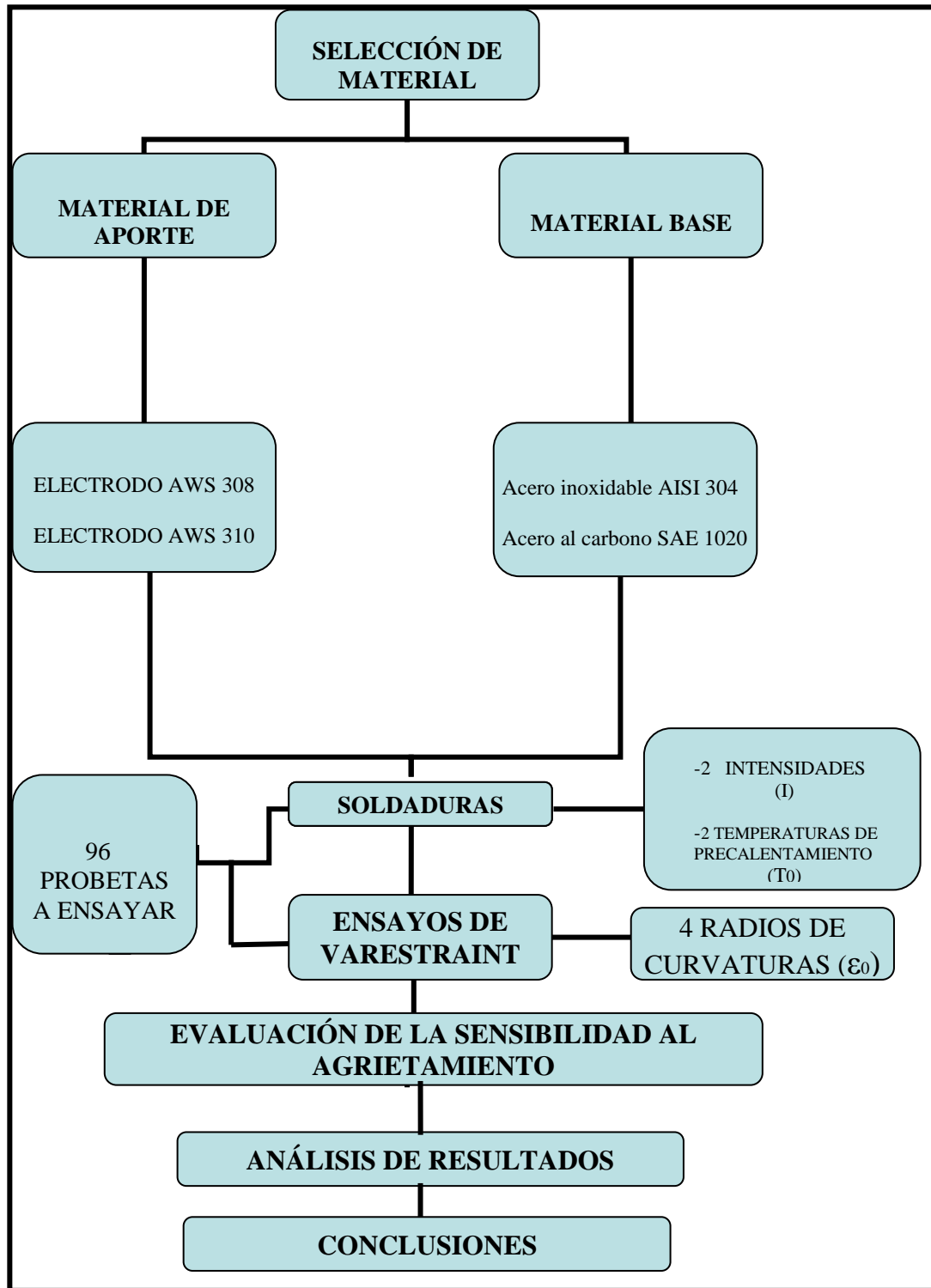


Figura III.1 Organigrama experimental. (Fuente propia, 2009)

III.8.2 Material a usar

El material de aporte a utilizar serán electrodos E 310-16 y/o E 308L-16 y de material base acero inoxidable austenítico AISI 304 y acero al carbono SAE 1020.

La composición química de los materiales de aporte y base fueron suministrados por las empresas dispensadoras y se encuentran tabulados en la **Tabla III.1**. El material de aporte (electrodo recubierto) fue adquirido en **Arco Metal C.A** y son de la marca **LINCOLN ELECTRIC**; mientras que los materiales base (en forma de lamina) fueron adquiridos en la empresa **DISTRIBUIDORA CARACAS S.R.L** y son procedentes de **SIDETUR S.A.**

Tabla III.1. Composición Química de los materiales (%) (Fuente: Certificados de calidad y catálogos de electrodos proporcionado por los distribuidores).

		C	Si	P	S	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu
MATERIAL	E 310-16	0,12	0,6			1,5	25	20		
	E 308L-16	0,03	0,7			0,8	19	10		
MATERIAL BASE	SAE 1020	0,2	0,15	0,007	0,027	0,59	0,07	0,09		0,22
	AISI 304	0,05	0,8	0,04	0,03	1,2	19,25	10		

III.8.3 Prueba de Varestraint

El agrietamiento en caliente se lleva a cabo por medio del ensayo de Varestraint, el cual permite provocar fisuras o grietas en caliente a la cantidad de 96 probetas (de dimensiones constantes) necesarias para realizar toda la evaluación. Para cada probeta que lleve un determinado material de aporte ya establecido, se le aplicara 2 niveles de intensidades (I), de 75 y 100 A; 2

temperaturas de precalentamiento (T_o), de 100 y 140 °C; así como 4 radios de curvatura (e) listados en la **Tabla III.2**.

Tabla III.2. Radios de curvatura de la máquina de Vareststraint (Fuente: Propia)

R1 (mm)	R2 (mm)	R3 (mm)	R4 (mm)
40	32	25	17

Las temperaturas de precalentamiento (T_p [°C]) fueron tomadas de acuerdo al método de Seferian y en razón del acero al carbono (ya que el acero inoxidable no requiere una temperatura de precalentamiento), el cual propone la siguiente formula:

$$T_p = 350 * \sqrt{C_T - 0,25} \quad (1)$$

Donde C_T [%], corresponde al equivalente total de carbono y se obtiene a partir de la suma del equivalente químico (C_q) y el equivalente en carbono del espesor (C_e) que depende a su vez del propio espesor y de la templabilidad del acero.

$$C_T = C_q + C_e \quad (2)$$

$$C_q = C + \frac{Mn + Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{7 * Mo}{90} \quad (3)$$

La formula que permite cuantificar el valor del carbono equivalente (C_e), para todos los % de carbono, es la siguiente: (Fuente: Yurioka – Ohshita “CEN”).

$$C_e = C + A * (C) * \left(\frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{20} + \left(\frac{Cr + Mo + Nb + V}{5} \right) + 5 * B \right) \quad (4)$$

$$A * (C) = 0,75 + 0,25 * \tanh \left[10 * C - 0,12 \right] \quad (5)$$

Al sustituir en cada expresión, se obtendrá un valor de temperatura de precalentamiento, que permitirá calentar el material base antes del proceso de soldadura. Para ello, se tiene la información requerida del acero de bajo carbono utilizado como material base (SAE 1020), cuyo aleantes (composición química producto de un análisis químico de colada en un espectrofotómetro) están tabulados la **Tabla III.1**.

Cálculo del Equivalente Químico: (C_q)

Sustituyendo en la ecuación 3:

$$C_q = 0,22 + \frac{0,59 + 0,070}{9} + \frac{0,090}{18} + \frac{7 * 0}{90} \Rightarrow C_q = 0,2983 \%$$

Cálculo del Equivalente Químico: (C_e)

$$A^*(C) = 0,75 + 0,25 * \tanh \left[10 * \left(0,22 - 0,12 \right) \right] \Rightarrow A^*(C) = 0,7749\%$$

Remplazando en la ecuación 4 y 5:

$$C_e = 0,22 + 0,7749 * \left(\frac{0,15}{24} + \frac{0,59}{6} + \frac{0,22}{15} + \frac{0,090}{20} + \left(\frac{0,070}{5} \right) \right) \Rightarrow C_e = 0,3267\%$$

Sustituyendo en la ecuación (2):

$$C_T = 0,2983 + 0,3267 \Rightarrow C_T = 0,6252\%$$

Finalmente, al sustituir en la expresión (1), se tiene:

$$Tp = 350 * \sqrt{0,6252 - 0,25} \Rightarrow Tp = 214,38^\circ C$$

Por lo tanto, la temperatura de precalentamiento obtenida por el método de Seferian denominada Tp_3 es:

$$Tp_3 = 214,38^\circ C$$

La temperatura de precalentamiento, denominada Tp_1 y Tp_2 será la temperatura de precalentamiento mínima recomendada por el catalogo AGA, la cual está en un intervalo entre [90-150] °C, cuyo valor a tomar será:

$$T_{p2} = 150 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad T_{p1} = 90 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Conocido todas las posibles temperaturas de precalentamiento se realizan pruebas pilotos en base a estas, para así observar el estado posterior de las probetas (con el fin de evitar posibles fundiciones del material entre otras entes) y determinar cuales temperaturas serán las mas apropiadas para el estudio en cuestión.

De aquí se obtienen las siguientes temperaturas que seran los parámetros a utilizar en los ensayos:

$$T_{p1} = 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_2 = 140 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Para el caso de las intensidades, fue tomado en cuenta las recomendadas por el fabricante de los electrodos, referida en sus catálogos.

Con los parámetros de velocidad de pasada ($v \approx 2 \text{ mm/s}$) y voltaje ($V = 30 \text{ V}$) en forma constante. Este ensayo será repetido en 3 ocasiones, para así después tomar las mejores de cada una y tener resguardo de probetas en el caso de que en algunas, se pierdan las condiciones a estudiar (grietas) al momento de ser mecanizadas.



Fig III.2. Probetas sometidas al ensayo de Vrestraint bajo las mismas condiciones de Radio (R), Temperatura (T) e Intensidad (I). (Fuente: Propia, 2009)

Esta probetas serán fijadas en un extremo en voladizo; donde, ya establecidos todos los parámetros a seguir, se procederá a realizar el cordón de soldadura para cada muestra en particular utilizando el proceso de soldadura de arco con electrodo revestido (SMAW), comenzando por el extremo libre de la probeta en dirección longitudinal hacia el extremo fijo. Cuando el electrodo recorra aproximadamente a la mitad de la probeta, estas serán dobladas bruscamente con una fuerza a flexión amoldándolas al radio de curvatura de la superficie circular removible.



Fig. III.3. Máquina para realizar ensayos de Varestraint. (Fuente: Propia, 2009)

Después de realizar la soldadura, la probeta se dejara enfriar, y el cráter formado será examinado tanto en el momento de haber sido soldada, como después de realizarse el maquinado, para evidenciar el agrietamiento en caliente de la soldadura. Cabe destacar para el caso de las probetas, que estas cuentan con un espesor de $1/8''$ y en función del espesor de la probeta, esta presentará un borde recto muy aproximado, debido a que el espesor se encuentra entre $1 < e < 4$ milímetros, donde $e = 3.175$ mm, por lo que la probeta no requiere de un chaflán de abertura. Las dimensiones de cada probeta serán las siguientes: longitud: $6 \frac{1}{2}''$, ancho $1''$ y espesor $1/8''$.



Fig. III.4. Probeta modelo, antes de ser sometida al ensayo de Varestraint. (Fuente: Propia, 2009)

III.8.4 Evaluación de las muestras

La evaluación de las muestras se realizara de la siguiente manera:

1. Se realizara el enderezado de las probetas para así continuar con su evaluación.
2. Se examinaran visualmente los cordones de soldadura para cada una de las probetas en busca de fracturas de solidificación, usando lupa o microscopio.

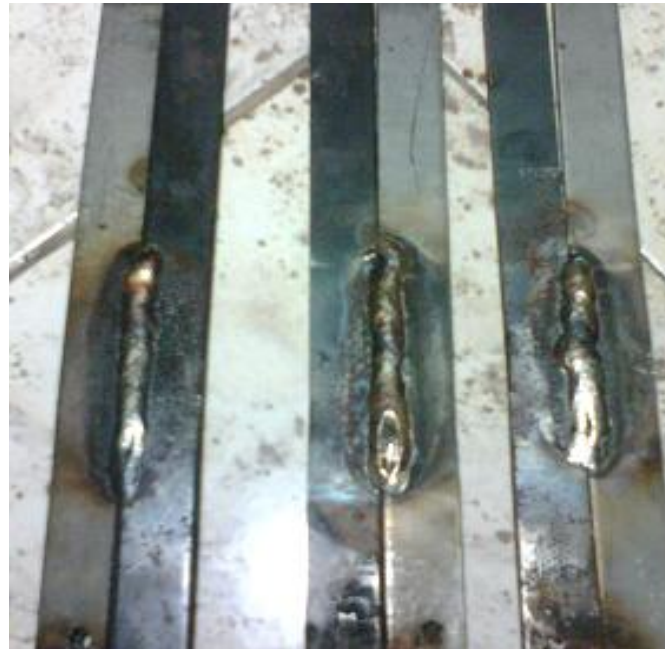


Fig. III.5. Probetas enderezadas después de realizado el ensayo. (Fuente: Propia, 2009)

3. Muestras de la probetas (específicamente cerca del área del cráter) serán tomada (alrededor de una pieza de 1 plg² de área) y mecanizadas con fresadora para su posterior pulido y visualización de la longitud y número de grietas en microscopio. Aquí se utilizara un patrón de medida para calcular la longitud de las grietas directamente de las fotos, conocido el zoom a la que esta fue tomada y con la ayuda del programa mechanical descktop, igualmente el osciloscopio.

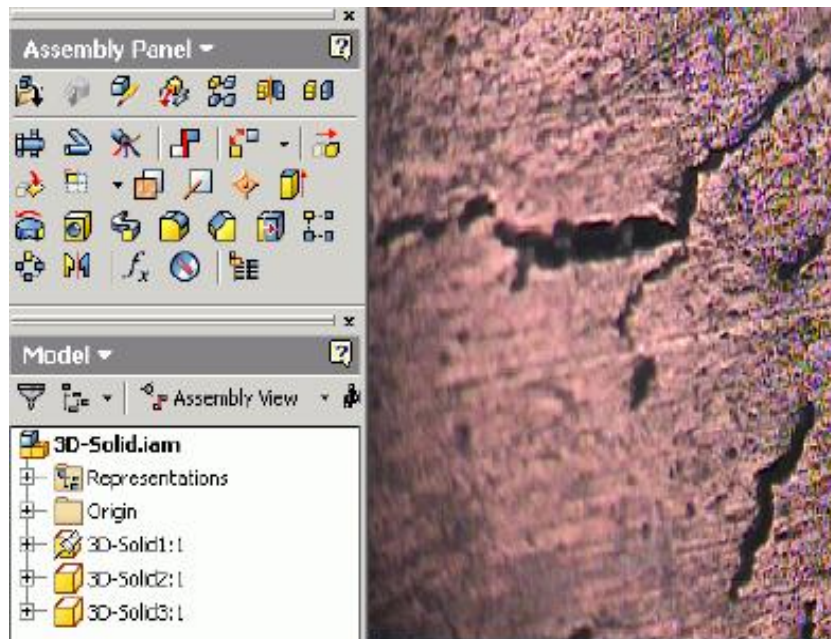


Fig. III.6 Visualización de grietas en formato jpg para posterior medida en el programa conociendo el zoom en que fue tomada la imagen, para este caso 100x. (Fuente: Propia, 2009)

4. Para la visualización de la microestructura se le realizará a las muestras pulidas, un ataque químico con un determinado reactivo de la siguiente forma:

- En el cordón de soldadura y la zona de acero inoxidable se usara agua regia en proporciones 3 a 1 (15 ml de ácido nítrico con 45 ml de ácido clorhídrico) con agua destilada.
- En la zona de acero al carbón se aplicara nital (5% de ácido nítrico en alcohol metílico).

Este análisis se hará siguiendo un procedimiento particular para la preparación de probetas, según la norma *Standard Practice for Preparation for*

Metallographic Specimens (ASTM section 3, Vol. 03.01 – E3-95), y para la revelación de la microestructura la norma *Standard Practice for Microetching Metals + Alloys (ASTM section 3, Vol. 03.01 – E407-93)*.



Fig. III.7. Probetas lijadas y pulidas. (Fuente: Propia, 2009)

Luego de realizado el ataque, se llevara al microscopio para su visualización y fotografiado de la microestructura para su posterior evaluación.



Fig. III.8. (a) Microscopio óptico modelo MITUTOYO. (b) Programa donde se visualiza la imagen obtenida por el microscopio. (Fuente: Propia, 2009)

III.8.5 Evaluación de los resultados del ensayo

Para evaluar los resultados del ensayo, se aplicaran tres criterios:

1. Limite de agrietamiento: Es el nivel de deformación o radio de la superficie circular donde comenzaran a aparecer las grietas, con unos parámetros de soldadura particulares.
2. Longitud total de las grietas: Es el promedio aritmético de la longitud de todas las grietas en un ensayo particular para un nivel de deformación específico.
3. Porcentaje de aumento de deformación: es el valor de la deformación calculado para un radio de superficie circular en particular.

Estos tres parámetros se llevaran a una gráfica que permitirá la evaluación de la sensibilidad al agrietamiento en caliente de los diferentes materiales de aportes usados en los aceros disímiles.

III.9 RECOLECCIÓN DE DATOS OBTENIDOS

III.9.1 Cuadro resumen de recolección de características y evalúo en muestras ensayadas

Para la realización de cada uno de los ensayos mencionados anteriormente, se procederá a seguir el orden de las **Tablas III.3 y III.4**, donde se expondrá toda la información de las probetas para la aplicación del ensayo de Vareststraint, con el tipo de electrodo específico y el número de muestra a la que pertenece y a estas probetas se le asignara un número único para su

marcado. Este tiene la finalidad de resumir en ella todos los resultados obtenidos de los ensayos; el siguiente se presenta a continuación:

Tabla III.3. Tabla de resumen de características y evalúo de muestras para electrodo 310 (Fuente: Propia, 2009)

Ensayo de Varestraint			
TIPO DE ELECTRODO: 310		probeta número:	probeta número:
Radio (e)	Temp de Prec/ int. cte (To) (I)	I₁ (75 A)	I₂ (100 A)
e₁ (40 mm)	To1 (100 °c)	1	17
	To2 (140 °c)	2	18
e₂ (32 mm)	To1 (100 °c)	3	19
	To2 (140 °c)	4	20
e₃ (25 mm)	To1 (100 °c)	5	21
	To2 (140 °c)	6	22

Determinación del efecto de temperatura de pre calentamiento sobre la sensibilidad al agrietamiento en caliente para cordones de soldadura en metales disímiles.

e₄ (17 mm)	To1 (100 °c)	7	23
	To2 (140 °c)	8	24

Tabla III.4. Tabla de resumen de características y evalúo de muestras para electrodo 308 (Fuente: Propia, 2009)

Ensayo de Varestraint		
TIPO DE ELECTRODO: 308	probeta número:	probeta número:

Radio (e)	Temp de Prec/ int. cte		I₁ (75 A)	I₂ (100 A)
	(To)	(I)		
e₁ (40 mm)	To1 (100 °c)		9	25
	To2 (140 °c)		10	26
e₂ (32 mm)	To1 (100 °c)		11	27
	To2 (140 °c)		12	28

Determinación del efecto de temperatura de pre calentamiento sobre la sensibilidad al agrietamiento en caliente para cordones de soldadura en metales disímiles.

e ₃ (25 mm)	To1 (100 °c)	13	29
	To2 (140 °c)	14	30
e ₄ (17 mm)	To1 (100 °c)	15	31
	To2 (140 °c)	16	32

CAPITULO IV

RESULTADOS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS

IV.1 RESULTADOS DE ENSAYO DE VARESTRAINT

Conociendo los radios de curvatura de la máquina de ensayo de Varestraint y con la ecuación de Deformación (e) expresada en porcentaje y enunciada de la siguiente forma

$$e = \frac{t}{2xR} \quad (6)$$

Se obtiene así la **Tabla IV.1** mostrada a continuación:

Tabla IV.1 Valores de deformación para cada radio de curvatura de la máquina de ensayo de Varestraint. (Fuente: Propia, 2009)

Posición i	1	2	3	4
Radio Ri (mm)	40	32	25	17
Deformación ei (%)	3,97	4,96	6,35	9,34

Con los radios de curvatura y las deformaciones correspondientes, se muestran en las tablas número **IV.2** a la **IV.5** los números y tamaños de grietas encontrados en las muestras observadas (siguiendo la numeración dada a las probetas, estandarizadas en las **Tablas III.3** y **III.4**) y para cada uno de los materiales usados; así como las condiciones ya establecidas de intensidades y temperatura de precalentamiento.

**Tabla IV.2. Número de grietas y tamaño de grietas para el electrodo AWS 310 con I = 75 A.
(Fuente: Propia, 2009)**

PROBETA	N° DE GRIETAS	LONGITUD DE GRIETAS (mm)										PROMEDIO (mm)	
1	5	3	1,5	1,3	1,67	0,9							1,675
2	4	1,8	0,6	0,8	2,5								1,42
3	7	5,1	3	1,85	3,1	2,9	2,1	0,85					2,7
4	7	3,3	3,1	2,1	1,1	1,8	0,9	3,4					2,24
5	10	3,86	2,48	3,5	3,47	2,65	3,9	2,43	3,32	2,37	3,73		3,175
6	8	5,9	1,7	1,5	2,4	2,88	2,65	3,11	2,87				2,88
7	8	3,5	4,4	3,2	3,55	3,95	3,65	3,73	3,85				3,73
8	5	2,9	4,2	3,90	4,45	2,95							3,675

**Tabla IV.3. Número de grietas y tamaño de grietas para el electrodo AWS 310 con I = 100 A.
(Fuente: Propia, 2009)**

PROBETA	N° DE GRIETAS	LONGITUD DE GRIETAS (mm)										PROMEDIO (mm)	
17	5	1,45	0,7	0,8	2,8	1,3							1,41
18	4	2,05	0,64	2,1	0,55								1,34
19	5	2,1	1,6	1,85	1,9	1,5							1,79
20	6	1,3	3,85	2,1	1,75	0,45	0,7						1,69
21	6	3,87	3,03	2,28	2,13	2,1	1,37						2,46
22	4	2,15	2,4	2,32	0,5								1,84
23	7	3,55	1,7	2,2	2,85	3,15	2,65	3,02					2,73
24	5	1,95	3,7	2,15	2,55	2,34							2,54

Tabla IV.4. Número de grietas y tamaño de grietas para el electrodo AWS 308 con I = 75 A.

PROBETA	Nº DE GRIETAS	LONGITUD DE GRIETAS (mm)										PROMEDIO (mm)
9	4	0,76	0,8	1,5	0,5							0,89
10	4	0,61	1,05	0,73	0,94							0,83
11	5	0,55	1,35	0,75	0,9	0,85						0,88
12	5	0,8	1,2	0,55	0,6	1,15						0,86
13	5	0,96	0,89	0,64	0,88	1,12						0,9
14	4	0,57	1,35	0,88	0,76							0,89
15	6	1,05	0,76	0,6	0,87	1,1	1,18					0,93
16	6	0,62	1,2	0,9	0,71	1,14	0,87					0,91

Tabla IV.5. Número de grietas y tamaño de grietas para el electrodo AWS 308 con I = 100 A.

(Fuente: Propia, 2009)

PROBETA	Nº DE GRIETAS	LONGITUD DE GRIETAS (mm)										PROMEDIO (mm)
25	4	0,34	0,81	0,83	1,12							0,775
26	4	0,73	0,48	0,79	0,56							0,64
27	4	0,89	0,78	0,93	0,57							0,79
28	4	0,9	0,5	0,56	0,85							0,7
29	3	0,82	0,73	0,91								0,82
30	3	0,92	0,58	0,64								0,71
31	5	0,95	0,3	1,02	1,17	0,73						0,83
32	5	0,85	0,81	0,57	0,66	0,78						0,73

De las **Tablas IV.2** a la **IV.5** se grafican los diferentes parámetros; todo en función de la deformación; para así realizar su posterior evaluación.

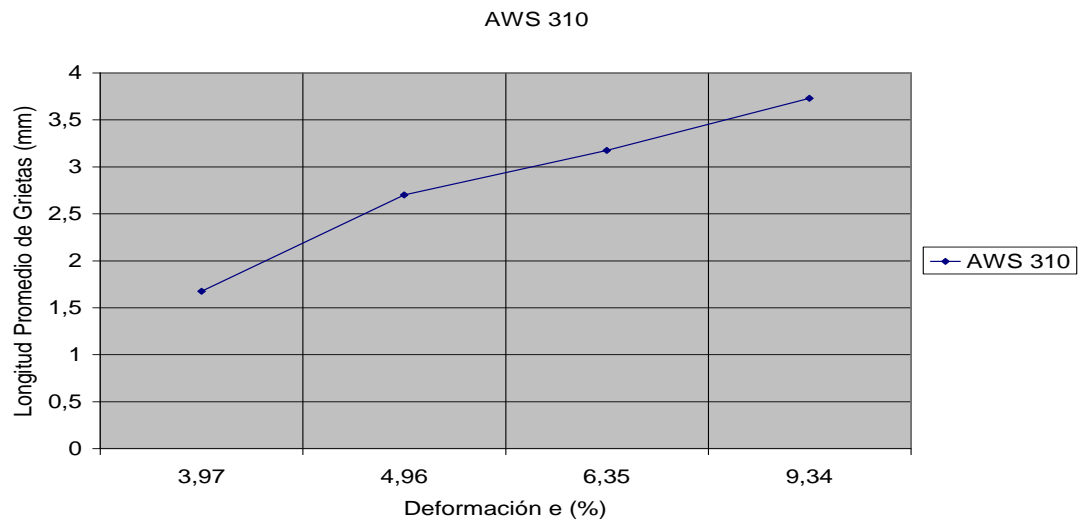


Fig. IV.1. Curva de longitud promedio de grieta presente en electrodo AWS 310 en función de la deformación para $T= 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $I = 75\text{ A}$. (Fuente: Propia, 2009)

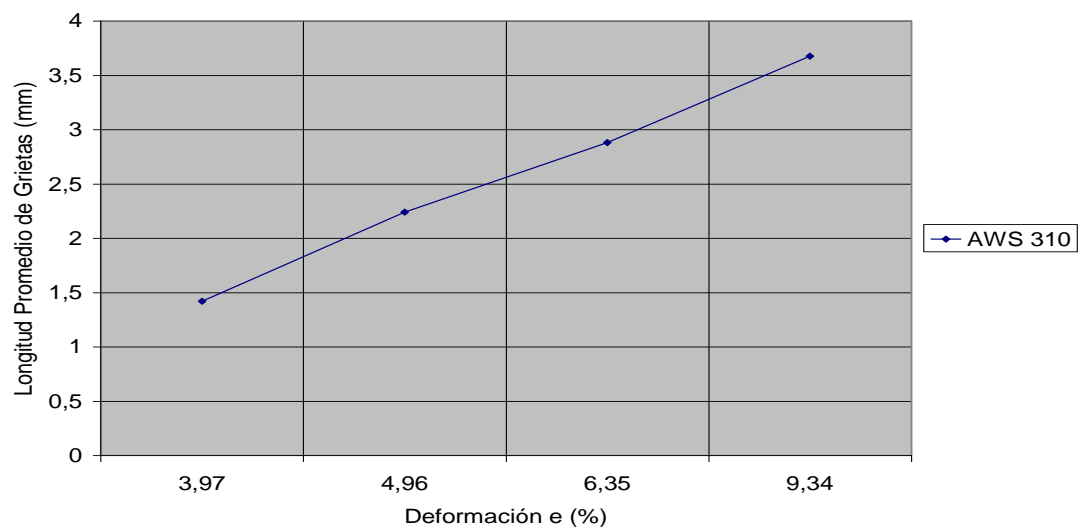


Fig. IV.2. Curva de longitud promedio de grieta presente en electrodo AWS 310 en función de la deformación para $T= 140\text{ }^{\circ}\text{C}$, $I = 75\text{ A}$. (Fuente: Propia, 2009)

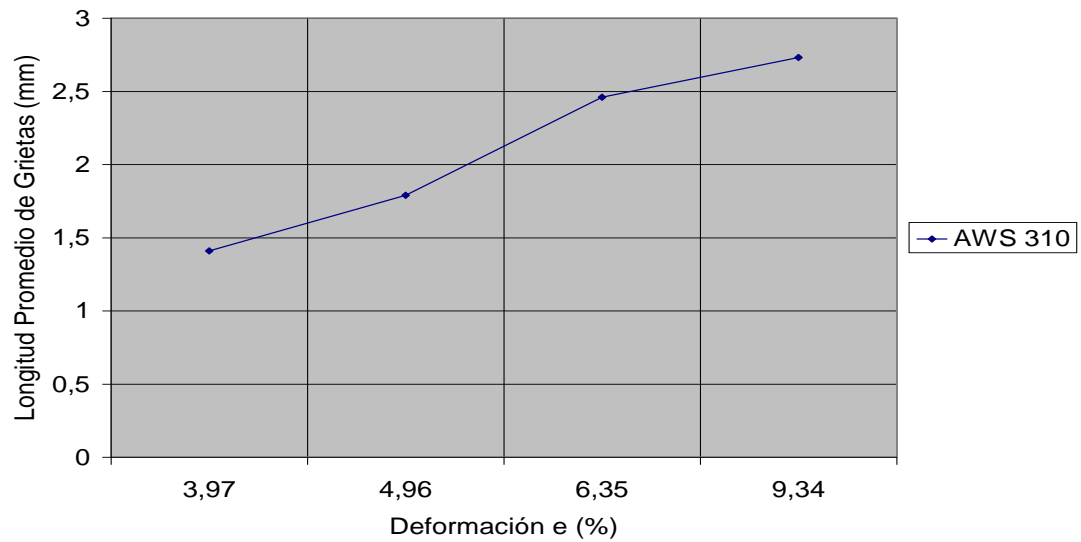


Fig. IV.3. Curva de longitud promedio de grieta presente en electrodo AWS 310 en función de la deformación para $T= 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $I = 100\text{ A}$. (Fuente: Propia, 2009)

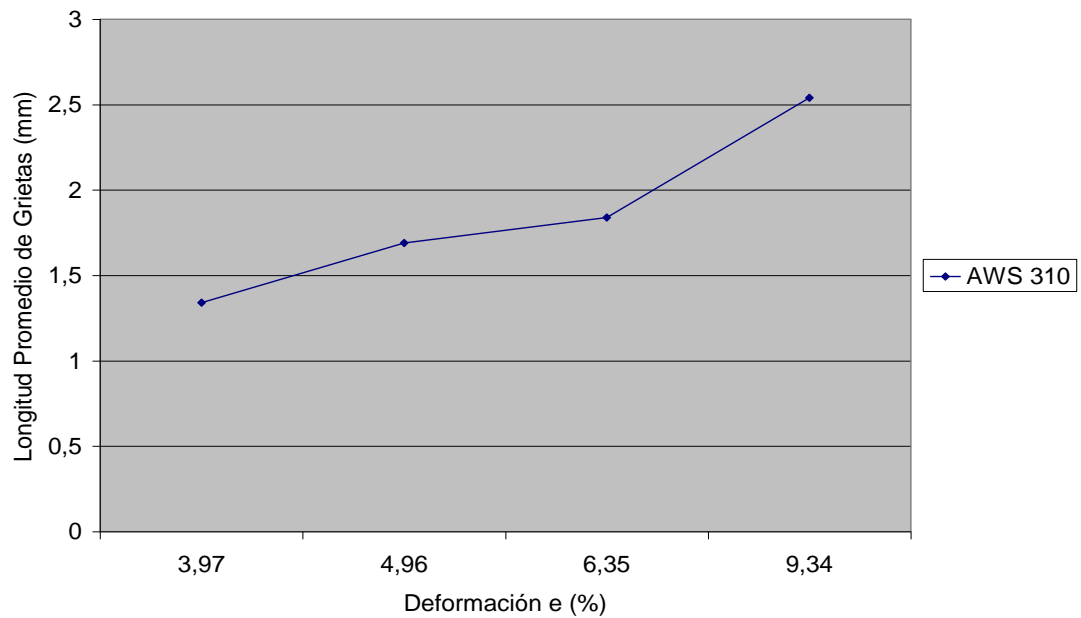


Fig. IV.4. Curva de longitud promedio de grieta presente en electrodo AWS 310 en función de la deformación para $T= 140\text{ }^{\circ}\text{C}$, $I = 100\text{ A}$. (Fuente: Propia, 2009)

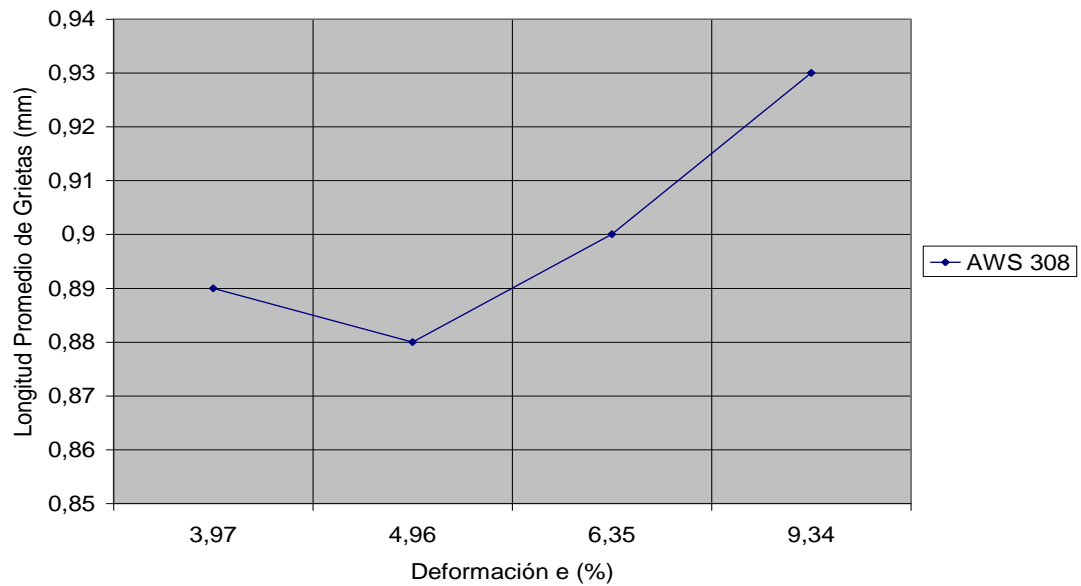


Fig. IV.5. Curva de longitud promedio de grieta presente en electrodo AWS 308 en función de la deformación para $T= 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $I = 75\text{ A}$. (Fuente: Propia, 2009)

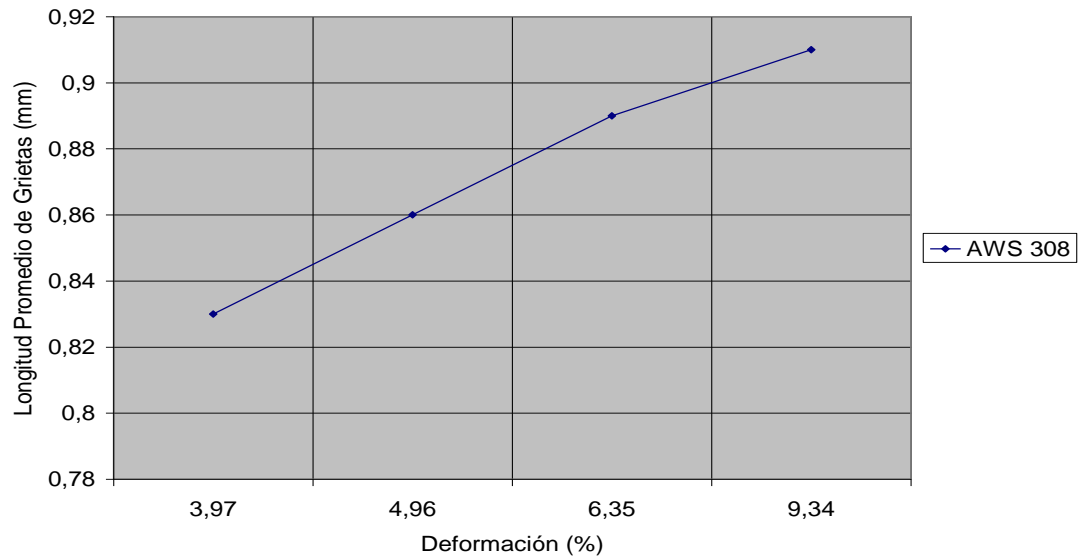


Fig. IV.6. Curva de longitud promedio de grieta presente en electrodo AWS 308 en función de la deformación para $T= 140\text{ }^{\circ}\text{C}$, $I = 75\text{ A}$. (Fuente: Propia, 2009)

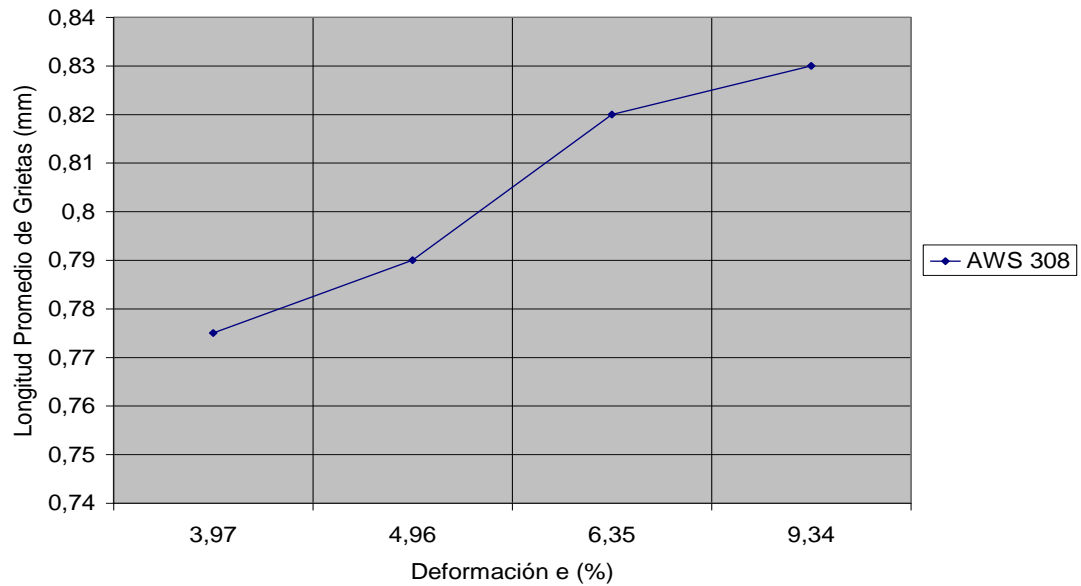


Fig. IV.7. Curva de longitud promedio de grieta presente en electrodo AWS 308 en función de la deformación para $T= 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $I = 100\text{ A}$. (Fuente: Propia, 2009)

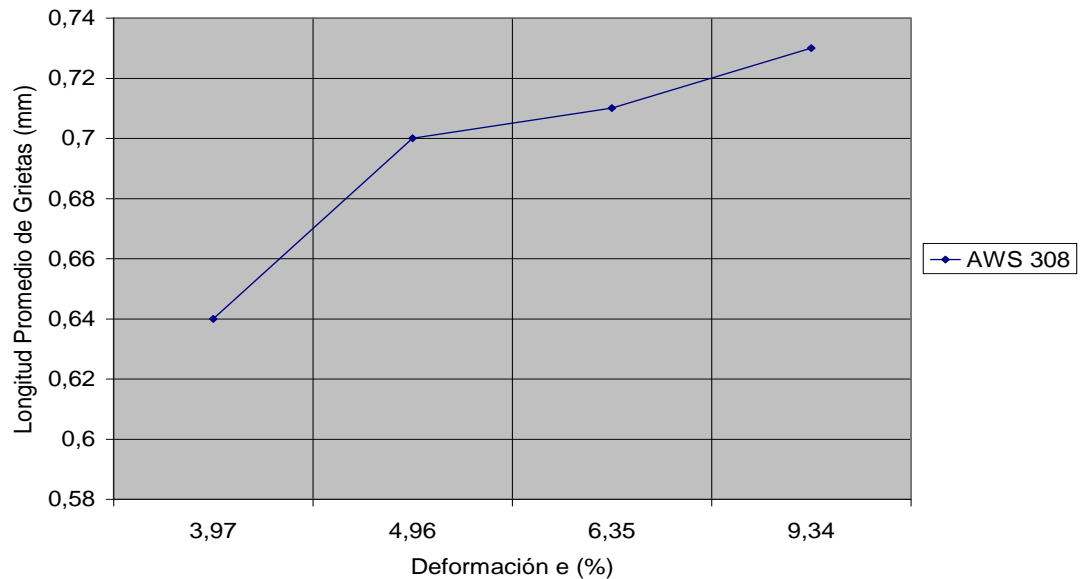


Fig. IV.8. Curva de longitud promedio de grieta presente en electrodo AWS 308 en función de la deformación para $T= 140\text{ }^{\circ}\text{C}$, $I = 100\text{ A}$. (Fuente: Propia, 2009)

Así como también las comparaciones de longitud de grietas versus la deformación; para los distintos parámetros T e I, en función de uno o ambos electrodos en estudio. Cabe destacar que en las siguientes figuras, la nomenclatura de los parámetros T e I que se usan, son los expresados anteriormente en las **Tablas III.3** y **III.4**.

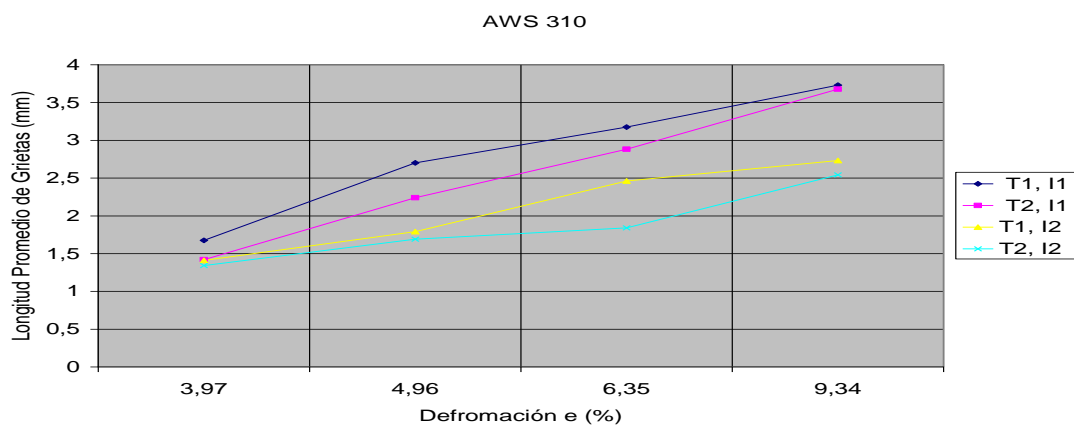


Fig. IV.9. Curva de longitud promedio de grieta presente en electrodo AWS 310 en función de la deformación para los distintos parámetros y condiciones estudiadas.

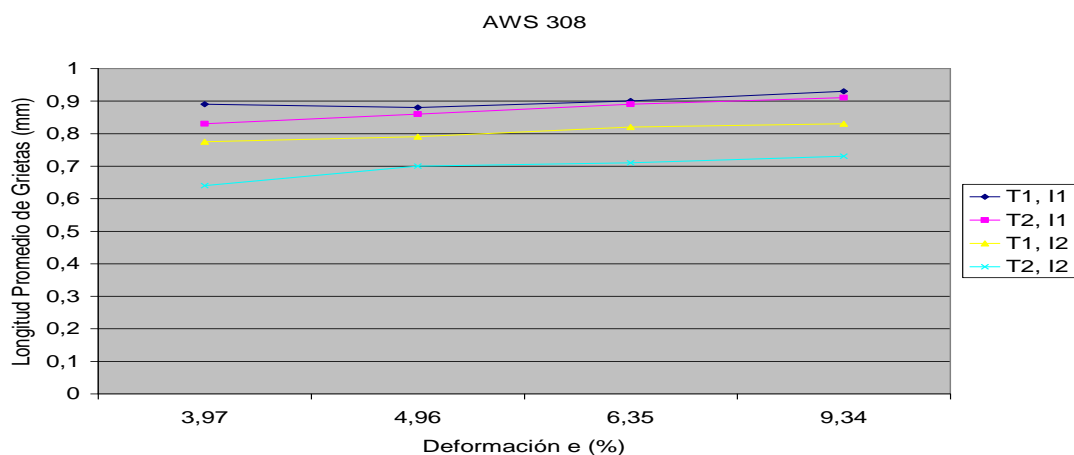


Fig. IV.10. Curva de longitud promedio de grieta presente en electrodo AWS 308 en función de la deformación para los distintos parámetros y condiciones estudiadas.

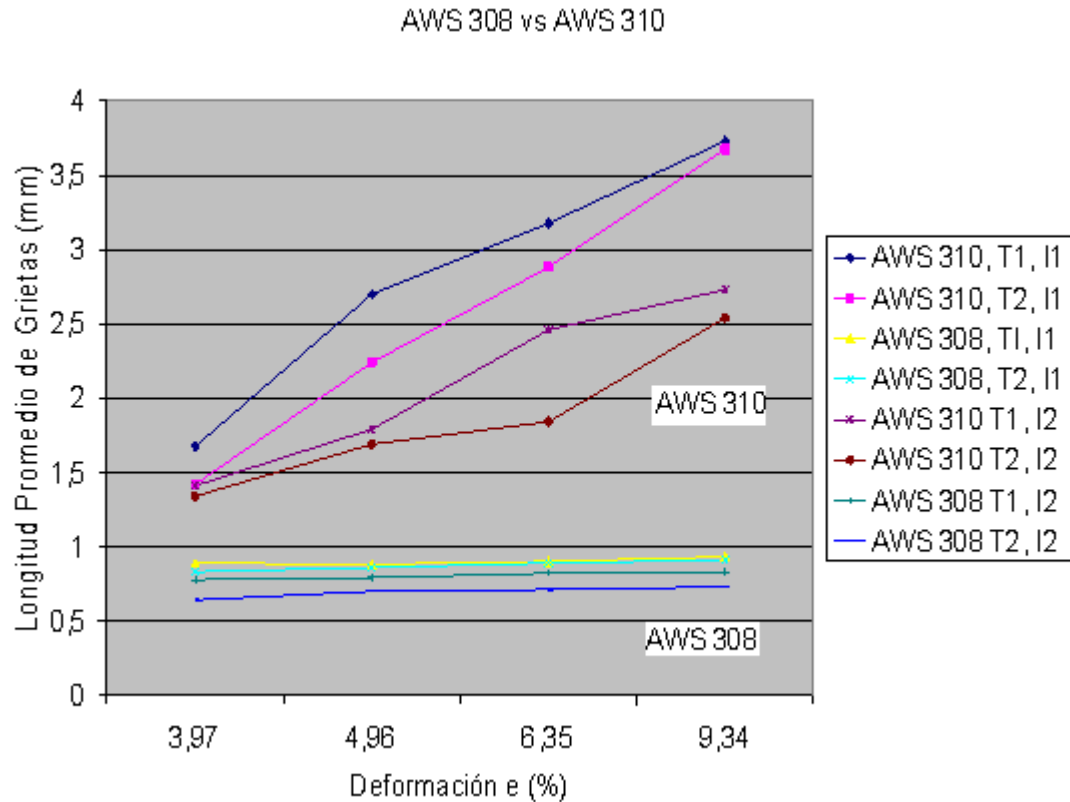


Fig. IV.11. Curva de longitud promedio de grieta presente en electrodo AWS 310 vs AWS 308 en función de la deformación para los distintos parámetros y condiciones estudiadas. (Fuente: Propia, 2009)

Con los resultados aportados por las figuras anteriores; de la **figura IV.1** a la **figura IV.11**, se puede obtener las variaciones en porcentaje de la longitud promedio de grietas presente en cada uno de los ensayos realizados, expresado así en las tablas mostradas a continuación:

Tabla IV.6. Variación en la longitud promedio de grietas (Δ LPG) al aumentar la temperatura, para electrodo AWS 310 con I = 75 A. (Fuente: Propia, 2009)

	Longitud Promedio de grieta (LPG) (mm)		Δ LPG (%)
	T1 (100 °C)	T2 (140 °C)	
			$((LPG1-LPG2) \times 100) / LPG1$
e1	1,675	1,42	15,22
e2	2,7	2,24	17,04
e3	3,175	2,88	9,29
e4	3,73	3,675	1,47

Tabla IV.7. Variación en la longitud promedio de grietas (Δ LPG) al aumentar la temperatura, para electrodo AWS 310 con I = 100 A. (Fuente: Propia, 2009)

	Longitud Promedio de grieta (LPG) (mm)		Δ LPG (%)
	T1 (100 °C)	T2 (140 °C)	
			$((LPG1-LPG2) \times 100) / LPG1$
e1	1,41	1,34	4,96
e2	1,79	1,69	5,59
e3	2,46	1,84	25,20
e4	2,73	2,54	6,96

Tabla IV.8. Variación en la longitud promedio de grietas (Δ LPG) al aumentar la temperatura, para electrodo AWS 308 con I = 75 A. (Fuente: Propia, 2009)

	Longitud Promedio de grieta (LPG) (mm)		Δ LPG (%)
	T1 (100 °C)	T2 (140 °C)	
			$((LPG1-LPG2) \times 100) / LPG1$
e1	0,89	0,83	6,74
e2	0,88	0,86	2,27
e3	0,90	0,89	1,11
e4	0,93	0,91	2,15

Tabla IV.9. Variación en la longitud promedio de grietas (ΔLPG) al aumentar la temperatura, para electrodo AWS 308 con $I = 100 \text{ A}$. (Fuente: Propia, 2009)

	Longitud Promedio de grieta (LPG) (mm)		$\Delta\text{LPG} (\%)$ $((\text{LPG1}-\text{LPG2})\times 100)/\text{LPG1}$
	T1 (100 °C)	T2 (140 °C)	
e1	0.83	0.73	12,05
e2	0,82	0,71	13,41
e3	0,79	0,70	11,39
e4	0,775	0,64	17,42

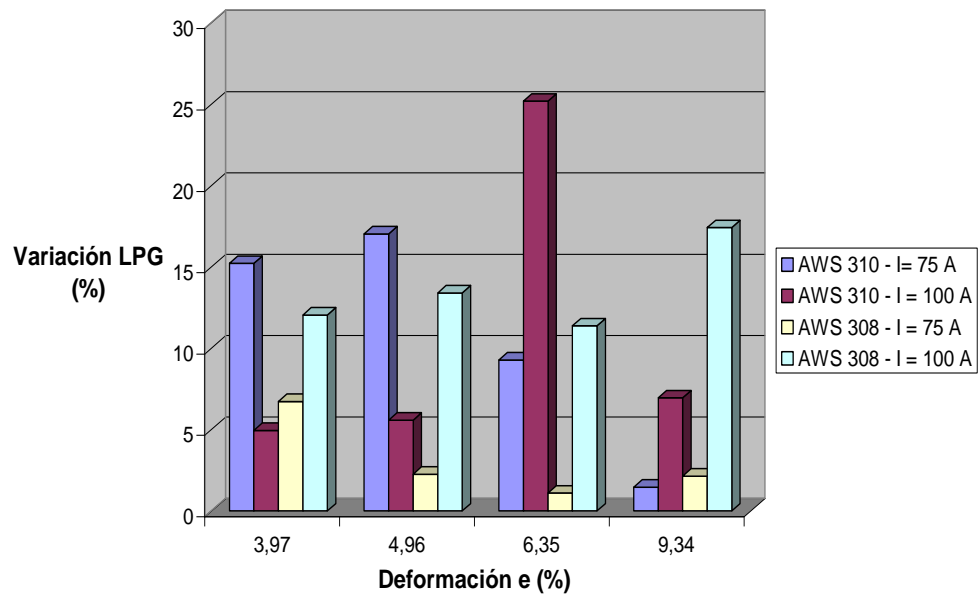


Fig. IV.12. Variación de longitud promedio de grietas (ΔLPG) al aumentar la temperatura de precalentamiento vs porcentaje de deformación e (%) para el electrodo AWS 310 y AWS 308, con distintos tipos de intensidades de corriente. (Fuente: Propia, 2009)

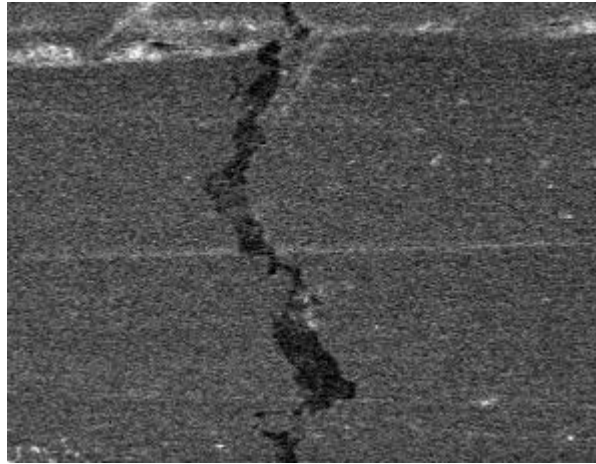


Fig. IV.13. Microscopía realizada a la muestra AWS 310 – 100x ; en condiciones de $T = 140\text{ }^{\circ}\text{C}$, $I = 100\text{ A}$. (Fuente: Propia, 2009)

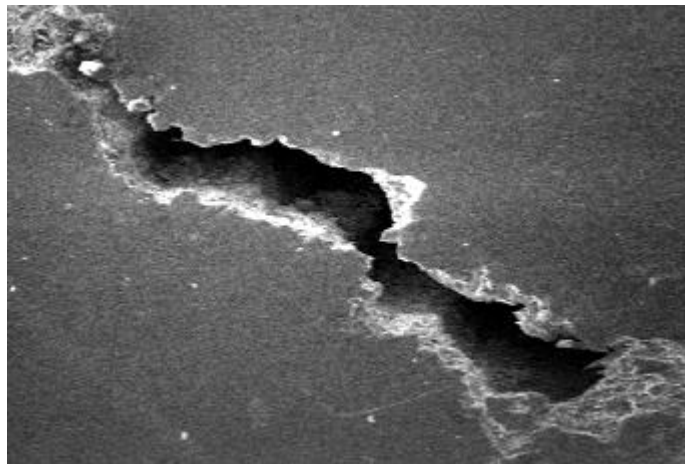


Fig. IV.14. Microscopía realizada a la muestra AWS 308 – 200x ; en condiciones de $T = 140\text{ }^{\circ}\text{C}$, $I = 75\text{ A}$. (Fuente: Propia, 2009)

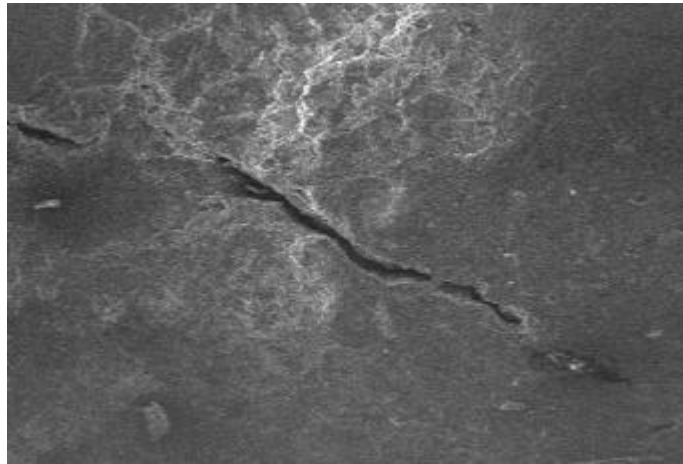


Fig. IV.15. Microscopía realizada a la muestra AWS 310 – 200x ; en condiciones de $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $I = 75\text{ A}$. (Fuente: Propia, 2009)

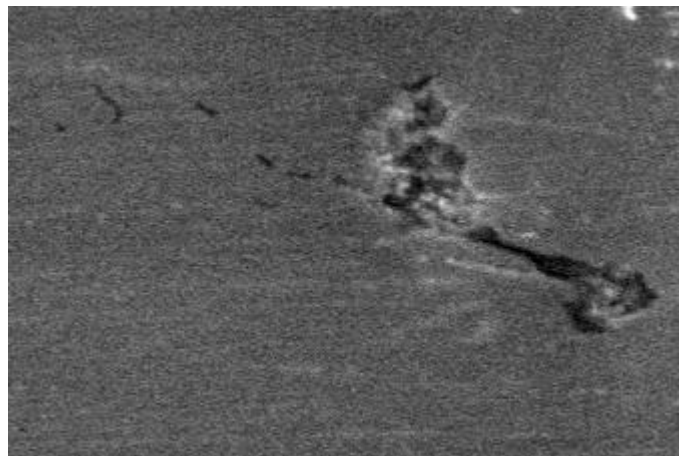


Fig. IV.16. Microscopía realizada a la muestra AWS 308 – 200x ; en condiciones de $T = 140\text{ }^{\circ}\text{C}$, $I = 100\text{ A}$. (Fuente: Propia, 2009)

IV.2 RESULTADOS DE MICROSCOPIA

Para el estudio de la microscopía en las probetas se tomaron como muestras las que arrojaron resultados mas significativos, como es mayor y menor cantidad de grietas con el fin de observar su estructura interna tanto en el cordón de soldadura como en su sección transversal (para así apreciar y evaluar las distintas zonas de la soldadura como son la zona de fusión, la zona afectada por el calor y la zona del los materiales base) y poder hallar las relaciones existentes entre la microestructura y los resultados obtenidos de sensibilidad al agrietamiento para las distintas temperaturas de precalentamiento estudiadas, así como cualquier otro tipo de comportamiento relevante.

IV.2.1 Cordón de soldadura

En acuerdo a lo mencionado anteriormente, se observaron las probetas mencionadas a las figuras siguientes, para cada uno de sus porcentajes de deformación; aunque solo se muestran las imágenes más relevantes usadas en los análisis:

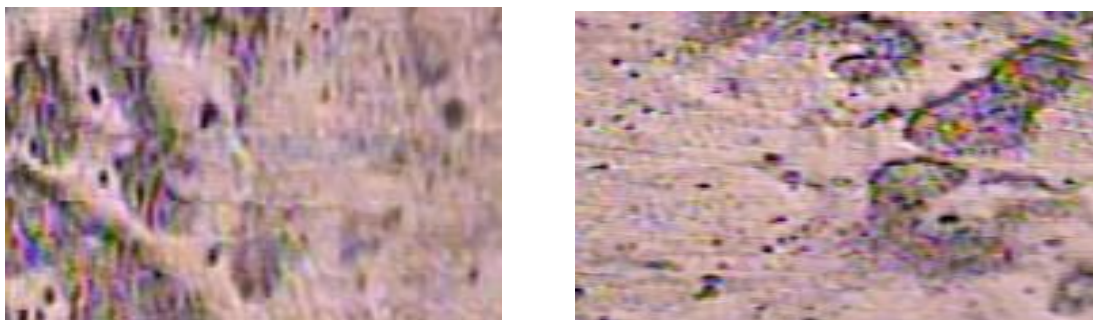


Fig.IV.17. Microscopía realizada a la muestra AWS 308 – 100X; en condiciones de T= 100 °C, I= 75 A., e = 9,34 %. (Fuente: Propia, 2009)

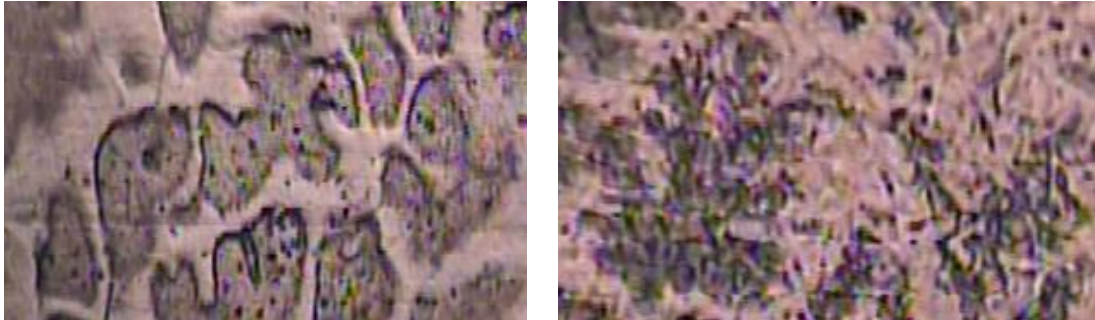


Fig.IV.18. Microscopía realizada a la muestra AWS 308 – 200X; en condiciones de $T=140\text{ }^{\circ}\text{C}$, $I=100\text{ A.}$, $e=9,34\text{ \%}$.(Fuente: Propia, 2009)

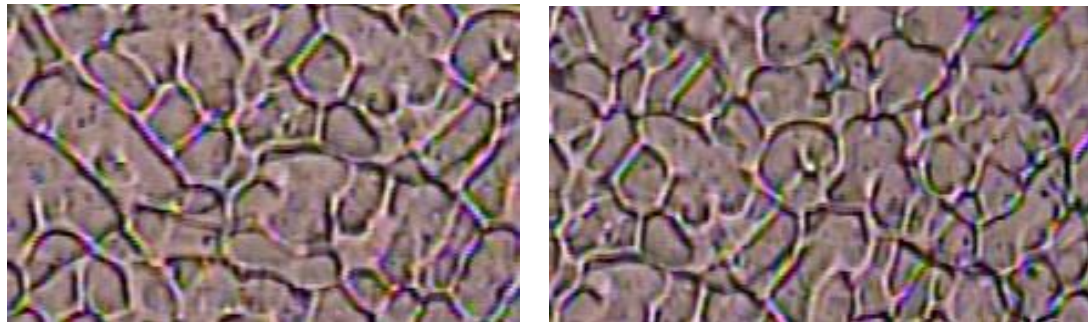


Fig.IV.19. Microscopía realizada a la muestra AWS 310 - 100X; en condiciones de $T=100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $I=75\text{ A.}$, $e=9,34\text{ \%}$.(Fuente: Propia, 2009)

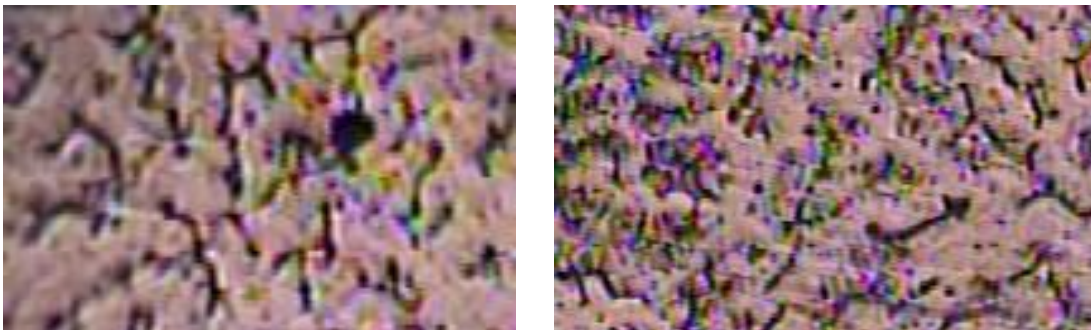


Fig.IV.20. Microscopía realizada a la muestra AWS 310 – 200X; en condiciones de $T=140\text{ }^{\circ}\text{C}$, $I=100\text{ A.}$, $e=9,34\text{ \%}$. (Fuente: Propia, 2009)

IV.2.2. Sección transversal

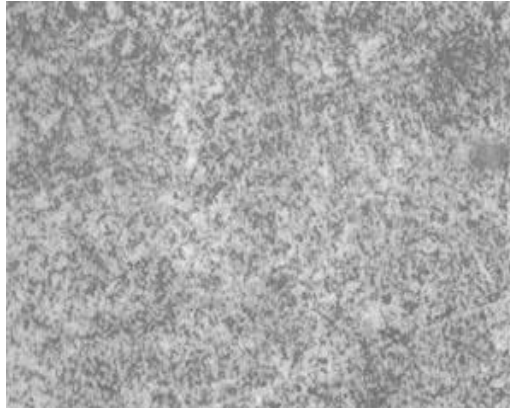


Fig.IV.21. Microscopía realizada a la muestra AWS 308; en condiciones de $T= 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $I= 75\text{ A}$, $e = 9,34\%$. Se evidencia ferrita y martensita. (Fuente: Propia, 2009)

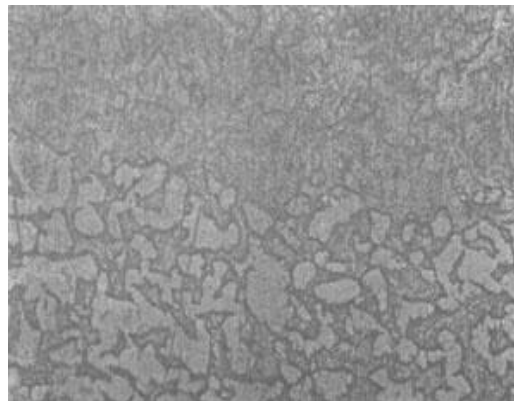


Fig.IV.22. Microscopía realizada a la muestra AWS 308; en condiciones de $T= 140\text{ }^{\circ}\text{C}$, $I= 100\text{ A}$, $e = 9,34\%$. Estructura de ferrita de morfología celular y martensita en la zona de fusión. (Fuente: Propia, 2009)

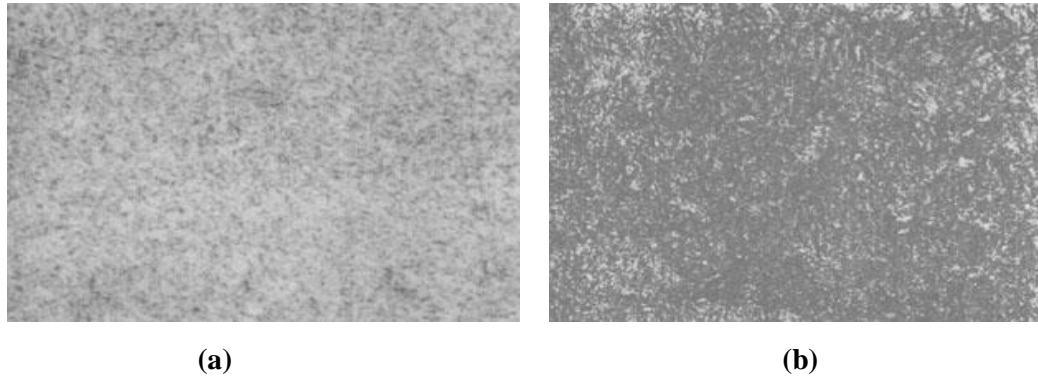


Fig.IV.23. Microscopía realizada a la muestra AWS 310; en condiciones de $T= 100\text{ }^{\circ}\text{C}$,
 $I= 75\text{ A}$, $e = 9,34\text{ \%}$. (Fuente: Propia, 2009)

- (a) Material Base, fuera de la zona afectada por el calor. Estructura, Martensita revenida. 200 X - Ataque con Nital en la zona donde se ubica acero al carbono.
(b) muestra de la soldadura a nivel transversal, estructura Martensítica.

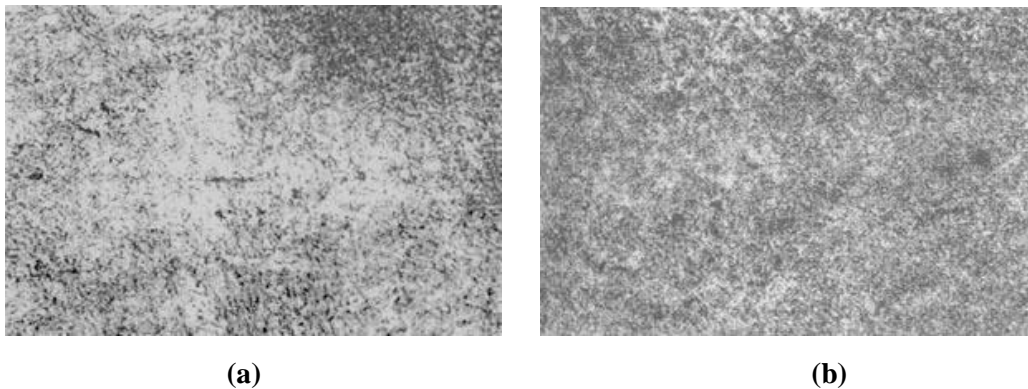


Fig.IV.24. Microscopía realizada a la muestra AWS 310; en condiciones de $T= 140\text{ }^{\circ}\text{C}$,
 $I= 100\text{ A}$, $e = 9,34\text{ \%}$. (Fuente: Propia, 2009)

- (a) Cerca a la ZAC, interfase con el metal base. Pequeños Carburos oscuros, Ferrita en una matriz de Martensita 200 X. presente en el acero al carbono 1020.
(b) Martensita revenida con lago de Austenita retenida en la zona afectada por el calor por el lado del acero inoxidable. Ataque con agua regia.

IV.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

IV.3.1 Análisis de Ensayo de Vareststraint

De acuerdo al resultado de Vareststraint, en la **figura IV.9**, la longitud promedio de grietas se hace mayor y de grandes dimensiones (en todos los porcentajes de deformación estudiados y para relaciones establecidas de temperatura e intensidad) para el material AWS 310, esto debido a la composición química de Cromo Níquel, específicamente 25Cr-20Ni; estos dos elementos se caracterizan por disminuir la formación de la ferrita, factor importante e inversamente proporcional al agrietamiento en los materiales, de aquí que este material es considerado un acero austenítico refractario. El níquel y el cromo afectan al material a partir de un 12 % y 25% de su composición; ya que dan al material un carácter más austenítico y por ende propiedades insuficientes para su trabajo en caliente (como es el caso de la soldadura con o sin precalentamiento).

Como reflejan las **figuras IV.1** y **IV.2**, así como en la **tabla IV.6** referentes al electrodo AWS 310; al incrementar la temperatura de precalentamiento (con una intensidad de 75 A) el agrietamiento tiene una disminución de aproximadamente un 14 % para las deformaciones (e) 1, 2 y 3 (tomando referencia para las deformaciones la **tabla IV.1**); no así para la deformación (e) 4 la cual dio una disminución de un 1,47 %, ya que aquí al variar la temperatura, se mantiene el promedio de grieta (y por consecuencia, un cambio de pendiente en la gráfica de la **figura VI.1**) respecto a las deformaciones anteriores. En las **figuras IV.3** y **IV.4** y la **tabla IV.7** del

mismo electrodo pero con otro parámetro (intensidad de 100 A), se denotan reducciones en el porcentaje de las deformaciones (e) 1, 2, y 4 equivalente a un 6 %; en la deformación (e) 3 se tiene una diferencia porcentual de 25,20 %, ya que ambas graficas presentan un cambio brusco en su pendiente (producto de la relación longitud de grieta – deformación), la referida a la T1 (T = 100 °C) aumenta la longitud de grietas; caso contrario a T2 (T = 140 °C) la cual disminuye.

De la grafica expuesta en la **figura IV.9** se refleja que al incrementar la intensidad y realizar cambio de la temperatura de precalentamiento (aumentando esta temperatura), la sensibilidad al agrietamiento se va reduciendo en el material al ir disminuyendo la longitud de grietas presentes para las deformaciones evaluadas. Así también se puede observar que esta reducción se va haciendo menos significante; es decir, el efecto producido por el aumento de los parámetros T e I van perdiendo el efecto sobre la sensibilidad al agrietamiento, esto se deduce al detallar que para la I1 (en ambas temperaturas evaluadas) como se expreso hay una disminución de aproximadamente un 14 %; no así en el caso de la I2 (igualmente para ambas temperaturas), la cual solo hubo una disminución de un 6 %, obteniendo así un gradiente de 8 % por una variación de temperatura de 40 °C.

De la **figura IV.10** se tiene que la longitud promedio de grietas para todos los estudios realizados con el material base AWS 308 no superan el (1) milímetro de longitud, dado primordialmente a las características de este material con una composición química de 19 % de Cromo y 10 % de Níquel (19Cr-10Ni) este ultimo uno de los principales causantes que la ferrita se

pueda desarrollar en la microestructura y por ende tener un material con menor sensibilidad al agrietamiento y mejores propiedades para su trabajo en caliente.

En referencia a la sensibilidad al agrietamiento, **las figuras IV.5 y IV.6** y la **tabla IV.8** (variando la temperatura de precalentamiento con Intensidad constante de 75 A al electrodo AWS 308; al incrementar la temperatura de precalentamiento se evidencia una disminución de la longitud de grietas en el cordón de soldadura en referencia a todas las deformaciones (e) ensayadas (deformaciones referidas a la **tabla IV.1**) de 3,07 %, denotándose que en el caso de la deformación (e) 1 se evidencio una variación de un 6,74 % debido a que con una temperatura de precalentamiento de 140 °C se obtuvo mejores resultados en comparación a las otras en estudio. Al variar el parámetro de intensidad en 100 A y realizar las mismas evaluaciones, se obtuvo las graficas presentadas en las **figuras IV.7 y IV.8 y la tabla IV.9** donde para todas las deformaciones se evidencio una variación en el porcentaje de deformación (al incrementar la temperatura de precalentamiento) de un equivalente al 14 % de disminución el la longitud promedio de grietas.

En la **figura IV.10** se evidencia que al incrementar la intensidad y así mismo aumentar la temperatura de precalentamiento, la sensibilidad al agrietamiento se va reduciendo en el material al ir disminuyendo la longitud de grietas presentes para las deformaciones evaluadas. Igualmente se puede observar que esta reducción se va haciendo mas pronunciada; es decir, el efecto producido por el aumento de los parámetros T e I van aumentando el efecto sobre la sensibilidad al agrietamiento, esto se deduce al detallar que para la I1 (en ambas temperaturas evaluadas) como se expreso hay una disminución

de apenas de un 3,07 %; no así en el caso de la I2 (igualmente para ambas temperaturas), la cual hubo una disminución de un 13,56 %, obteniendo así un gradiente de 10,49 % (respecto a la sensibilidad al agrietamiento) por una variación de temperatura de 40 °C.

Al realizar comparaciones entre el electrodo AWS 310 y AWS 308 evaluados en las mismas condiciones, tal como se visualiza en la **figura IV.11** y **IV.12** se deduce que el electrodo AWS 308 tiene un mejor comportamiento respecto a la sensibilidad al agrietamiento ya que este material al estar en mayor presencia de temperatura (producto del precalentamiento y de la misma intensidad de corriente) tiende a reducir las longitudes de grietas (evaluadas en longitud promedio de grieta) en el orden de los 13,56 % y con tendencia a aumentar este porcentaje si se llegase a aumentar estas temperaturas; no así el electrodo AWS 310 que solo alcanzo a reducir su sensibilidad al agrietamiento en un orden de 5,83 % y apreciándose claramente que esta tendencia disminuye a medida que se incrementan las temperaturas. Igualmente se aprecia una diferencia significativa en el tamaño de la grieta, donde para el electrodo AWS 310 se encuentra en las denominadas grietas visibles, no así el caso del electrodo AWS 308 que esta bajo la denominación de micro grietas (según expresa Daniel Seferian en el texto metalurgia de la soldadura), siendo el AWS 310 mas propenso a afecciones en la soldadura producto de estas grietas como puede ser la corrosión.

IV.3.2 Análisis de microscopía

Considerando que la unión de aceros disímiles como este caso de un acero ferrítico con acero menos rico (referido a los dos materiales bases y el material austenítico de aporte), dan lugar a estructuras intermedias más agrietables debido a la alta formación de martensita; es de valorar, que al observar la zona fundida para las probetas donde se utilizó como material de aporte el electrodo AWS 308 como son los casos presentados en las **figuras IV.17** y **IV.18** se visualiza principalmente una estructura de ferrita y martensita, observándose la ferrita en morfología celular (estructura oscura) y en mayor cantidad respecto a la martensita; igualmente se puede apreciar la existencia de carburos gruesos cuando hay aumentos en la temperatura de precalentamiento, lo que le da una estructura más resistente al agrietamiento. Estas características le dan a la soldadura la capacidad de ser menos sensible al agrietamiento y adecuarse de buena manera a temperaturas de precalentamientos, donde su estructura se modifica disminuyendo considerablemente la cantidad a esperarse de martensita en la estructura.

Al observar las probetas soldadas con electrodos AWS 310 se evidencian en ella, una estructura formada por martensita y/o austenita mayormente con ciertas apariciones de ferrita con estructura dendrítica (caracterización basada en lo descrito por Daniel Seferian en metalurgia de la soldadura) como se llegan a apreciar en la **figura IV.19** y **figura IV.20**. Estos granos austeníticos se caracterizan por su aumento de tamaño en función del incremento de la temperatura de precalentamiento; así mismo se llegan a apreciar carburos de cromo muy finos (en formas de hilos) a los bordes de

granos austeníticos al incrementar la temperatura de precalentamiento, que aunque le da una tendencia a evitar el agrietamiento no es tan influyente como el caso de carburos gruesos; con estas características el acero no logra disminuir en un amplio margen la longitud de grietas presente, manteniéndose en ellas grietas visibles y por ende propiedades insuficientes para su trabajo en caliente.

Características similares a las descritas anteriormente se pueden evidenciar en las secciones transversales de las probetas tal como se muestran en las **figuras IV.21, IV.22, IV.23 y IV.24**; donde para las probetas trabajadas con electrodos AWS 310 se evidencia gran cantidad de martensita, a diferencia de las ensayadas con AWS 308, donde se caracteriza una estructura compuesta de ferrita.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Mediante el ensayo de Varestraint se determinó que el material de aporte AWS 310 es más susceptible al agrietamiento en caliente que el AWS 308 para soldadura en metales disímiles, específicamente el acero inoxidable AISI 304 y SAE 1020. Así mismo, se puede concluir que este material de aporte AWS 310 no es un buen material de trabajo en caliente.

Con el ensayo de Varestraint, se obtuvo que el material de aporte AWS 308 presentó el menor porcentaje de agrietamiento en función a todos los parámetros estudiados.

En ambos materiales de aporte se evidenció que a mayor temperatura de precalentamiento, así como el incremento en la intensidad de corriente, genera en la soldadura una disminución al agrietamiento.

La longitud promedio de grietas para el material de aporte AWS 308 no superan los 0,91 mm. En el caso del electrodo AWS 310 están en el orden de los 1,34 mm a los 3,73 mm.

La variación en la disminución de agrietamiento en el cordón de soldadura AWS 310 al variar la temperatura de precalentamiento, se pronunció más para una intensidad de 75 A, disminuyendo este gradiente al aumentar

dicha intensidad. Para el electrodo AWS 308 por el contrario el gradiente de disminución de agrietamiento se pronuncio más a medida que se incremento la intensidad de corriente.

Con el estudio de la microscopía se determino que a medida que disminuye la cantidad de ferrita en la estructura, las soldaduras se hacen más susceptibles a formar grietas y/o micro grietas.

Con la microscopía se pudo determinar que los aceros con partículas de carburo grande como el caso del AWS 308, se agrietan con menos facilidad que los que tienen carburos finos.

Con el estudio microscópico se pudo evidenciar que para el electrodo AWS 310, el tamaño de grano de austenita fue mayor en el caso en que el tiempo de la temperatura de enfriamiento era mayor y viceversa, evidenciándose que a mayor temperatura de precalentamiento había un mayor tiempo para la nucleación y crecimiento de los granos de austenita.

RECOMENDACIONES

Se recomienda este estudio en electrodos y materiales disímiles de mayores diámetros y espesor respectivamente, con el fin de estudiar el comportamiento de la sensibilidad al agrietamiento con tensiones elevadas provocadas por tener espesores grandes.

Este estudio de Vareststraint, se recomienda en otro tipo de aceros disímiles con el fin de aportar nueva información respecto a la sensibilidad al agrietamiento en caliente.

Se exhorta el uso del programa Mechanical Decktop para la medición de las longitudes de grietas, así como la implantación de este programa en los laboratorios de la Escuela de Mecánica de la facultad de Ingeniería en la Universidad de Carabobo.

En la preparación de las probetas soldadas se recomienda, mecanizar sólo con fresadora para permitir la visualización con mayor precisión de las posibles grietas y/o fisuras y así obtener los resultados deseados.

Para el ensayo de Vareststraint en probetas precalentadas, es necesario medir temperaturas en tiempo corto y con la mayor exactitud posible, por lo que se recomienda la dotación de equipos de medición de temperatura láser, así como mascara especiales para los gases que se expanden al soldar.



Determinación del efecto de temperatura de pre calentamiento sobre la sensibilidad al agrietamiento en caliente para cordones de soldadura en metales disímiles.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Lippold J.C. (1982). *Weld Cracking Mechanisms in Austenitic Stainless Steels*. Conference on trends in welding research in the US. Sandia National Labs. Technical Report. US.
- Martínez J. y Ruiz H. (1.997). *Evaluación de la Fisuración en Caliente en el Metal Base Soldado en Aceros Inoxidables Austeníticos*. Trabajo de grado no publicado, Universidad de Carabobo, Valencia.
- Caraballo D y Peña I. (1.999). *Evaluación de la Sensibilidad al Agrietamiento en Aceros Inoxidables con Diferentes Métodos de Soldabilidad*. Trabajo de grado no publicado, Universidad de Carabobo, Valencia.
- Pérez R. (2.004). *Aplicación del Ensayo de Doblez y Ensayo de Varestraint para determinar la fisuración en Soldaduras de Acero Inoxidable AWS 309L, AWS 316L Y AWS 347*. Trabajo de grado no publicado, Universidad de Carabobo, Valencia.
- Asta E. et al. (2003). *Efecto de la Temperatura de Precalentamiento en la Soldabilidad de un Acero ASTM A514 Gr B*. Congreso Nacional de Metalurgia. Sociedad Argentina de Metalurgia. pp 93 – 96. Buenos Aires. Argentina.
- Tamaki K. et al. (2002). *Effects of Carbon Content and Peritectic Reaction on Hot Cracking of High Carbon Steel Weld Metal*. Welding International. Volume 11. pp 26 – 35. Japan.
- Shankar V. et al (2000). *Criteria for Hot Cracking Evaluation in Austenitic Stainless Steel Welds Using Longitudinal Varestraint and Transvarestraint tests*. Science and Technology of Welding & Joining. Volume 5. Number 2. pp. 91-97. US.
- Abdulhamid S. et al (2002). *Effect of Preheating on Hot Cracking Susceptibility of Welded Austenitic Stainless Steels*. 6th Saudi Engineering Conference. Vol. 5. pp. 243 – 256. Dhahran. Saudi Arabia.



Determinación del efecto de temperatura de pre calentamiento sobre la sensibilidad al agrietamiento en caliente para cordones de soldadura en metales disímiles.

- Quesada, M Zalazar (2002). *Métodos para calcular el precalentamiento de uniones soldadas*. Cuaderno Facultad No. 13.
- Seferian, Daniel (1979). *Metalurgia de la Soldadura*.