



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Estudio del efecto que produce el recubrimiento de un electrodo en
la generación de esfuerzos mecánicos en soldaduras.

María Ojeda

Viviana Ojeda

Naguanagua, 3 de Noviembre de 2010



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Estudio del efecto que produce el recubrimiento de un electrodo en la generación de esfuerzos mecánicos en soldaduras.

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

Tutor académico:

MSc. Ing. Edwin Peña

Autores:

María Ojeda

Viviana Ojeda

Naguanagua, 3 de Noviembre de 2010



UNIVERSIDAD DE CARABOBO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Estudio del efecto que produce el recubrimiento de un electrodo en la generación de esfuerzos mecánicos en soldaduras.

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

María Ojeda.

Viviana Ojeda.

Naguanagua, 3 de Noviembre de 2010



UNIVERSIDAD DE CARABOBO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Quienes suscriben, Miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para examinar la Tesis de Pregrado titulada **“Estudio del efecto que produce el recubrimiento de un electrodo en la generación de esfuerzos mecánicos en soldaduras.”**, presentada por las bachilleres: **María Ojeda, Viviana Ojeda**, portadoras de la Cédula de Identidad N°: **18.411.333, 19.799.218**, respectivamente; hacemos constar que hemos revisado y aprobado el mencionado trabajo.

Prof. Edwin Peña.

Presidente del jurado

Prof. Carmelo Torres.

Miembro del jurado

Prof. Franklin Camejo.

Miembro del jurado

En Naguanagua a los 3 días del mes de Noviembre de 2010

Agradecimientos

Éste trabajo especial de grado, si bien ha requerido de esfuerzo y mucha dedicación por parte de las autoras y su tutor de tesis; no hubiese sido posible su finalización sin la cooperación desinteresada de todas y cada una de las personas que a continuación citaremos y muchas de las cuales han sido un soporte muy fuerte en momentos de angustia, desesperación y buenos momentos.

Primero y antes que nada, daremos gracias a **Dios**, por estar con nosotras en cada paso que damos, por fortalecer nuestro corazón e iluminar nuestra mente y por haber puesto en nuestro camino a aquellas personas que han sido soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

Agradecer hoy y siempre a nuestra familia por estar presentes siempre con nosotras, por preocuparse por nuestro bienestar, y está claro que si no fuese por el esfuerzo realizado por ellos, nuestro estudio universitario no hubiese sido posible.

A nuestros padres, abuela, hermanas y hermanos por el ánimo, apoyo y alegría que nos brindan, nos dan la fortaleza necesaria para seguir adelante.

De igual manera nuestro más sincero agradecimiento a todo el personal de la escuela, tanto de la Facultad de ingeniería, como de secretaría general, dirección, administración, biblioteca y al personal obrero; ya que dentro de los ámbitos que a cada uno le competen nos han colaborado sin ningún impedimento, al contrario, nos

han brindado siempre su apoyo. A nuestros compañeros de estudio de ingeniería mecánica y a los que hoy ya son ingenieros, por todo el ánimo, toda la paciencia, por confiar y creer en nosotras, por ser como hermanos y sobre todo por su valiosa amistad, con los que compartimos las mismas experiencias y nos ponemos el hombro cada vez que se necesita, por su apoyo y ánimo en cada etapa que se pasa y viene a lo largo de estos años de estudio.

En general quisiéramos agradecer a todas y cada una de las personas que han vivido con nosotras la realización de éste trabajo especial de grado, con sus altos y bajos y que no necesitamos nombrar porque tanto ellas como nosotras sabemos que desde lo más profundo de nuestro corazón les agradecemos el habernos brindado todo el apoyo, colaboración, ánimo y sobre todo cariño y amistad.

Introducción

La mayoría de los elementos de máquinas presentan en su proceso de fabricación la soldadura, debido a los distintos detalles geométricos que poseen. Estos generalmente son soldados mediante un proceso de soldadura por arco manual con electrodo revestido, debido a su sencillez, simplicidad y bajo costo. Sin embargo, se ha observado que las propiedades mecánicas de los materiales empleados en la construcción de dichos elementos cambian durante el proceso; generándose esfuerzos mecánicos que afectan de manera significativa los niveles de confiabilidad y durabilidad de las piezas producidas.

Diferentes factores se han identificado en la aparición de esfuerzos mecánicos, tales como la temperatura máxima alcanzada, tiempo de enfriamiento, material del cordón de soldadura, velocidad de aplicación del cordón de soldadura; no obstante, persiste una notoria diferencia entre los modelos teóricos de cálculo de esfuerzos y la experiencia práctica en diferentes ensayos de distinta naturaleza: con lo cual, al diseñar se parte de suposiciones que en muchos casos dirigen a un sobre dimensionamiento para mitigar el efecto de la carencia de confiabilidad.

Se conoce en la actualidad una gran variedad de electrodos con distintos recubrimientos que varían la composición del cordón de soldadura haciéndolo apto para las necesidades requeridas; pero no se conoce con exactitud los esfuerzos mecánicos que éstos generan en dicho cordón.

En el presente trabajo de investigación se pretende determinar la magnitud de esos esfuerzos mecánicos mediante la realización de ensayos de tracción a probetas estandarizadas estudiando la soldadura a tope de un acero estructural soldado con un proceso SMAW. Dicho ensayo se realizará mediante un procedimiento experimental con

tres grupos de probetas soldadas con electrodos de recubrimientos diferentes manteniendo los demás parámetros involucrados constantes, tomando en cuenta para cada uno de ellos dos tipos de probetas: una testigo y otra no testigo.

Aunque se conoce que los cordones de soldadura en la realidad no sólo están sometidos a cargas de tracción, son tomadas en cuenta en esta investigación debido a que estadísticamente está demostrado que dichas cargas son la mayor causa de falla de los distintos elementos de máquinas.

A continuación se presenta un procedimiento simple para la determinación de los esfuerzos mecánicos generados en un cordón de soldadura.

Resumen

En el presente trabajo de investigación se realiza con el fin de determinar la magnitud de los esfuerzos mecánicos en soldaduras a tope del acero ASTM – A36 a causa de la variación en la composición del recubrimiento en un proceso de soldadura con electrodo revestido (SMAW). Para la determinación de los esfuerzos residuales se consideró como estudio los recubrimientos de tipo celulósico, rutílico y básico; para cuantificar dichos esfuerzos se realizó un ensayo de tracción con galgas extensométricas, y para dar validez al estudio mediante la microdureza del material base se realiza un procedimiento en el cual se utiliza una relación matemática entre dureza y esfuerzo de fluencia. Esto se apoya en la teoría de Masubuchi K. para determinar esfuerzos residuales, además de realizar un análisis metalográfico y macroscópico, donde luego de experimentar con los tres grupos de probetas con los diferentes tipos de recubrimientos se logró cuantificar los esfuerzos de cada uno de ellos para luego poder compararlos, determinar que tipo de recubrimiento genera mayores esfuerzos residuales y la diferencia en magnitud entre cada uno de ellos, con los resultados obtenidos se llegó a la conclusión que el tipo de recubrimiento del electrodo utilizado en una junta soldada juega un papel muy importante en la generación de esfuerzos.

Índice general

Índice general	i
Índice de figuras	ix
Índice de tablas	xi
CAPÍTULO 1 Introducción	1
1.1 Planteamiento del problema, 1	
1.2 Objetivos, 2	
<i>1.2.1 Objetivo General, 2</i>	
<i>1.2.2 Objetivos Específicos, 2</i>	
1.3 Justificación, 2	
1.4 Alcance, 3	
1.5 Limitaciones, 3	
1.6 Antecedentes, 4	

CAPÍTULO 2	Marco Teórico	7
2.1	Soldadura,7	
2.2	Arco eléctrico,9	
2.2.1.	<i>Circuito Eléctrico,9</i>	
2.2.2.	<i>Circuito de soldadura por Arco eléctrico,9</i>	
2.2.3.	<i>Clases de corriente eléctrica,10</i>	
2.2.3.1	<i>Corriente alterna (CA),10</i>	
2.2.3.2	<i>Corriente continua (CC),10</i>	
2.2.4.	<i>Polaridad,10</i>	
2.2.5.	<i>Fallas que se pueden presentar en la soldadura,11</i>	
2.2.5.1.	<i>Grietas en la línea central,11</i>	
2.2.5.2.	<i>Fractura en la zona de calor (ZAC),12</i>	
2.2.5.3.	<i>Fractura transversal,12</i>	
2.2.6.	<i>Unión por Soldadura,13</i>	
2.2.6.1	<i>Unión a tope,13</i>	
2.2.6.2	<i>Unión a tope Unión de esquina,14</i>	
2.2.6.3	<i>Unión traslape,14</i>	
2.2.6.4	<i>Unión de bordes.,14</i>	
2.2.6.5	<i>Unión en T,14</i>	
2.3	Definición de Electrodo,14	
2.3.1.	<i>Electrodos revestidos,15</i>	
2.3.1.1	<i>Características,15</i>	
2.3.1.2	<i>El revestimiento,15</i>	
2.3.1.3	<i>Subdivisión de los electrodos,16</i>	
2.3.1.3.1	<i>Electrodos con revestimiento ácido,16</i>	

- 2.8.1. *Alivio de tensiones por vía mecánica*,30
- 2.9. Ensayo de Dureza,32
 - 2.9.1. *Dureza Brinell*,33
 - 2.9.2. *Dureza Rockwell*,33
 - 2.9.3. *Rockwell superficial*,32
 - 2.9.4. *Dureza Webster*,33
 - 2.9.5. *Dureza Vickers*,33
 - 2.9.6. *Dureza Shore*,34
- 2.10. Ensayo de Tracción,34
 - 2.10.1. *Características de los Materiales Elásticos*,35
 - 2.10.1.1 *Límite de proporcionalidad*,35
 - 2.10.1.2 *Límite de fluencia o límite elástico aparente*,35
 - 2.10.1.3 *Límite elástico (límite elástico convencional o práctico)*,35
 - 2.10.1.4 *Carga de rotura o resistencia a la tracción*,35
 - 2.10.1.5 *Alargamiento de rotura*,35
 - 2.10.2. *Curva tensión-deformación*,35
 - 2.10.2.1 *Deformaciones elásticas*,36
 - 2.10.2.2 *Fluencia o cedencia*,36
 - 2.10.2.3 *Deformaciones plásticas*,37
 - 2.10.2.4 *Estricción*,37
- 2.11. Galgas extensiométricas,38
 - 2.11.1. *Tratamiento de la señal*,38

- 2.11.2. *Puente de Wheatstone*,38
- 2.11.3. *Limitaciones del uso de galgas extensométricas*,40
- 2.11.4. *Ventajas del uso de galgas extensométricas*,40
- 2.11.5. *Desventajas del uso de galgas extensométricas*,41
- 2.12. *Tratamientos térmicos*,41
 - 2.12.1 *Temple*,41
 - 2.12.2 *Revenido*,40
 - 2.12.3 *Normalizado*,43
 - 2.12.4 *Recocido*,43
 - 2.12.4.1 *Recocido de ablandamiento*,43
 - 2.12.4.2 *Recocido de reducción de acritud o de recristalización*,43
 - 2.12.4.3 *Recocido de homogeneización*,43
- 2.13 *Diagrama de hierro – Carbono*,44
- 2.14 *Propiedades físicas y químicas*,44
 - 2.14.1 *Austenita*,44
 - 2.14.2 *Ferrita*,45
 - 2.14.3 *Cementita*,46
 - 2.14.4 *Perlita*,46
 - 2.14.5 *Bainita*,47
 - 2.14.6 *Martensita*,47
- 2.15 *Metalografía*,48
 - 2.15.1 *Preparación de la superficie a analizar*,48

2.15.2 Corte metalográfico,48

2.15.3 Embutido metalográfico,48

2.15.4 Pulido metalográfico,49

2.15.5 Ataque químico,50

2.15.6 Microscopia,50

2.15.6.1 El microscopio metalográfico,50

2.16 Análisis Macroscópico,51

2.16.1 Técnica de evaluación para análisis macroscópico,51

CAPÍTULO 3 Marco Metodológico

53

3.1 Nivel de la Investigación,55

3.2 Diseño de la Investigación,55

3.2.1 Determinación Experimental de los Esfuerzos Mecánicos,56

3.2.1.1 Selección del material para las probetas,56

3.2.1.2 Mecanizado de las probetas,56

3.2.1.3 Selección del material de aporte,57

3.2.1.4 Selección de los tipos de revestimiento del material de aporte,58

3.2.1.5 Tratamiento térmico de las láminas de acero ASTM A36. ,60

3.2.1.6 Soldadura de las probetas,61

3.2.1.7 Tratamiento térmico de las probetas soldadas,64

3.2.1.8 Ensayo de Dureza, 65

3.2.1.8.1 Preparación de las probetas para el ensayo de microdureza Vickers, 66

3.2.1.8.2 Identificación de los puntos de medición de dureza superficial de las probetas para la posterior comparación con las galgas, 66

3.2.1.8.3 Identificación de los puntos de medición de dureza

<i>superficial de las probetas para evaluar el comportamiento longitudinal,</i>	67
3.2.1.8.4 <i>Mediciones de durezas a realizar,</i>	68
3.2.8.5 <i>Obtención de esfuerzos residuales mediante del ensayo de microdureza Vickers,</i>	69
3.2.1.9 <i>Ensayo de Tracción,</i>	69
3.2.9.1 <i>Preparación de la probeta para la realización del ensayo de tracción con galgas extensométricas,</i>	70
3.2.1.9.2 <i>Instrumentación de la probeta para la realización del ensayo de tracción con galgas extensométrica,</i>	70
3.2.1.9.3 <i>Ensayo de tracción con galga extensométrica,</i>	72
3.2.1.9.4 <i>Obtención de los esfuerzos Residuales mediante galgas extensométricas,</i>	73
3.2.1.10 <i>Análisis Metalográfico,</i>	74
3.2.1.10.1 <i>Preparación de las probetas para el análisis metalográfico,</i>	75
3.2.1.10.2 <i>Ataque químico,</i>	75
3.2.1.10.3 <i>Observación de la microestructura de la zona afectada por el proceso de soldadura,</i>	75
3.2.1.11 <i>Análisis Macroscópico,</i>	76
3.2.1.11.1 <i>Preparación de las probetas para el análisis metalográfico,</i>	76
3.2.1.11.1 <i>Preparación de las probetas para el análisis metalográfico,</i>	76

CAPÍTULO 4 Resultados Experimentales

77

4.1 Ensayos de dureza, 77

 4.1.1 *Ensayo de dureza superficial de las probetas para la posterior comparación con las galgas, 77*

 4.1.2 *Cálculo experimental del límite de fluencia del material para*

las distintas composiciones del recubrimiento en el electrodo de las probetas para la posterior comparación con las galgas, 79

4.1.3 Cálculo de esfuerzos residuales superficiales mediante ensayo de microdureza Vickers de las probetas para la posterior comparación con las galgas, 80

4.1.4 Medición de dureza superficial de las probetas para evaluar el comportamiento longitudinal, 82

4.1.5 Cálculo experimental del límite de fluencia del material para las distintas composiciones del recubrimiento en el electrodo para evaluar el comportamiento longitudinal, 84

4.1.6 Cálculo de esfuerzos residuales superficiales mediante ensayo de microdureza Vickers para evaluar el comportamiento longitudinal, 85

4.2 Ensayo de Tracción, 88

4.2.1 Obtención de los esfuerzos Residuales mediante galgas extensométricas, 88

4.3 Análisis Metalográfico, 91

4.4 Análisis Macroscópico, 96

CAPÍTULO 5	Análisis y Discusiones	97
Conclusiones		107
Recomendaciones		109
Referencias bibliográficas		111

Índice de figuras

- 2.1 Proceso de soldadura SMAW, 8
- 2.2 Zonas afectadas de la soldadura, 8
- 2.3 Circuito de soldadura por arco eléctrico, 10
- 2.4 Circuito de soldadura por arco eléctrico. Polaridad directa,11
- 2.5 Circuito de soldadura por arco eléctrico. Polaridad invertida,11
- 2.6 Fractura de línea central, 12
- 2.7 Fractura en la zona de calor, 12
- 2.8 Fractura transversal, 13
- 2.9 Tipos de uniones por soldadura,13
- 2.10 Sólido elástico articulado,20
- 2.11. Distribución de esfuerzos a compresión y a tensión,20
- 2.12. Esfuerzos residuales normales, 20
- 2.13 Máquina de ensayo de tracción, 34
- 2.14 Curva esfuerzo-deformación de materiales dúctiles en tensión, 36
- 2.15 Deformación de materiales dúctiles en tensión, 37
- 2.16 Disposición del Puente de Wheatstone, 39
- 3.1. Dimensiones de las probetas a tracción en mm según norma ASTM E8,57
- 3.2 Clasificación A.W.S. Electrodo de acero al carbono,59

- 3.3. Diagrama Hierro – Carbono del acero, 60
- 3.4. Láminas de acero ASTM A36 después del Tratamiento térmico, 61
- 3.5. Diseño del cordón de Soldadura, 62
- 3.6. Plancha A soldada con E6010, 62
- 3.7. Plancha B soldada con E6013, 63
- 3.8. Plancha C soldada con E7018, 63
- 3.9. Diagrama Hierro – Carbono del acero, 65
- 3.10. Distribución de los puntos de medición de dureza de la probeta, 67
- 3.11. Distribución de los puntos de medición de dureza de la probeta para evaluar comportamiento longitudinal, 68
- 3.12. Durómetro digital Micro Hordness tester, 68
- 3.13. Demarcación de los ejes centrales de la probeta, para la posterior colocación de las galgas, 70
- 3.14. Máquina universal de ensayo de materiales marca Tinius Olsen, 70
- 3.15. Microscopio metalográfico, 76
- 4.1. Microestructura del material base, 91

Índice de tablas y gráficos

Tablas

- 2. 1 Características de los diferentes tipos de Electroodos, 19
- 2.2 Factores que contribuyen a los esfuerzos residuales, 26
- 2.3 Clasificación de las técnicas para la medición de tensiones residuales, 28
- 2.4 Ataques recomendados para piezas de acero, según los defectos a observar, 55
- 3.1. Recomendaciones para soldar principales aceros estructurales, 57
- 3.2. Propiedades de los Electroodos seleccionados, 60
- 3.3. Parámetros para la construcción de la soldadura, 64
- 3.4. Selección del Diámetro del electrodo e Intensidad de corriente según el espesor de chapa, 64
- 3.5 Procedimientos para una correcta adherencia de las de las galgas sobre la probeta sobre las galgas, 71
- 4.1 Datos promedios de la Microdureza Vickers de las probetas testigos, 77
- 4.2 Datos promedios de la Microdureza Vickers de las probetas no testigos, 78
- 4.3. Límite de fluencia del material para las distintas composiciones del recubrimiento en el electrodo a las probetas testigo,79
- 4.4. Límite de fluencia del material para las distintas composiciones del

- recubrimiento en el electrodo a las probetas no testigo, 80
- 4.5. Esfuerzo residual en cada punto de estudio para las distintas composiciones del recubrimiento,80
- 4.6. Esfuerzo residual promedio para las distintas composiciones del recubrimiento en el material de aporte,81
- 4.7 Datos promedios de la Microdureza Vickers de las probetas tratadas térmicamente, 81
- 4.8 Datos promedios de la Microdureza Vickers de las probetas no tratadas térmicamente, 81
- 4.9. Promedio del límite de fluencia del material para las distintas composiciones del recubrimiento en el electrodo a las probetas tratadas, 84
- 4.10. Límite de fluencia del material para las distintas composiciones del recubrimiento en el electrodo a las probetas no testigo, 85
- 4.11. Esfuerzo residual en cada punto de estudio para las distintas composiciones del recubrimiento, 85
- 4.12. Voltajes de las probetas tratadas térmicamente,83
- 4.13. Voltajes de las probetas tratadas térmicamente ,88
- 4.14. Deformaciones de las probetas tratadas térmicamente,89
- 4.15. Deformaciones de las probetas no tratadas, 89
- 4.16. Esfuerzos aplicados para cada tipo de recubrimiento en las probetas tratadas, 89
- 4.17. Esfuerzos aplicados para cada tipo de recubrimiento en las probetas no tratadas, 89
- 4.18. Esfuerzos aplicados para cada tipo de recubrimiento en las probetas, 90
- 4.19. Esfuerzos aplicados para cada tipo de recubrimiento, 90
- 4.20. Microestructura de la zona afectada por el calor de la soldadura con E6010 sin tratamiento térmico.(1000X), 92
- 4.21. Microestructura de la zona afectada por el calor de la soldadura con E6013 sin tratamiento térmico. .(1000X), 92
- 4.22. Microestructura de la zona afectada por el calor de la soldadura con E7018

sin tratamiento térmico. .(1000X), 93

4.23. Microestructura de la zona afectada por el calor de la soldadura con E6010 con tratamiento térmico. .(1000X), 93

4.24. Microestructura de la zona afectada por el calor de la soldadura con E6013 con tratamiento térmico .(1000X), 94

4.25. Microestructura de la zona afectada por el calor de la soldadura con E7018 con tratamiento térmico. .(1000X), 94

4.26. Comparación entre las microestructuras de las muestras de las probetas con tratamiento térmico y las microestructuras de las muestras de las probetas sin tratamiento térmico. (400X), 95

4.27. Tabla comparativa de la zona de dilución para las distintas muestras, 96

5.1. Comparación entre las microestructuras de las muestras de las probetas con tratamiento térmico para los distintos recubrimientos estudiados, 93

Gráficos

4.1. Microdureza Vickers vs punto probetas soldadas con electrodo E6010, 78

4.2. Microdureza Vickers vs punto probetas soldadas con electrodo E6013, 78

4.3. Microdureza Vickers vs punto probetas soldadas con electrodo E7018, 79

4.4. Esfuerzos residuales Vs Electrodo obtenido mediante el ensayo de microdureza, 81

4.5. Microdureza Vickers vs Distancia probeta testigo y no testigo Para un electrodo E6010, 83

4.6. Microdureza Vickers vs Distancia probeta testigo y no testigo Para un electrodo E6013, 83

4.7. Microdureza Vickers vs Distancia probeta testigo y no testigo Para un electrodo E7018, 84

4.8 Esfuerzos residuales Vs Distancia Electrodo E6010, 86

4.9 Esfuerzos residuales Vs Distancia Electrodo E6013, 86

4.10. Esfuerzos residuales Vs Distancia Electrodo E7018, 87

4.11. Esfuerzos residuales Vs Distancia, 87

- 4.12. Esfuerzos residuales Vs Electrodo obtenido mediante Galgas, Extensométricas, 90
- 4.13. Representación gráfica de los esfuerzos residuales calculados por el método de microdureza Vickers y utilizando galgas extensométricas, 91
- 5.1. Tasa de cambio de la dureza Vs tipo de recubrimiento, 98

CAPÍTULO 1

El problema

1.1 .Planteamiento del problema:

Dentro de los principales procesos de fabricación para la unión de materiales se sabe que la soldadura es uno de los procesos más utilizados por la industria, además es necesario tomar en consideración que la utilización de los procesos de soldadura puede traer como resultado el surgimiento de esfuerzos mecánicos, que pueden llegar a tener valores elevados y no permisibles, por lo que es necesario atenuar o eliminar dichos esfuerzos. Los esfuerzos mecánicos en la soldadura y las deformaciones son fenómenos estrechamente ligados. Durante el calentamiento y posterior enfriamiento, se generan fuerzas térmicas en la zona soldada y en la zona adyacente. Estas fuerzas, según su intensidad, pueden producir la deformación plástica del metal. Los esfuerzos resultantes de estas fuerzas combinadas y de fuerzas internas son la causa de las distorsiones en la soldadura

Este trabajo, tiene como estudio la soldadura a tope del acero ASTM-A36 con un proceso SMAW, se decidió realizar el cordón de soldadura de las probetas variando el recubrimiento y manteniendo los demás parámetros involucrados constante, para de esta manera poder apreciar con mayor exactitud el cambio de la magnitud de los esfuerzos al variar solo dicho parámetro.

Con la obtención de las magnitudes de los esfuerzos mecánicos de cada uno de los recubrimientos utilizados sobre soldaduras a tope del acero ASTM – A36 mediante un proceso SMAW. Se desea optimizar el proceso de diseño, lo que es de gran importancia al obtener el comportamiento de los esfuerzos mecánicos sometidos a estas condiciones.

1.2. Objetivos.

1.2.1 General:

Determinar la magnitud de los esfuerzos mecánicos en soldaduras a tope del acero ASTM – A36 a causa de la variación en la composición del recubrimiento en un proceso de soldadura con electrodo revestido (SMAW).

1.2.2. Específicos:

1. Realizar ensayos de tracción a probetas para obtener valores reales de esfuerzos mecánicos según la composición del recubrimiento del material de aporte en un proceso de soldadura.
2. Cuantificar los esfuerzos mecánicos en soldaduras a tope del ASTM – A36 generados por la variación del recubrimiento en un proceso SMAW.
3. Evaluar el comportamiento de los esfuerzos mecánicos en función de la composición del recubrimiento del electrodo.
4. Analizar los resultados obtenidos en función de la relación existente entre los esfuerzos mecánicos y el tipo de recubrimiento del material de aporte.

1.3. Justificación:

Hoy en día, el campo de aplicación del proceso de soldadura por arco manual con electrodos revestidos es enorme; casi todos los trabajos de pequeña y mediana soldadura de taller se efectúan con electrodos revestidos; se puede soldar metal de casi cualquier espesor y se pueden hacer uniones de cualquier tipo.

La industria busca obtener buenos resultados en su producción; es decir, que el producto posea altos niveles de confiabilidad y durabilidad, que generen seguridad y desempeño óptimo sin la necesidad de emplear soluciones que afecten el costo de la misma. La sencillez, simplicidad y bajo costo del proceso hace de éste un procedimiento práctico y útil, capaz de ser empleado para: reparación, fabricación y construcción.

La finalidad del recubrimiento en este proceso de soldadura es formar una pantalla gaseosa que proteja al cordón y mantener un ambiente estable para evitar que se depositen partículas no deseadas. Pero no se conoce si la composición de dicho recubrimiento podría ser un factor generador de esfuerzos en esas uniones; puesto que estos se generan durante el intercambio térmico producido en el proceso y son los principales causantes de fallas.

Estos esfuerzos en la mayoría de los casos no son tomados en cuenta; y desconocer, esta influencia puede traer consecuencias fatales o daños incalculables en la utilización de un determinado mecanismo o pieza.

Para evitar consecuencias debidas a estos esfuerzos, se emplea el sobrediseño; que genera una producción mucho más costosa pero confiable y una solución no deseada para la industria.

Es por ello que este estudio propone cuantificar dichos esfuerzos mecánicos, para que en diseños futuros sean tomados en cuenta y así evitar la incertidumbre que se ve reflejada en el sobrediseño y en los altos costos de la producción.

1.4. Limitaciones:

- La disponibilidad horaria y humana del laboratorio de materiales de la escuela de Ingeniería Mecánica.
- La disponibilidad horaria y humana del Laboratorio de de calidad de la empresa Tuboauto Dana de Venezuela C.A para la realización de los ensayos de tracción.

1.5. Alcance:

- Las pruebas e investigaciones llevadas a cabo en este trabajo se efectuarán sobre el acero ASTM-A36
- Se estudiará la variación de la magnitud de los esfuerzos mecánicos en soldaduras SMAW.
- Los esfuerzos mecánicos de la soldadura se determinarán mediante la realización de ensayos a tracción a un número determinado de probetas.
- Se mecanizarán 30 probetas para determinar los esfuerzos mecánicos experimentalmente. Se emplearán 10 probetas por cada tipo de recubrimiento en el material de aporte; donde, 5 de ellas serán testigos y las otras 5 serán las no testigos. A las probetas testigos se les realizará un tratamiento térmico de recocido para aliviar las tensiones, antes y después de realizar el cordón de soldadura. Las probetas no testigos recibirán el tratamiento térmico de recocido sólo antes de realizar el cordón; con la finalidad de que queden presentes los esfuerzos generados al realizar el cordón de soldadura. Dichas probetas se realizarán según la norma ASTM-E8.
- El ensayo de tracción se realizará a 5 probetas testigos y a 5 probetas no testigos con la intención de obtener un esfuerzo resultante; que no es más que la diferencia entre la fuerza de falla de la probeta testigo y la probeta no testigo.
- El cordón de soldadura será realizado mediante una soldadura a tope.
- Se mantendrán todos los parámetros de soldadura constante exceptuando el tipo de recubrimiento del material de aporte que será el parámetro a variar en esta investigación. Para esto será necesario estudiar el comportamiento de tres tipos de recubrimientos distintos.

1.6. Antecedentes preliminares:

- **Carlos Matus Parra, Ersenal Naval Talcahuano**, en la armada de Chile en el año 2007 realizaron un estudio titulado **Determinación De Los Esfuerzos Residuales En La Soldadura G.M.A.W De Planchas De 6mm De Espesor De Acero ASTM a-131-82-b**. El Objetivo General de este estudio fue determinar los esfuerzos residuales en soldadura GAS METAL ARC WELDING (GMAW) en planchas de 6mm de espesor de Acero ASTM A-131-82-B. Para esto se construyó un modelo de elementos finitos

tridimensional con el programa SAMCEF, utilizando sus módulos de transferencia de calor Mecano Structure. La simulación se desarrolló en dos etapas. La primera etapa fue el análisis térmico y en la segunda etapa fue el análisis de esfuerzos y deformaciones. Al final del enfriamiento se obtuvieron los esfuerzos y deformaciones residuales. El análisis mecánico permitió cuantificar los esfuerzos residuales. Además, la evolución durante el proceso de los esfuerzos fue representada en forma gráfica lo que concuerda con la teoría de Masubuchi. Como conclusión final, se tiene que los resultados del sencillo modelo de elementos finitos propuesto, son similares a aquellas provenientes de aplicar la teoría de Masubuchi, y pueden servir de apoyo para futuras mitigaciones.

- **Cerón Cesar**, et al, (2006) en la universidad de Antioquia, Medellín Colombia publicaron un artículo titulado **Caracterización De Las Propiedades Mecánicas Y Microestructurales De Soldaduras Empleadas En La Recuperación de Ejes**. En este trabajo de investigación se analizaron las propiedades mecánicas y las características microestructurales de los materiales de aporte y la zona afectada térmicamente (ZAT) de tres procedimientos de soldadura de arco eléctrico, usados para la recuperación de ejes desgastados de molinos de caña de azúcar. En dos procedimientos se identificó que en la ZAT había ferrita en bordes de grano, mayor crecimiento de grano y la estructura Widmanstaetten, lo cual reduce la tenacidad del acero. Las soldaduras se compararon partiendo de sus propiedades mecánicas por medio de ensayos de tensión y de impacto.
- **Horioka Jose**, et al, (2002) **Estudio de los esfuerzos en uniones soldadas por el método de los elementos finitos**, realizado en la facultad de ciencias e ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Perú, este trabajo de investigación tiene como objetivo general comprender con mayor exactitud la distribución de esfuerzos que presenta una unión soldada cuando es sometida a cargas de diseño, lo cual conduce a entender con mayor claridad los factores a considerar en el diseño e inspección de uniones soldadas. Se centra en el estudio de la distribución de esfuerzos en uniones soldadas típicas sometidas a cargas estáticas de diseño, teniendo en consideración la variación de algunos parámetros geométricos utilizando para ello el método de los elementos finitos (MEF).

- **Bullón W. et al, (2007)** realizaron El presente trabajo aborda **la simulación de un proceso de soldadura por el Método de los Elementos Finitos mediante un modelo de prescripción del ciclo térmico**, realizada en la Universidad Católica del Perú, con la finalidad de obtener una aproximación a los esfuerzos y deformaciones residuales, con el propósito de emplear los resultados para prever probables problemas de fabricación y aplicación de piezas obtenidas mediante este proceso. El estudio parte del análisis de los efectos del proceso de soldadura, considerando los campos térmico, mecánico y metalográfico. Entre éstos, se considera que es el campo térmico el que ejerce una influencia significativa sobre los otros dos y, por el contrario, que los otros ejercen una influencia débil sobre el campo térmico. Por esta razón, se propone como hipótesis de trabajo el estudio desacoplado del problema, mediante la obtención de la historia térmica en todos los puntos del modelo (campo térmico) y posteriormente la obtención de los esfuerzos residuales y deformaciones (campo mecánico). Además, como segunda hipótesis de trabajo, se propone que las propiedades mecánicas significativas en el problema son el módulo de elasticidad y el esfuerzo de fluencia, y se atribuye la causa de las deformaciones y tensiones residuales en el material a la dependencia de estas propiedades con respecto a la temperatura y a los altos gradientes que se producen durante el proceso. En la simulación se emplean por simplicidad fuentes puntuales de temperatura a lo largo del cordón de soldadura. Como consecuencia de ésta y de las demás consideraciones, se obtiene un modelo simple y suficientemente aproximado para el propósito definido. Se logra obtener en el campo mecánico resultados comparables a los que se obtienen mediante modelos más complejos, y que se aproximan a los que ocurren en un proceso real.

CAPÍTULO 2

Marco Teórico

2.1. Soldadura

Es una fusión localizada de metales o de no metales producto de llevar a los materiales a la temperatura de soldado, con o sin el uso de la presión, o por presión únicamente, con o sin el uso del metal de relleno. La soldadura se clasifica de acuerdo al proceso utilizado para la unión de los materiales para efectos de la presente investigación utilizaremos tipo SMAW.

SMAW: siglas en inglés de shielded metal arc welding (soldadura por arco metálico cubierto); este proceso consta de la aplicación de un arco eléctrico entre un electrodo y el material base, al inducir un arco eléctrico, se alcanzan temperaturas en el electrodo, tal que se produce la fusión entre el material de relleno (en caso de haberlo) del electrodo y el material base, al enfriar, el material base queda unido (ver figura 2.1); para proteger el proceso, el electrodo puede tener una cubierta que al ser descompuesta en el proceso produce una capa protectora además de ciertas propiedades dependiendo del tipo de cubierta.

La soldadura de arco blindada del metal tiene la flexibilidad más grande de todos los procesos de la soldadura, porque puede ser utilizado en todas las posiciones (plano, vertical, horizontal, y por encima de la cabeza), con todos los espesores del

metal base (1,6 milímetros, ó 1/16 pulg, y mayor), y en áreas de la accesibilidad limitada, que es una capacidad muy importante. [1]

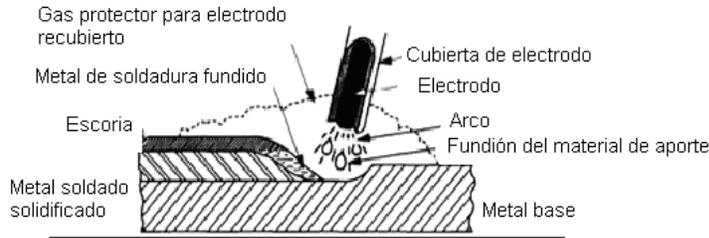


Figura 2.1. Proceso de soldadura SMAW.

Fuente: O. Blodgett et al, 1999, Fabricators` and Erectors` guide to welded steel construction.

La calidad de la junta soldada depende del diseño y de la accesibilidad del empalme, así como en el electrodo, de la técnica, y de la habilidad del soldador. Si los detalles comunes varían grandemente de los detalles establecidos del diseño, entonces puede resultar una soldadura de baja calidad. Otros factores que también reducen calidad son la limpieza incorrecta de las zonas a tratar, granos dentro de la soldadura, y varios problemas con los electrodos individuales, debido al flujo interrumpido y no centrado con respecto al anterior. Las propiedades mecánicas de la junta soldada, como las de cualquier otro material, no son uniformes. Cuando un grano de soldadura es depositado, se crean tres zonas - la zona de fusión, donde se derrite el electrodo con parte de material base, la zona afectada por el calor en la que la potencia térmica afecta suficientemente la microestructura y por ende las propiedades del material, y la zona alrededor de la soldadura con material sin ser afectado por el proceso (ver figura 2.2).

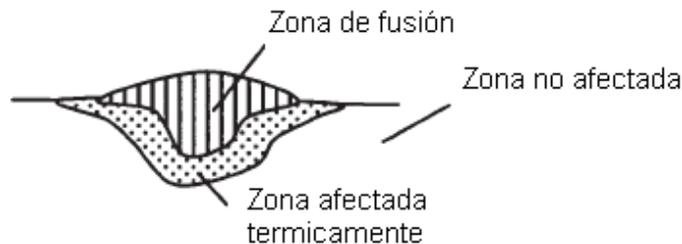


Figura 2.2. Zonas afectadas de la soldadura.

Fuente: O. Blodgett et al, 1999, Fabricators` and Erectors` guide to welded steel construction.

La resistencia también se ve afectada por el proceso de enfriamiento, un enfriamiento rápido, proveerá de una estructura más dura, con elevados valores de

esfuerzos, mientras que un proceso de enfriamiento lento produce superficies más suaves y permite la compactación de los granos en las regiones recalentadas, con esto se provee de una estructura más homogénea.

El amperaje es la variable que define en parte la temperatura de fusión, mientras más energía de corriente se le proporcione para crear el arco eléctrico, mayor rango de temperatura se tendrá. La corriente es directamente proporcional a la cantidad de material de aporte depositado en la unión para un diámetro de electrodo específico.

2.1.- Arco eléctrico.

Para comprender mejor la aplicación del arco eléctrico a la soldadura, es necesario conocer ciertos principios fundamentales relacionados con la electricidad.

2.1.1.- Circuito Eléctrico

La corriente eléctrica es un flujo de electrones que circula por un conductor en un circuito cerrado, denominado circuito eléctrico.

2.1.2.- Circuito de soldadura por Arco eléctrico.

La corriente fluye a partir del borne de la máquina de soldar, donde se fija el cable del electrodo (1), y termina en el borne de la máquina, donde se fija el cable de tierra o de trabajo (2). Como puede observarse en la figura 2.3., a partir del punto (1) la corriente fluye al porta-electrodo y por éste al electrodo, por el extremo del electrodo salta la electricidad a la pieza formando el arco eléctrico; sigue fluyendo la electricidad por el metal base al cable de tierra (2) y vuelve a la máquina. El circuito está establecido sólo cuando el arco se encuentra encendido.

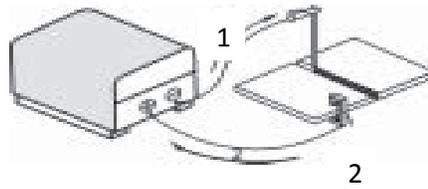


Figura 2.3. Circuito de soldadura por arco eléctrico.

Fuente [Manual de Soldadura y catálogo de productos OERLIKON]

2.1.3.- Clases de corriente eléctrica.

2.1.3.1.- Corriente alterna (CA).

El flujo de corriente varía de una dirección a la opuesta. Este cambio de dirección se efectúa 100 a 200 veces por segundo. El tiempo comprendido entre los cambios de dirección positiva o negativa se conoce con los nombres de ciclo o período (50 a 60 ciclos)

2.1.3.2.- Corriente continua (CC)

El flujo de corriente conserva siempre una misma dirección del polo negativo al positivo.

2.1.4.-Polaridad.

En la corriente continua es importante saber la dirección del flujo de corriente. La dirección del flujo de corriente en el circuito de soldadura es expresada en término de polaridad. Si el cable del porta-electrodo es conectado al polo negativo (-) de la fuente de poder y el cable de tierra al polo positivo (+), el circuito es denominado polaridad directa o normal. Ver figura 2.4.

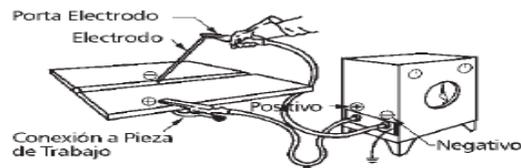


Figura 2.4 Circuito de soldadura por arco eléctrico. Polaridad directa

Fuente: Manual de Soldadura y catálogo de productos OERLIKON.

Cuando el cable del porta-electrodo es conectado al polo positivo (+) de la fuente de poder y el cable de tierra al polo negativo (-), el circuito es denominado polaridad invertida o indirecta. Ver figura 2.5

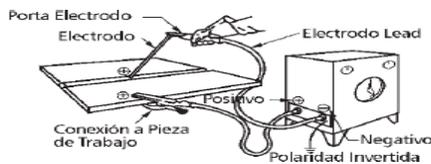


Figura 2.5. Circuito de soldadura por arco eléctrico. Polaridad invertida.

Fuente: Manual de Soldadura y catálogo de productos OERLIKON

2.2.1.- Fallas que se pueden presentar en la soldadura.

Las fallas que se encuentran en las soldaduras tienden a ser por porosidades, inclusiones de puntos de soldadura y esfuerzos residuales producidos durante el proceso de construcción, estas fallas se hacen presente de distintas maneras, tales como:

2.2.1.1.- Grietas en la línea central

El un tipo de fractura que se caracteriza por aparecer en sentido longitudinal al cordón de soldadura, en el centro de éste, si el cordón de soldadura fue aplicado en el centro de la junta, como es el caso de una sola pasada, la fractura se localizará en el centro geométrico, en el caso de varias pasadas (ver figura 2.6), sucederá en el centro del cordón, más no en el centro geométrico de la soldadura.

Las fracturas de línea central se producen por dos factores:

Segregación, generada cuando los componentes de bajo punto de fusión (fósforo, zinc, entre otros) generan rápido endurecimiento del centro del cordón.

El segundo factor es la forma del grano, cuando el enfriamiento del material del cordón genera formas del grano con líneas que son perpendiculares al acero y se interceptan el centro del cordón; y por último tiene que ver con la forma del cordón, si éste queda cóncavo, el centro servirá para alojar tensiones que se convierten en fracturas.

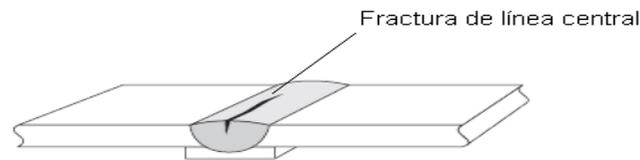


Figura 2.6. Fractura de línea central.

Fuente: O. Blodgett et al, 1999, Fabricators` and Erectors` guide to welded steel construction.

2.2.1.2.- Fractura en la zona de calor (ZAC)

Este tipo de fractura se localiza en las adyacencias del cordón de soldadura, en el material base, no en el cordón (ver figura 2.7), es generada por la degradación de las propiedades mecánicas del material debido al efecto térmico, también se conoce como “fractura bajo grano”, para que ésta fractura se produzca, deben existir tres condiciones simultáneas: debe haber suficiente nivel de hidrógeno, material en el cordón de soldadura y altos niveles de esfuerzos residuales y esfuerzos aplicados.

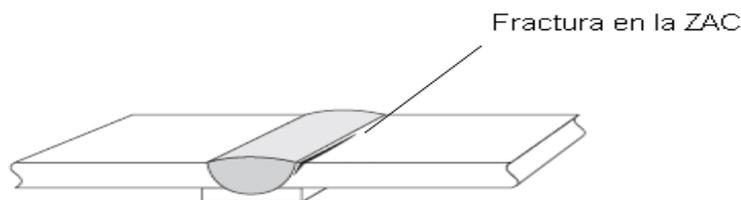


Figura 2.7. Fractura en la zona de calor.

Fuente: O. Blodgett et al, 1999, Fabricators` and Erectors` guide to welded steel construction.

2.2.1.3.- Fractura transversal

Se caracteriza por fracturas perpendiculares al cordón de soldadura (ver figura 2.8), es la menos frecuentemente encontrada y es generalmente asociada a los altos niveles de esfuerzos que tiene el material de soldadura, se produce por exceso de hidrógeno, esfuerzos residuales y microestructura sensible. [2]

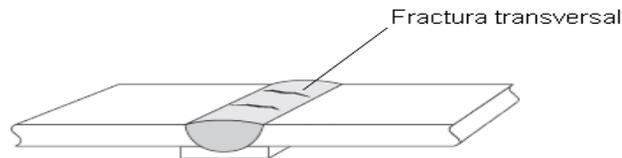


Figura 2.8. Fractura transversal.

Fuente: J. Kronfle, 1983, Efectos de los esfuerzos residuales sobre las uniones soldadas.

2.2.2 Unión por Soldadura.

La soldadura produce una unión sólida entre dos partes. Hay cinco tipos básicos de uniones para integrar dos partes de una junta. De acuerdo con la figura 2.6 se definen del modo siguiente:

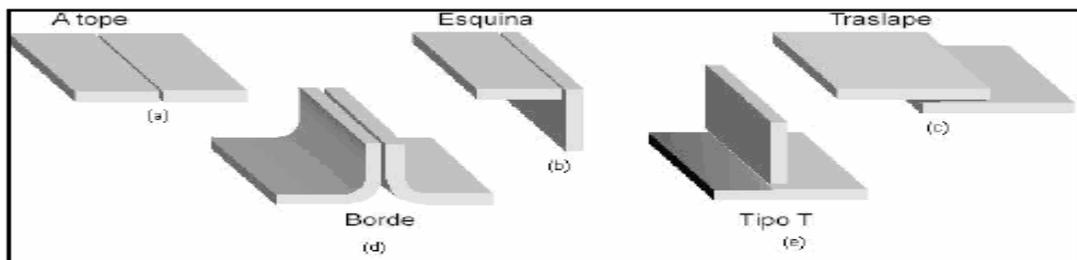


Figura 2.9- Tipos de uniones por soldadura.

Fuente: Montaña, F. (2004). Tecnología Mecánica II. Bolivia: Universidad Mayor de San Simón, pagina

2.2.2.1.- Unión a tope.

En este tipo de unión, las partes se encuentran en el mismo plano y se unen en sus bordes.

2.2.2.2.- Unión de esquina.

Las partes en una unión de esquina forman un ángulo recto y se unen en la esquina del ángulo.

2.2.2.3.- Unión traslape.

Esta unión consiste en dos partes que se superponen.

2.2.2.4.- Unión de bordes.

Las partes en una unión de bordes están paralelas con al menos uno de sus bordes en común y la unión se hace en el borde común.

2.2.2.5.- Unión en T.

En la unión en T, una parte es perpendicular a la otra en una forma parecida a la letra T.

2.3.- Definición de Electrodo

En soldadura de arco un electrodo es usado para conducir corriente a través de la pieza de trabajo y fusionar dos piezas. Dependiendo del proceso, el electrodo puede ser consumible, en el caso de la soldadura con gas metal o la soldadura blindada, o no consumible, como la soldadura con gas y tungsteno. En este proceso se pueden utilizar tres tipos de corriente: corriente alterna, corriente directa con polaridad directa y corriente directa con polaridad invertida. En polaridad directa, la pieza es el positivo y el electrodo el negativo; y en polaridad invertida el electrodo es el positivo y la pieza el negativo. Con cada configuración se obtienen distintas características en la soldadura.

2.3.1.- Electrodoos revestidos

2.3.1.1.- Características

El electrodo revestido está compuesto por un alma y un revestimiento: El alma está formada por una varilla de metal conductor que tiene como única función el aporte de material a la pieza (ver figura 2.10). El material con el que está formada depende del material base a soldar: para los aceros al carbono, para los cuales la soldadura por electrodo está más difundida, el alma es de acero dulce. Durante la soldadura el alma funde un poco antes que el revestimiento.

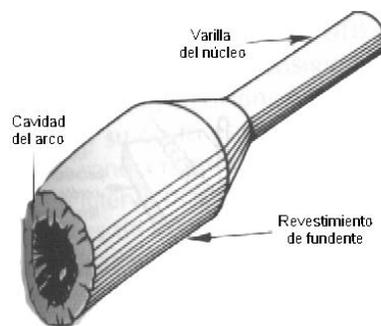


Figura 2.10.- Sólido elástico articulado.

Fuente: “Manual de soldadura” de Koell Hoffer.

2.3.1.2.- El revestimiento

Es la parte más importante del electrodo y tiene numerosas funciones. En primer lugar sirve para proteger la soldadura de la contaminación del aire, y lo hace tanto volatilizándose, y por lo tanto modificando la atmósfera alrededor del baño, como fundiéndose con retraso, y en consecuencia protegiendo el alma con el cráter que naturalmente se forma, como licuándose y flotando encima del baño. Además contiene materiales capaces de depurar el material base y elementos que pueden contribuir en la creación de aleaciones en la fusión. La elección del revestimiento es, por lo tanto, muy importante y depende de las características que se quiere dar a la soldadura. Además, el revestimiento puede contener también metal de aporte en polvo, para aumentar la

cantidad del material depositado y por lo tanto la velocidad de la soldadura. Se habla en este caso de electrodo de alto rendimiento.

2.3.1.3.- Subdivisión de los electrodos

Existen diferentes tipos de electrodos revestidos, donde su composición química influye fuertemente en la estabilidad del arco eléctrico, la profundidad de penetración, la deposición del material, la pureza del baño, esto es, los campos de aplicación de los mismos.

Considerando el tipo de revestimiento, las principales tipologías de electrodos son:

2.3.1.3.1.- Electrodos con revestimiento ácido

Los revestimientos de estos electrodos están formados por óxidos de hierro, aleaciones ferrosas de manganeso y silicio. Garantizan una buena estabilidad del arco que los hace idóneos tanto para la corriente alterna (CA) como para la corriente continua (CC). Tienen un baño muy fluido que no permite soldaduras en determinadas posiciones; además no tienen un gran poder de limpieza en el material base y esto puede causar grietas.

No soportan elevadas temperaturas de secado, con el consiguiente riesgo de humedad residual y por lo tanto de inclusiones de hidrógeno en la soldadura.

2.3.1.3.2.- Electrodos con revestimiento al rutilo

El revestimiento de éste electrodo está compuesto esencialmente por un mineral llamado rutilo. Este último está formado por un 95% de bióxido de titanio, un compuesto muy estable que garantiza una óptima estabilidad del arco y una elevada fluidez del baño, con un apreciable efecto estético en la soldadura. La tarea del revestimiento rutilo es, en cualquier caso, garantizar una fusión dulce, de fácil realización, facilitando la formación de una escoria abundante y viscosa que permite

un buen deslizamiento en la soldadura, sobretodo en posición plana. En este caso el cordón se presenta visualmente bello y regular. Sin embargo, tampoco estos revestimientos tienen una gran eficacia como limpiadores y por lo tanto se aconsejan en los casos donde el material base no contiene muchas impurezas; además no secan bien y por lo tanto desarrollan mucho hidrógeno en la soldadura.

En algunas aplicaciones se combina al rutilo otro componente típico de otros revestimientos, como la celulosa (electrodo rutilo-celulósicos) o la fluorita (electrodos rutilo-básicos). El objetivo es normalmente obtener un electrodo con arco estable pero con unas características de soldadura con mayor rendimiento. La estabilidad del arco es una prerrogativa que hace posible el empleo de este electrodo tanto con corriente alterna (CA) como con corriente continua (CC) en polaridad directa. Se usa sobretodo en espesores reducidos.

2.3.1.3.3.- Electrodo con revestimiento celulósico

El revestimiento de estos electrodos está formado sobre todo por celulosa integrada con aleaciones ferrosas (magnesio y silicio). El revestimiento gasifica casi completamente, permitiendo de esta manera la soldadura también en posición vertical descendiente, lo que no está permitido con otros tipos de electrodo; la elevada gasificación de la celulosa reduce la cantidad de escorias presentes en la soldadura. El elevado desarrollo de hidrógeno (derivado de la especial composición química del revestimiento) hace que el baño de soldadura sea "caliente", con la fusión de una notable cantidad de material base; se obtienen de esta manera soldaduras que penetran en profundidad, con pocas escorias en el baño.

Las características mecánicas de la soldadura son óptimas; el nivel estético es bastante bajo ya que la casi total ausencia de la protección líquida ofrecida por el revestimiento impide una modelación del baño durante la solidificación.

La corriente de soldadura, dada la escasa estabilidad del arco, es normalmente en corriente continua (CC) con polaridad inversa.

2.3.1.3.4.- Electrodo con revestimiento básico

El revestimiento de los electrodos básicos está formado por óxidos de hierro, aleaciones ferrosas y sobre todo por carbonatos de calcio y magnesio a los cuales, añadiendo el fluoruro de calcio, se obtiene la fluorita, o sea, un mineral adecuado para facilitar la fusión. Tienen una elevada capacidad de depuración del material base, por lo que se obtienen soldaduras de calidad y con una notable robustez mecánica. Además, estos electrodos soportan elevadas temperaturas de secado, y por lo tanto no contaminan el baño con hidrógeno. La fluorita hace que el arco sea muy inestable: el baño es menos fluido, se producen frecuentes corto circuitos debidos a una transferencia del material de aporte con grandes gotas; el arco debe mantenerse muy corto por la escasa volatilidad del mismo revestimiento; todas estas características hacen necesario que el soldador tenga una buena experiencia. Tienen una escoria dura y difícil de quitar, y debe eliminarse completamente en caso de repasos. Estos electrodos se prestan para realizar soldaduras en posición, verticales, por encima de la cabeza, etc.

En lo que se refiere a la corriente a emplear, se aconseja el empleo de generadores de corriente continua (CC) en polaridad inversa. Los electrodos básicos se distinguen por la elevadísima cantidad de material depositado y se adaptan notablemente a la soldadura de juntas de grandes espesores. Son fuertemente higroscópicos y se aconseja mantener estos electrodos en ambientes secos y en cajas bien cerradas; si esto no fuese posible, se aconseja efectuar un nuevo secado del electrodo antes de la utilización.

2.3.1.4.- Características de los diferentes tipos de electrodos.

En la tabla 2.1 se resumen las características de los tipos de electrodos existentes

Tabla 2. 1. Características de los diferentes tipos de Electroodos.

TIPO	VENTAJAS	INCONVENIENTES	APLICACIONES
Ácido	<ul style="list-style-type: none"> * Bajo coste * Arco estable * Corriente CA y CC * Escoria fácil de eliminar * Elevada desoxidación * Fácilmente conservables 	<ul style="list-style-type: none"> * Baño fluido * Escaso efecto de limpieza * Elevado aporte de hidrogeno * Escoria no se puede refundir 	<ul style="list-style-type: none"> * Soldaduras en horizontal * Aceros bajos en carbono y con poca presencia de impurezas * Soldaduras económicas y con características mecánicas suficientes (buena robustez pero riesgo de grietas)
Rutilo	<ul style="list-style-type: none"> * Bajo coste * Arco estable * Fácil cebado * Corriente CA y CC * Cordón estéticamente mejor * Fácilmente conservables 	<ul style="list-style-type: none"> * Baño fluido * Escaso efecto de limpieza * Elevado aporte de hidrogeno 	<ul style="list-style-type: none"> * Soldaduras en horizontal * Soldaduras en vertical y en esquinas para pequeños espesores * Aceros bajos en carbono y con poca presencia de impurezas * Soldaduras estéticamente buenas pero características mecánicas suficientes (buena robustez pero riesgo de grietas)
Celulósico	<ul style="list-style-type: none"> * Elevada penetración * Elevada manejabilidad * Escoria reducida 	<ul style="list-style-type: none"> * Son necesarios generadores CC con elevada tensión en vacío * Cordón irregular * Elevado aporte de hidrogeno 	<ul style="list-style-type: none"> * Soldaduras en todas las posiciones, incluida la vertical descendiente * Tubos o donde no sea posible el cordón al reverso * Soldaduras en las que el acceso del electrodo resulta crítico * Aceros bajos en carbono con escasa presencia de impurezas
Básico	<ul style="list-style-type: none"> * Óptima limpieza del material * Aporte de hidrogeno muy reducido * Baño frío 	<ul style="list-style-type: none"> * Arco poco estable * Escoria no se puede refundir y de difícil eliminación * Arco corto y difícil de trabar * Cebado difícil * Generadores CC de difícil conservación 	<ul style="list-style-type: none"> * Soldaduras en todas las posiciones, incluso con grandes espesores * Elevadas velocidades de depósito * Soldaduras de elevada calidad mecánica, incluso con materiales que contengan impurezas

Fuente [Metals Handbook Volumen 6 Welding, Brazing, and Soldering]

2.4.- Esfuerzos residuales en soldaduras

2.4.1.- Distribución de esfuerzos

Para el propósito de incluir los esfuerzos residuales producto de soldaduras como causa de la variación en las propiedades mecánicas, es necesario primero el

conocer la magnitud y la distribución de los esfuerzos residuales en las juntas soldadas. En general, los esfuerzos residuales en las uniones soldadas, son causados por la contracción del metal de aporte o soldadura, y la deformación plástica producida en el metal base más cercano a la soldadura durante el proceso de soldado. Una distribución típica de esfuerzos residuales en una costura o cordón de soldadura, es mostrada en la figura 2.11 y 2.12.

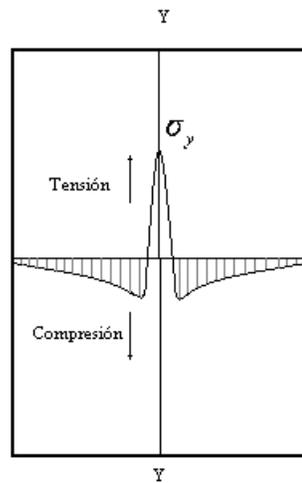


Figura 2.11. Distribución de esfuerzos a compresión y a tensión.

Fuente: Montaña, F. (2004). Tecnología Mecánica II. Bolivia: Universidad Mayor de San Simón

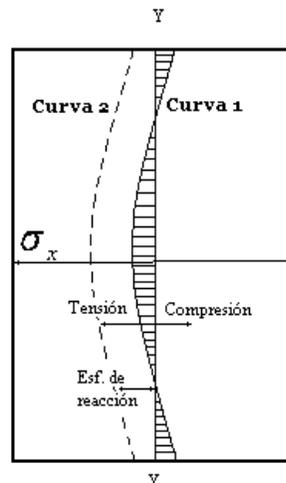


Figura 2.12. Esfuerzos residuales normales.

Fuente: Montaña, F. (2004). Tecnología Mecánica II. Bolivia: Universidad Mayor de San Simón

Los componentes de los esfuerzos que son de interés, son aquellos paralelos a la dirección de la soldadura designada con σ_y (ver figura 2.11), y aquellos transversales a la soldadura designada σ_x . (Ver figura 2.12). La figura 2.11. muestra la distribución de los esfuerzos σ_y a lo largo de la línea transversal a la soldadura. Esfuerzos de tensión se producen en las áreas cercanas a la soldadura y esfuerzos de compresión en las áreas lejanas.

La distribución de los esfuerzos residuales σ_x a lo largo del cordón de soldadura, YY es mostrado en la curva 1 de la figura 2.12, esfuerzos de tensión se producen en la parte media de la junta. Cuando la contracción lateral, contracción en la dirección YY, es restringido por alguna causa externa, la distribución de σ_x es como se

muestra en la curva 2 de la figura 2.12. La diferencia entre las curvas 1 y 2 estriba en los esfuerzos de reacción.

2.4.2.- Influencia del proceso de soldadura

Se piensa que se producen esfuerzos residuales similares en soldadura hechas por diferentes procesos, incluyendo las de arco sumergido, de gas activo, gas inerte, y el proceso de gas y arco de tungsteno. Sin embargo es posible obtener diferente esfuerzos residuales de acuerdo a la modalidad que se use al soldar. Es así, de que al soldar una junta larga a tope, varios tipos de secuencia de soldadura como las de avance hacia delante y hacia atrás, de bloque, de cascada, entre otros, son usadas como un medio de disminuir los esfuerzos residuales y la distorsión.

La selección de una secuencia apropiada al soldar, constituye un problema práctico de importancia, especialmente en juntas de soldadura para una alta sujeción, tales como las juntas involucradas a hacer remiendos. Las secuencias que se utilizan frecuentemente para la construcción de un cordón de soldadura son las siguientes:

Secuencias en capas múltiples, en las cuales la primera capa se completa a todo lo largo de la soldadura (pueden ser usadas varias formas para completar la primera capa, así como directamente hacia delante y hacia atrás, por saltos, etc.); entonces se hace el soldado de la segunda capa y así sucesivamente.

Secuencia por soldado en bloques, en la cual una cierta distancia o porción de la junta, o bloque, se suelda completamente, luego se procede al siguiente bloque, y así en adelante.

2.4.3.- Influencia de la velocidad de enfriamiento

Los esfuerzos residuales concernientes a soldaduras, son aquellos que resultan de las deformaciones plásticas ocurridas por el enfriamiento después de soldar. Además estos esfuerzos están relacionados con la fragilidad de la soldadura después

del proceso, la misma que obedece a los patrones de microestructura. Observando diferentes muestras microscópicamente se han determinado que cuando el tamaño de grano de la estructura es más fino, se obtiene mayor dureza, fragilidad, y muchas veces dislocaciones en forma de celosía. Colateralmente a mayor tamaño de grano en la microestructura, menor fragilidad, menos dureza, y mayor continuidad entre el metal base y la soldadura. La distribución de temperatura en el metal durante el proceso, juega uno de los papeles más significativos en cuanto a la obtención y determinación de los esfuerzos residuales.

2.4.4.- Influencia del metal base

Es de notar que de acuerdo a la composición del material base, se tendrá también que seleccionar un metal adecuado para el electrodo, y así a la vez se tendrá variación en las tres propiedades que influyen en el campo de esfuerzos residuales, α , E , y σ_y . Esfuerzos residuales tan altos como el límite máximo elástico del metal base y del metal del electrodo, se producen en soldaduras de acero al carbono.

2.5.- Origen de los esfuerzos residuales

2.5.1.- Esfuerzos residuales debido a deformación

Las tensiones residuales o internas constituyen el sistema de tensiones que puede existir en un cuerpo cuando está libre de la acción de fuerzas externas. Las tensiones residuales se producen cuando un cuerpo sufre deformación plástica no uniforme. Por ejemplo, si se considera una chapa de metal que se está laminando, de forma que sólo se produce flujo plástico en las proximidades de las superficies. Las fibras superficiales de la chapa están deformadas en frío y tienden a alargarse, mientras el centro de la chapa no se ha alterado.

Puesto que debe mantenerse la continuidad de la chapa es necesario que superficies y centro se acomoden por deformación. Las fibras del centro tienden a

restringir el alargamiento de fibras superficiales, a la vez que las fibras de la superficie tratan de estirar las fibras centrales de la chapa. El resultado es un estado de tensión en la chapa, el cual origina una tensión elevada de compresión en la superficie y una tensión residual de tracción en el centro de la chapa. En general el signo de la tensión residual producida por deformación no homogénea será opuesto a la deformación plástica que la produjo. Por eso en el caso de la chapa laminada, las fibras superficiales, que fueron alargadas plásticamente en la dirección de laminación, quedarán en un estado de compresión.

El sistemas de tensiones residuales existente en un cuerpo deben estar en equilibrio estático, por lo que la fuerza total que actúa sobre cualquier plano que atraviese el cuerpo y el momento total de las fuerzas en cualquier plano deben ser nulos.

La situación no es tan sencilla, realmente, para hacer un análisis completo habría que considerarse las tensiones residuales en las direcciones del ancho y espesor de la chapa y el estado total de tensiones en un punto será el resultante de las tensiones existentes en las tres direcciones principales.

Las tensiones principales sólo pueden ser elásticas. El valor máximo que llega a alcanzar la tensión residual es el límite elástico del material. Una tensión que sobrepase este valor sin fuerza externa oponente, disminuiría automáticamente hasta alcanzar el valor de dicho límite.

En resumen, se tiene que como resultado de procesos de conformado, trabajo mecánico y en general deformaciones en frío o caliente, se tiene la producción de esfuerzos residuales, los mismos que obedecen a una modificación de la microestructura del material deformado; modificación que consiste en la deformación de los granos que conforman la microestructura. Además dichas tensiones residuales podrán alcanzar como máximo valor el límite elástico del material.

2.5.2.- Esfuerzos residuales debido a soldaduras

2.5.2.1.- Esfuerzos residuales debido al proceso de contracción de un cordón de soldadura y la ZAC (zona afectada por el calor)

Una fuente importante de esfuerzos residuales es la diferencia en la contracción a causa del calentamiento y enfriamiento de las áreas de la junta soldada. El metal soldado, originalmente expuesto a las más altas temperaturas, tiende a contraerse más rápidamente que las otras áreas, pero esta contracción es frenada por las áreas más frías.

Así, el metal en la costura estará sujeto a esfuerzos de tensión en la dirección longitudinal, tan pronto como haya disminuido la temperatura lo suficiente para permitir un marcado campo de esfuerzos. El resultado final de la tensión paralela al eje Y, llega a ser a veces tan alta como el límite elástico para los eventuales estados de esfuerzos multiaxiales. Los esfuerzos finales después del enfriamiento total se llaman esfuerzos residuales.

2.5.2.2.- Esfuerzos residuales debido al enfriamiento más rápido en la superficie

El proceso de enfriamiento en la parte interna de la soldadura tiende a ser homogéneo no así en las capas superficiales, ya que estas pueden enfriarse más rápidamente debido a la acción de las corrientes de aire a las que estas pueden estar expuestas. Las temperaturas inmediatamente después de soldar deberían ser constantes a través de la sección del cordón, pero a medida que el tiempo transcurre, se incrementa la diferencia de temperatura entre la superficie y el interior. Así los esfuerzos térmicos van en aumento a través de la sección de la soldadura, lo que puede terminar en una dispereja deformación plástica y eventualmente en tensiones residuales. Este enfriamiento más rápido de la superficie es llamado efecto temple; y las tensiones residuales resultantes de este proceso se les conocen como esfuerzos residuales. Si solamente el efecto temple fuera causante de los esfuerzos residuales, se

esperarían esfuerzos de compresión en las zonas superficiales altamente calentadas, los que estarían en equilibrio con las de tensiones en la parte interna de la costura.

2.5.2.3.- Esfuerzos residuales debido a transformación física

En el enfriamiento de una plancha soldada, transformaciones de fase de austenita a ferrita, bainita o martensita, ocurrirán ya sean a una cierta temperatura, o por encima de un cierto rango de temperatura. Como la transformación va asociada a un aumento en el volumen específico, el material en la costura y la zona afectada por el calor (ZAC) que está siendo transformado tiende a expandirse. Pero esta expansión es frenada, en última instancia en la dirección paralela a la costura, por el material más frío que no está siendo transformado. De esta forma el área que sufre la transformación está bajo esfuerzos de compresión, si la temperatura es suficientemente baja de manera que el material haya marcado ya un campo de esfuerzos. Los esfuerzos residuales por transformación, aparecerán primordialmente si bainita o martensita son producidas. Además se debería esperar que a medida que aumente el área transformada, disminuyan los esfuerzos de transformación.

2.5.2.4.- Superposición de los esfuerzos residuales debido a contracción, temple y transformación

En realidad las diferentes fuentes de esfuerzos residuales en soldaduras no son independientes unas de otras, sino que al menos dos o aún tres diferentes clases de esfuerzos en la unión al enfriarse son superpuestas; obedeciendo a un complejo estado total de esfuerzos. De esta forma, los estados de esfuerzos residuales finales pueden ser obtenidos basados en distintas presunciones, la más simple es aquella de que los esfuerzos residuales finales son el resultado de la superposición lineal de los esfuerzos parciales debidos a las diferentes fuentes ya expuestas. Las tensiones residuales se clasifican de acuerdo al mecanismo que producen:

- Las producidas por diferencias estructurales

- Las producidas por una desigual distribución de las tensiones no elásticas,
- Incluyendo las tensiones plásticas y térmicas

2.6 Factores que contribuyen a las tensiones residuales

Tabla 2.2 Factores que contribuyen a los esfuerzos residuales.

PARAMETROS ESTRUCTURALES	<ul style="list-style-type: none"> • GEOMETRÍA DE LA ESTRUCTURA • ESPESOR DE LA PLACA • TIPO DE JUNTA
PARÁMETROS DEL MATERIAL	<ul style="list-style-type: none"> • MATERIAL DEL METAL BASE • MATERIAL DEL METAL DE APORTE
PARÁMETROS DE FABRICACIÓN	<ul style="list-style-type: none"> • PROCESOS DE SOLDADURA • PARÁMETROS DEL PROCESO • PARAMETRÓS DE LAS PIEZAS

Fuente: García, J. y Álvarez, M. (2006). Tensiones Residuales en la Soldadura. Métodos para su atenuación. Cuba: Universidad Central de las Villas.

Lo anteriormente expuesto demuestra que cuando se utiliza el proceso de soldadura, ya sea para construir o reparar puede traer alteraciones en los materiales y/o estructuras y que numerosos autores coinciden con sus análisis de la problemática por lo que hay que considerar sus consecuencias nocivas.

Las tensiones residuales afectan en forma significativa a fenómenos que suceden a bajos niveles de tensión, tales como:

1. Fractura frágil
2. Fisuración por tenso-corrosión
3. Carga crítica de piezas expuestas a colapso elástico
4. Estabilidad dimensional después del mecanizado

Desconocer esta influencia puede traer consecuencias fatales o daños incalculables en la utilización de un determinado mecanismo, de una pieza y en ocasiones de plantas completas. Es de suma importancia el conocimiento de las consecuencias nocivas de las tensiones residuales en la soldadura, pero se necesita de métodos de detección y medición de las mismas.

2.7. Detección de las tensiones residuales

En general, se han propuesto y utilizado muchas técnicas para medir tensiones residuales en los metales.

En la actualidad, estas técnicas para medir las tensiones residuales se dividen en los siguientes grupos: Relajación de tensiones, difracción de rayos-x, utilización de propiedades sensibles a los esfuerzos, técnica de agrietamiento

En las técnicas de relajación de tensiones, los esfuerzos residuales son determinados midiendo las deformaciones elásticas liberadas. Esto ocurre cuando los esfuerzos residuales son liberados mediante el corte de la muestra en pedazos o por la extracción de un pedazo de la muestra. En la mayoría de los casos, se utilizan para medir la deformación liberada por medio de defómetros mecánicos o galgas eléctricas. Existe una variedad de técnicas que dependen del seccionamiento de las muestras para determinar los esfuerzos residuales. Algunas técnicas se aplican principalmente a cilindros, tuberías o sólidos tridimensionales.

Las deformaciones elásticas en los metales que tienen estructuras cristalinas, pueden ser determinadas por la medición de sus parámetros reticulares utilizando técnicas de difracción por rayos-x. Puesto que el parámetro reticular de un metal en estado no tensionado es conocido o puede ser determinado de forma separada, las deformaciones elásticas en el metal pueden ser determinadas no destructivamente sin maquinar o barrenar. En la actualidad se tienen disponibles dos técnicas: la de película de rayos-x y la del difractómetro por rayos-x. Con la técnica de difracción de rayos-x, la deformación superficial puede ser determinada en un área pequeña, a una

profundidad y diámetro de 0,003 mm. Las técnicas de difracción de rayos-x son las únicas técnicas aplicables para medir tales esfuerzos residuales como los de cajas de bolas (rodamientos) y dientes de engranes y esfuerzos residuales superficiales posterior al maquinado o rectificado.

Tabla 2.3 – Clasificación de las técnicas para la medición de tensiones residuales

A-1 Relajación de tensiones utilizando defórmómetros mecánicos y galgas eléctricas	Aplicable principalmente a placas	<ol style="list-style-type: none"> 1. Técnica de seccionado utilizando resistencias eléctricas strain gauges 2. Técnica de Gunnert 3. Técnica de barrenado de Mathar-Soete 4. Técnica de fresado sucesivo de Stablein
	Aplicable principalmente a cilindros sólidos y tubos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Técnica de maquinado sucesivo de Heyn-Bauer 2. Técnica de trepanación de Mesnager-Sachs
	Aplicable principalmente a sólidos tridimensionales	<ol style="list-style-type: none"> 1. Técnica de barrenado de Gunnert 2. Técnica de seccionado de Rosenthal-Norton
A-2 Relajación de tensiones utilizando aparatos diferentes a los anteriores		<ol style="list-style-type: none"> 1. Técnica utilizando sistema divisor de retícula 2. Técnica de barrenado con capa frágil 3. Técnica de barrenado con capa fotoelástica
B Difracción por rayos-x		<ol style="list-style-type: none"> 1. Técnica de película de rayosx 2. Técnica de difractómetro de rayos x
C Utilización de propiedades sensibles a los esfuerzos	Técnicas ultrasónicas	Técnicas de ondas ultrasónicas polarizadas ¹⁵ .Técnicas de atenuación ultrasónica ¹⁶ .Técnicas de durezas.
D Técnica de agrietamientos		Técnica de agrietamiento por hidrógeno inducido ¹⁸ .Técnica de agrietamiento esfuerzo corrosión

Fuente: García, J. y Álvarez, M. (2006). **Tensiones Residuales en la Soldadura. Métodos para su atenuación.** Cuba: Universidad Central de las Villas.

Sin embargo, estas técnicas por rayos-x tienen varias desventajas. Primero, son procesos más bien lentos. En cada punto de medición debe de realizarse ésta en dos direcciones requiriendo cada una de 15 a 30 minutos de tiempo de exposición para la técnica de película. Segundo, la medición no es muy precisa., especialmente cuando se aplica a materiales tratados térmicamente en los cuales la estructura se distorsiona.

Se han hecho intentos de determinar los esfuerzos residuales en los metales mediante la medición de propiedades sensibles a los esfuerzos. Las técnicas propuestas de medición de esfuerzos incluyen los métodos ultrasónicos y el de dureza.

Las técnicas ultrasónicas pueden utilizar las ondas ultrasónicas polarizadas y hacer uso del cambio inducido por esfuerzos en el ángulo de polarización de las ondas ultrasónicas polarizadas (de forma semejante a las técnicas fotoelásticas) o hacer uso de los cambios inducidos por esfuerzos en la absorción de ondas ultrasónicas, es decir, atenuación ultrasónica. Ninguna de estas técnicas ha sido desarrollada más allá de la etapa de laboratorio y ninguna ha sido utilizada con éxito para la medición de esfuerzos residuales en las construcciones soldadas. Se han desarrollado técnicas para el estudio de los esfuerzos residuales observando las grietas producidas por estos en las muestras. Las grietas pueden ser inducidas por el hidrógeno o por el esfuerzo de corrosión (*stress-corrosion*). Las técnicas por agrietamiento son útiles para el estudio de los esfuerzos residuales en modelos de estructuras complejas los cuales tienen una distribución complicada de esfuerzos residuales.

2.8.- Métodos para el alivio de tensiones en la soldadura

Generalmente, los métodos para el alivio de tensiones residuales se pueden clasificar en dos grandes grupos:

2.8.1.- Alivio de tensiones por vía térmica

Este tratamiento, ampliamente utilizado en la industria, consiste en calentar los conjuntos soldados hasta una temperatura inferior a la de transformación y

mantenerlos en ella un tiempo suficientemente largo como para que se uniformen en toda la pieza y puedan efectuarse los reajustes dimensionales necesarios para establecer el estado de equilibrio a los nuevos valores de la tensión de fluencia correspondiente a dicha temperatura.

Las temperaturas empleadas para el tratamiento térmico de alivio de tensiones, son normalmente de alrededor de 600 °C para los aceros estructurales comunes y pueden llegar a 700/750 °C en aceros de alta aleación a base de molibdeno (para recipientes a presión y calderas, los tiempos y temperaturas de sostenimiento los encontramos en la Sección VIII División 1 del Código ASME BPV, en el párrafo UCS-56 para aceros al carbono).

En algunos materiales no resulta aconsejable la permanencia a temperaturas del orden indicado por el riesgo de afectar desfavorablemente su aptitud para hacer frente satisfactoriamente a las necesidades del servicio.

Tal es el caso de los aceros inoxidable, que son susceptibles a la precipitación del cromo para formar carburos de cromo cuando son sometidos a temperaturas dentro del rango de 400-700 °C, trayendo como consecuencia que aparezcan zonas cuya pasividad frente a los agentes químicos agresivos se encuentra disminuida, además de disminuir sus propiedades mecánicas.

Por lo anteriormente expuesto, se puede concluir que el alivio de tensiones por vía térmica tiene ventajas y desventajas, porque para realizarlo hay que contar con instalaciones complejas y costosas, además de su alto consumo de energía eléctrica, estando limitado el tamaño de piezas voluminosas. Hay que tener en cuenta el tipo de material para que no ocurra la fragilización del mismo o la corrosión intercrystalina y por consiguiente una disminución catastrófica de las propiedades mecánicas del material con el consiguiente gasto del recurso.

2.8.2.- Alivio de tensiones por vía mecánica

El estabilizado por tratamiento térmico es el método más conocido, pero no el único. En el tratamiento por horno, las temperaturas altas reducen las tensiones en el

material. Este tipo de alivio de esfuerzos, aunque generalmente resulte efectivo, tiene varios defectos y limitaciones. El costo es elevado, el proceso es de larga duración y frecuentemente da por resultado el deterioro de las propiedades de los materiales los gastos generados en cuanto a transporte, también son importantes. Muchas empresas de la industria metalúrgica han expresado sus deseos de disponer de instalaciones para reducir esfuerzos residuales durante el proceso de fabricación. Esto origina gastos prohibitivos y muchas veces es logísticamente imposible de conseguir si se utiliza el proceso de tratamiento térmico. El método por vibración introduce energía dentro de la pieza a estabilizar. Para la red de átomos con tensiones, no existe diferencia entre la energía térmica y la introducida por vibración. Esta energía vuelve a alinear la estructura interna del material aliviando los esfuerzos y estabilizando la pieza sin sufrir deformaciones. El tratamiento por vibración se puede usar para estabilizar piezas que presentan tensiones debido a procesos de mecanizado, fresado, rectificado, troquelado, escariado, estampado, perforado, cepillado, forjado y soldado.

El alivio de tensiones por vía mecánica se está convirtiendo en una alternativa real y efectiva al tratamiento térmico por horno. El estabilizado por vibraciones se está utilizando en todo el mundo con resultados plenamente satisfactorios. Aplicable a una gran variedad de materiales, no tiene efectos negativos en las piezas a estabilizar. Las tolerancias de las piezas se mantienen.

El método se basa en la introducción de vibraciones de baja frecuencia y alta amplitud durante un breve período de tiempo basado en la pieza a estabilizar. Se ha comprobado que las vibraciones resonantes son el método más efectivo para reducir los esfuerzos residuales por medio de vibraciones. El proceso mediante frecuencias resonantes produce una redistribución de esfuerzos más pronunciada en comparación con los métodos con frecuencias subresonantes o subarmónicas. Las vibraciones de baja frecuencia proporcionan energía de gran amplitud y son muy eficientes en la reducción de los picos de esfuerzos residuales en las piezas metálicas y estructuras de componentes soldados.

Para un buen estabilizado se deben de cumplir dos reglas básicas: aislar la pieza del suelo tanto como sea posible para hacerla vibrar con libertad y aplicar de manera firme el vibrador a la pieza mediante sargentos de apriete, tornillos, etc.

El tratamiento por vibración no es tan efectivo en materiales laminados en frío, extruidos, endurecidos por deformación plástica, trabajados en frío y materiales endurecidos por solidificación de una fase. No se evitarán o eliminarán deformaciones o combaduras debidas a los efectos del calor y no alisará ni enderezará piezas. Una de las ventajas más destacadas del estabilizado por vibración, es su capacidad para aliviar tensiones en cualquier momento de la etapa de fabricación, como por ejemplo, después del desbastado, el perforado o el rectificado. Para construcciones soldadas, el alivio de esfuerzos se puede realizar durante la soldadura, lo que es de gran ayuda en la prevención de la acumulación de esfuerzos que podrían provocar la quebradura o deformación de algunas secciones. La soldadura produce grandes cambios de temperatura en poco tiempo; si aplicamos vibración mientras soldamos o inmediatamente después de la soldadura, atenuamos enormemente las tensiones generadas. Si los fabricantes siguen llevando las piezas a horno porque siempre se ha hecho así, es necesario un cambio de mentalidad. El ahorro en gastos de transporte va a ser total y el acabado de las piezas va a ser el mismo.

2.9.- Ensayo de Dureza.

En metalurgia la dureza se mide utilizando un durómetro para el ensayo de penetración. Dependiendo del tipo de punta empleada y del rango de cargas aplicadas, existen diferentes escalas, adecuadas para distintos rangos de dureza.

El interés de la determinación de la dureza en los aceros estriba en la correlación existente entre la dureza y la resistencia mecánica, siendo un método de ensayo más económico y rápido que el ensayo de tracción, por lo que su uso está muy extendido. Las escalas de uso industrial actuales son las siguientes:

2.9.1.- Dureza Brinell.

Emplea como punta una bola de acero templado. Para materiales duros, es poco exacta pero fácil de aplicar. Poco precisa con chapas de menos de 6mm de espesor. Estima resistencia a tracción.

2.9.2.- Dureza Rockwell.

Se utiliza como punta un cono de diamante (en algunos casos bola de acero). Es la más extendida, ya que la dureza se obtiene por medición directa y es apto para todo tipo de materiales. Se suele considerar un ensayo no destructivo por el pequeño tamaño de la huella.

2.9.3.- Rockwell superficial.

Existe una variante del ensayo, llamada Rockwell superficial, para la caracterización de piezas muy delgadas, como cuchillas de afeitar o capas de materiales que han recibido algún tratamiento de endurecimiento superficial.

2.9.4.- Dureza Webster.

Emplea máquinas manuales en la medición, siendo apto para piezas de difícil manejo como perfiles largos extruidos. El valor obtenido se suele convertir a valores Rockwell.

2.9.5.- Dureza Vickers

Emplea como penetrador un diamante con forma de pirámide cuadrangular. Para materiales blandos, los valores Vickers coinciden con los de la escala Brinell. Mejora del ensayo Brinell para efectuar ensayos de dureza con chapas de hasta 2mm de espesor.

2.9.6.- Dureza Shore

Emplea un escleroscopio. Se deja caer un indentador en la superficie del material y se ve el rebote. Es adimensional, pero consta de varias escalas. A mayor rebote mayor dureza. Aplicable para control de calidad superficial. Es un método elástico, no de penetración como los otros.

2.10.- Ensayo de Tracción.

Mediante el ensayo se obtiene información sobre el comportamiento mecánico de los materiales. Mediante una máquina de ensayos se deforma una muestra o probeta del material a estudiar, aplicando la fuerza uniaxialmente en el sentido del eje de la muestra. A medida que se va deformando la muestra, se va registrando la fuerza (carga), llegando generalmente hasta la fractura de la pieza. Así pues, el resultado inmediato es una curva de carga frente a alargamiento, que transformados en tensión y deformación, en función de la geometría de la probeta ensayada, aportan una información más general.

Un esquema de la máquina de ensayo de tracción se muestra en la figura 2.13

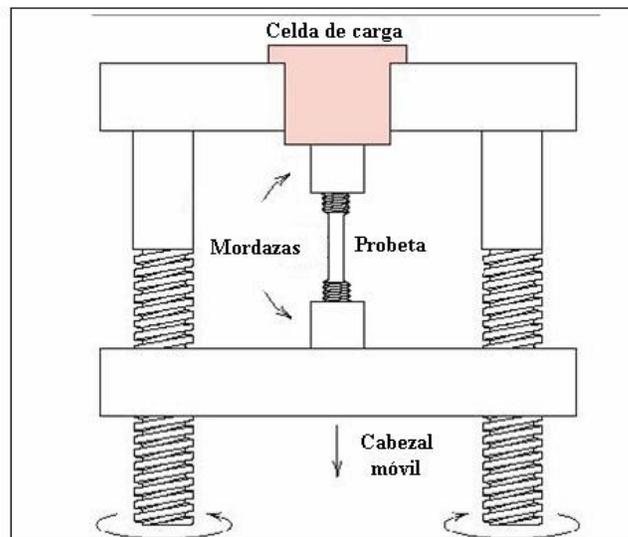


Figura 2.13.- Máquina de ensayo de tracción.

Fuente: <http://www2.ing.puc.cl/~icm2312/apuntes/materiales/materials3.html>

2.10.1.- Características de los Materiales Elásticos.

2.10.1.1.- Límite de proporcionalidad: valor de la tensión por debajo de la cual el alargamiento es proporcional a la carga aplicada.

2.10.1.2.- Límite de fluencia o límite elástico aparente: valor de la tensión que soporta la probeta en el momento de producirse el fenómeno de la cedencia o fluencia. Este fenómeno tiene lugar en la zona de transición entre las deformaciones elásticas y plásticas y se caracteriza por un rápido incremento de la deformación sin aumento apreciable de la carga aplicada.

2.10.1.3.- Límite elástico (límite elástico convencional o práctico): valor de la tensión a la que se produce un alargamiento prefijado de antemano (0,2%, 0,1%, etc.) en función del extensómetro empleado.

2.10.1.4.- Carga de rotura o resistencia a la tracción: carga máxima resistida por la probeta dividida por la sección inicial de la probeta.

2.10.1.5.- Alargamiento de rotura: incremento de longitud que ha sufrido la probeta. Se mide entre dos puntos cuya posición está normalizada y se expresa en tanto por ciento.

2.10.2.- Curva tensión-deformación.

En el ensayo se mide la deformación (alargamiento) de la probeta entre dos puntos fijos de la misma a medida que se incrementa la carga aplicada, y se representa gráficamente en función de la tensión (carga aplicada dividida por la sección de la probeta).

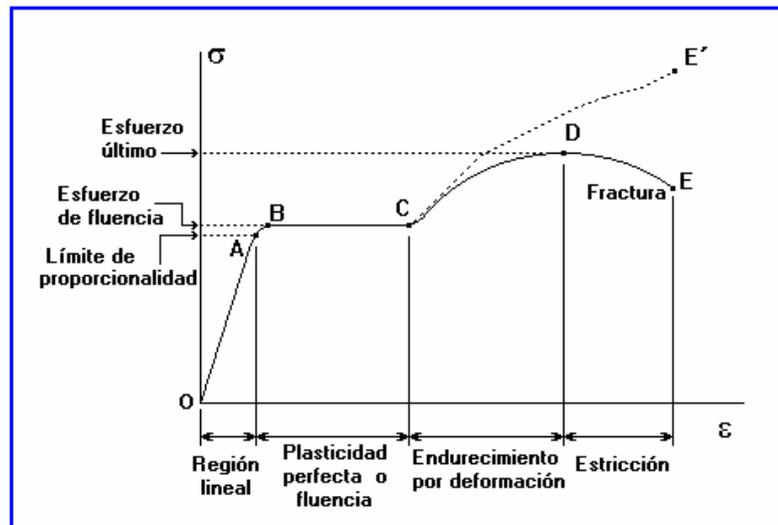


Figura 2.14.- Curva esfuerzo-deformación de materiales dúctiles en tensión

Fuente: <http://www2.ing.puc.cl/~icm2312/apuntes/materiales/materials3.html>

En general, la curva tensión-deformación así obtenida presenta cuatro zonas diferenciadas:

2.10.2.1.- Deformaciones elásticas. En esta zona las deformaciones se reparten a lo largo de además hay muchas aplicaciones para un mismo tipo de acero, por tal motivo los fabricantes proporcionan tablas con los valores óptimos de temperatura y tiempo de permanencia a ella de la pieza, así como la velocidad de enfriamiento durante el temple y también para el revenido posterior, para obtener los diferentes valores de dureza y resistencia que el constructor de maquinaria usa según su propósito. En ocasiones (especialmente para los aceros aleados) este temple resulta un complejo proceso de calentamientos y enfriamientos a largas horas de permanencia.

2.10.2.2.- Fluencia o cedencia. Es la deformación brusca de la probeta sin incremento de la carga aplicada. El fenómeno de fluencia se da cuando las impurezas o los elementos de aleación bloquean las dislocaciones de la red cristalina impidiendo su deslizamiento, mecanismo mediante el cual el material se deforma plásticamente. Alcanzado el límite de fluencia se logra liberar las dislocaciones produciéndose la

deformación bruscamente. La deformación en este caso también se distribuye uniformemente a lo largo de la probeta pero concentrándose en las zonas en las que se ha logrado liberar las dislocaciones (bandas de Luders). No todos los materiales presentan este fenómeno, en cuyo caso la transición entre la deformación elástica y plástica del material no se aprecia de forma clara.

2.10.2.3.- Deformaciones plásticas. Si se retira la carga aplicada en dicha zona, la probeta recupera sólo parcialmente su forma quedando deformada permanentemente como se muestra en la figura 2.15. Las deformaciones en esta región son más acusadas que en la zona elástica.

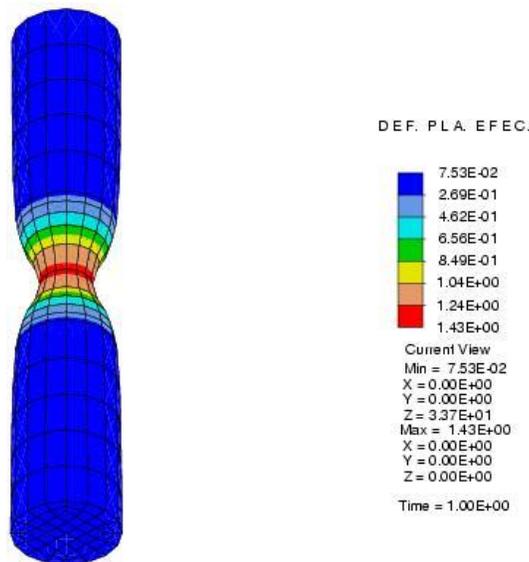


Figura 2.15.- Curva esfuerzo-deformación de materiales dúctiles en tensión

Fuente: <http://www.mecanica.upm.es/.../neck3ddp1.jpg>

2.10.2.4- Estricción. Llegado un punto del ensayo, las deformaciones se concentran en la parte central de la probeta apreciándose una acusada reducción de la sección de la probeta, momento a partir del cual las deformaciones continuarán acumulándose hasta la rotura de la probeta por esa zona. La estricción es la responsable del descenso de la curva tensión-deformación; realmente las tensiones no disminuyen hasta la rotura, sucede que lo que se representa es el cociente de la fuerza aplicada (creciente) entre la

sección inicial y cuando se produce la estricción la sección disminuye, efecto que no se tiene en cuenta en la representación gráfica. Los materiales frágiles no sufren estricción ni deformaciones plásticas significativas, rompiéndose la probeta de forma brusca. Terminado el ensayo se determina la carga de rotura, carga última o resistencia a la tracción: la máxima resistida por la probeta dividida por su sección inicial, el alargamiento en (%) y la estricción en la zona de la rotura.

2.11.-Galgas extensiométricas

Una galga extensométrica es un sensor basado en el efecto piezorresistivo. Un esfuerzo que deforma a la galga producirá una variación en su resistencia eléctrica.

Los materiales que suelen utilizarse para fabricar galgas son aleaciones metálicas, como por ejemplo constantán, nicrom o elementos semiconductores como por ejemplo el silicio y el germanio. Es por ello que podemos clasificar las galgas en dos tipos: las metálicas y las semiconductoras.

2.11.1.- Tratamiento de la señal

Para tratar la variación de voltaje se utilizará un puente de Wheatstone. Éste está formado por cuatro resistencias unidas en un círculo cerrado, siendo una de ellas la resistencia bajo medida. De esta manera podremos medir resistencias desconocidas mediante el equilibrio de los brazos del puente.

2.11.2.- Puente de Wheatstone

Un puente de Wheatstone es un instrumento eléctrico de medida inventado por Samuel Hunter Christie en 1832, mejorado y popularizado por Sir Charles Wheatstone en 1843. Se utiliza para medir resistencias desconocidas mediante el equilibrio de los brazos del puente. Estos están constituidos por cuatro resistencias que forman un circuito cerrado, siendo una de ellas la resistencia bajo medida.

La figura 2.16 muestra la disposición eléctrica del circuito.

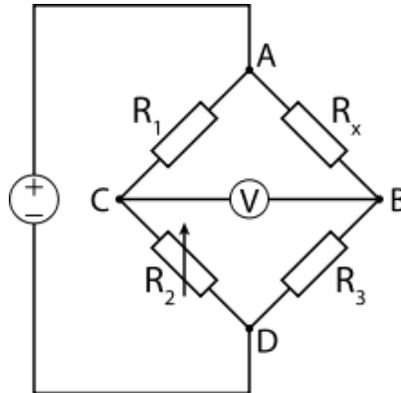


Figura 2.16.-Disposición del Puente de Wheatstone.

Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Galga_extensi%C3%A9trica

En la Figura 2.16 vemos que, R_x es la resistencia cuyo valor queremos determinar, R_1 , R_2 y R_3 son resistencias de valores conocidos, además la resistencia R_2 es ajustable. Si la relación de las dos resistencias del brazo conocido (R_1/R_2) es igual a la relación de las dos del brazo desconocido (R_x/R_3), el voltaje entre los dos puntos medios será nulo y por tanto no circulará corriente alguna entre esos dos puntos **C** y **B**.

Para efectuar la medida lo que se hace es variar la resistencia R_2 hasta alcanzar el punto de equilibrio. La dirección de la corriente, en caso de desequilibrio, indica si R_2 es demasiado alta o demasiado baja. El valor de la F.E.M. (E) del generador es indiferente y no afecta a la medida.

Cuando el puente está construido de forma que R_3 es igual a R_2 , R_x es igual a R_1 en condición de equilibrio. (corriente nula por el galvanómetro).

Asimismo, en condición de equilibrio siempre se cumple que:

$$R_x = \frac{R_1 \times R_3}{R_2} \quad \text{Ec. 2.1}$$

Si los valores de R_1 , R_2 y R_3 se conocen con mucha precisión, el valor de R_x puede ser determinado igualmente con precisión. Pequeños cambios en el valor de R_x

romperán el equilibrio y serán claramente detectados por la indicación del galvanómetro.

De forma alternativa, si los valores de R_1 , R_2 y R_3 son conocidos y R_2 no es ajustable, la corriente que fluye a través del galvanómetro puede ser utilizada para calcular el valor de R_x siendo este procedimiento más rápido que el ajustar a cero la corriente a través del medidor.

2.11.3.- Limitaciones del uso de galgas extensométricas

El esfuerzo aplicado no debe llevar a la galga fuera del margen elástico.

Se necesita una buena adhesión al objeto, para que la medida de la deformación sea correcta.

Un incremento en la temperatura tiene como consecuencia una variación de la resistencia aún sin aplicar ningún esfuerzo.

Coefficiente de dilatación de la galga parecido al del soporte para evitar tensiones mecánicas.

Autocalentamiento de la galga por la disipación de potencia de alimentación.

2.11.4 .-Ventajas del uso de galgas extensométricas

Pequeño tamaño.

Pueden ser alimentadas con corriente continua o corriente alterna.

Tienen una excelente respuesta en frecuencia.

Pueden utilizarse para medidas estáticas y dinámicas.

Compensación de temperatura relativamente fácil.

No son influidas por los campos magnéticos.

2.11.5.- Desventajas del uso de galgas extensométricas

Señal de salida débil.

Pequeño movimiento de la galga.

Alta sensibilidad a las vibraciones.

Estabilidad dudosa a lo largo del tiempo (el envejecimiento de los adhesivos puede afectar a su funcionamiento).

Para umbrales pequeños la técnica de construcción es costosa.

2.12.- Tratamientos térmicos.

Los aceros al carbono y aleados se someten a tratamiento térmico para cambiar sus propiedades mecánicas de acuerdo a la necesidad, la mayor parte de las veces estos tratamientos se hacen para obtener cualidades deseadas de dureza, resistencia mecánica, flexibilidad o rigidez para las piezas nuevas, o en otros casos reducir la dureza para así poder ser maquinadas en reparaciones de piezas usadas muy duras, o la fragilidad para las piezas fabricadas por deformación en frío.

En general pueden distinguirse de manera simplificada los siguientes tratamientos térmicos:

2.12.1.-Temple.

Al temple se someten los aceros al carbono y aleados con contenido de carbono mayor de 0,35%, y el procedimiento en síntesis consiste en calentar la pieza a altas temperaturas, (temperatura de austenización) y luego enfriarla rápidamente hasta temperaturas próximas a la ambiente. Durante este proceso la pieza se endurece notablemente y adquiere mayor rigidez pero resulta muy frágil, por lo que vuelve a calentarse a temperaturas menores de 300 °C y se deja enfriar lentamente, procedimiento conocido como revenido. Este revenido, reduce notablemente la

fragilidad sin afectar en mucho la dureza, haciendo finalmente la pieza dura pero que pueda soportar las cargas dinámicas sin quebrarse.

Hay en la industria muchos tipos de aceros con diferente composición y este recocido es menos profundo y se hace para reducir la fragilidad de las piezas que han sido conformadas en frío (estiradas, dobladas, forjadas etc.). Es común que las piezas que se someten a varios conformados en frío para lograr la forma final, se les aplique un recocido de este tipo entre una conformación y otra para evitar la fractura durante la elaboración.

2.12.2.- Revenido.

Es un tratamiento complementario del temple, que generalmente sigue a éste. Al conjunto de los dos tratamientos también se le denomina "bonificado".

El tratamiento de revenido consiste en calentar al acero después de normalizado o templado, a una temperatura inferior al punto crítico, seguido de un enfriamiento controlado que puede ser rápido cuando se pretenden resultados altos en tenacidad, o lento, para reducir al máximo las tensiones térmicas que pueden generar deformaciones. Los factores que influyen en el revenido son los siguientes: la temperatura de revenido sobre las características mecánicas, el tiempo de revenido (a partir de un cierto tiempo límite la variación es tan lenta que se hace antieconómica su prolongación, siendo preferible un ligero aumento de temperatura de revenido), la velocidad de enfriamiento (es prudente que el enfriamiento no se haga rápido) y las dimensiones de la pieza (la duración de un revenido es función fundamental del tamaño de la pieza recomendándose de 1 a 2 horas por cada 25 mm de espesor o diámetro). [4]

2.12.3.- Normalizado.

Se conoce como normalización a un proceso similar al temple pero en el que el revenido final se hace a temperaturas más altas, el propósito de la normalización es lograr una pieza con la máxima resistencia mecánica sin aumentar apreciablemente la dureza permitiendo un mecanizado posterior al tratamiento térmico. Se someten a normalización con frecuencia los tornillos, pasadores etc.

2.12.4.- Recocido.

Se puede entender el recocido como el calentamiento del acero por encima de las temperaturas de transformación a la fase austenítica seguida de un enfriamiento lento. El resultado de este lento enfriamiento es el de obtener un equilibrio estructural y de fase en los granos del metal. Dependiendo del porcentaje de carbono; luego del recocido se pueden obtener diversas estructuras tales como Ferrita+Cementita en los aceros Hipoeutectoides; Perlita en los aceros Eutectoide; y Perlita+Cementita en los aceros Hipereutectoides.

El recocido es un tratamiento térmico que puede realizarse para diferentes propósitos, los más comunes son:

2.12.4.1.- Recocido de ablandamiento.

Es un recocido profundo que se hace para eliminar la dureza de una pieza para ser maquinada (cortada, barrenada etc.) y consiste en calentar la pieza a temperatura de temple y dejarla enfriar muy lentamente (una suerte de anti-temple). Las propiedades de la pieza una vez maquinada se restablecen volviendo a templarla.

2.12.4.2.- Recocido de homogeneización.

Este recocido se usa principalmente en aceros de alto carbono y aleados y tiene el objetivo de permitir la difusión y homogeneización de los elementos aleantes y el

carbono dentro de la estructura del acero. Este recocido es bastante especializado y en ocasiones toma muchas horas su ejecución.

2.13.-Diagrama de hierro - Carbono.

Cuando el acero con constitución austenica, se enfría lentamente, la austenita se transforma en distintos productos; así por ejemplo, si el acero es hipoeutectoide la austenita se transforma inicialmente en ferrita hasta la temperatura eutectoide, a la cual la austenita remanente se transforma en perlita. La microestructura final será perlita y ferrita proeutectoide en una proporción que depende de la composición y la velocidad de enfriamiento.

Si el acero es de composición eutectoide, la austenita se transforma completamente en perlita; si la composición hipereutectoide se obtiene cementita proeutectoide y perlita como producto de la transformación. Cuando la velocidad de enfriamiento aumenta, la morfología de la ferrita y la cementita proeutectoide cambia y la perlita se hace más fina. A una velocidad elevada, los anteriores constituyentes desaparecen súbitamente a una velocidad de enfriamiento crítico, y aparece una estructura nueva más dura que es la martensita.

Estos productos, obtenidos por enfriamiento rápido, son metaestables desde un punto de vista termodinámico de gran utilidad para la ingeniería debido a sus propiedades.

2.14.- Propiedades físicas y químicas

2.14.1.- Austenita

Es una solución sólida de carbono o carburo de hierro en hierro gamma. Puede contener desde 0 – 1.7% de carbono y es, por lo tanto, un constituyente de composición variable. Todos los aceros se encuentran formados por cristales de austenita cuando se calienta a temperatura superior a las críticas. Aunque generalmente

es un constituyente inestable, se puede obtener esa estructura a la temperatura ambiente por enfriamiento rápido de aceros de alto contenido en carbono de muy alta aleación.

Su resistencia es de 88 – 105 Kgf/mm² aprox. Su dureza de 300 Brinell y su alargamiento de 30 a 60%. Es poco magnética, blanda, muy dúctil y tenaz. Tiene gran resistencia al desgaste, siendo el constituyente más denso de los aceros. En los aceros austeníticos de alta aleación se presenta formando cristales poliédricos parecidos a los de la ferrita, pero se diferencia de estos por ser sus contornos más rectilíneos y ángulos vivos.

2.14.2.- Ferrita:

La ferrita es hierro alfa ósea hierro casi puro que puede contener en solución pequeñas cantidades de silicio, fósforo y otras impurezas.

Tiene aproximadamente una resistencia de 28 kg/ml, 35% de alargamiento y una dureza de 90 unidades de brinell. Es él más blando de todos los constituyentes del acero, muy dúctil y maleable. Magnética y de pequeñas fuerza coercitiva. En los aceros pueden aparecer bajo fuerzas muy diversas:

Como elementos proeutectoide que acompaña a la perlita. También aparece como elemento eutectoide de la perlita, formando láminas paralelas, separadas por otras láminas de cementita.

En la estructura globular propia de los aceros al carbono de herramientas de 0,9 a 1,4% recocido a temperatura próxima de 701°C.

Los aceros hipoeutectoides templados pueden estar mezclados con martensita o con cualquier elemento de transición. Cristaliza con estructura BCC y disuelve máximo de 1,0218% de carbono a 727°C, es blando y dúctil.

2.14.3.- Cementita.

Cementita o también llamada carburo de hierro CFe contiene el 6,67% de carbono y el 93,33% de hierro es el constituyente más duro y frágil de los aceros al carbono, su dureza es superior a los 68 Rockwell-c.

Por su gran dureza queda en relieve después del pulido pudiendo conocerse perfectamente el contorno de los granos o de las láminas.

Es magnética a la temperatura ordinaria pero pierde esta propiedad a 218°C. Después de examinar microscópicamente podemos deducir:

Al formar parte de la perlita se llama cementita perlítica o eutectoide tomando forma de láminas paralelas separadas.

Como cementita globular se presenta en forma de pequeños glóbulos o granos dispersos en una matriz de ferrita.

Cristaliza con estructura ortorrómbica con parámetros 4,5 x 6,7 Å. Es el constituyente más duro y frágil de los aceros al carbono.

2.14.4.- Perlita

Esta se clasifica en: perlita gruesa y perlita fina, las propiedades de estas son:

En la perlita gruesa tiene una separación entre las láminas de unas 400 m μ y una dureza de 200 Brinell, que se obtiene por enfriamiento muy lento dentro del horno. Para observar esta estructura es necesario utilizar unos 500 aumentos.

En la perlita fina, se obtiene cuando se enfría dentro del horno bastante rápidamente o cuando se deja enfriar el acero al aire, tiene 250 m μ y 300 Brinell de dureza.

2.14.5.- Bainita.

Se diferencian dos tipos de estructuras. La bainita superior de aspecto arborescente, formada a 500°C - 550°C, que difieren bastante de la bainita inferior, formada a mas baja temperatura 250°C - 400°C, que tiene un aspecto acicular bastante parecido a la martensita. La Bainita superior está formada por una matriz ferrítica conteniendo carburos. Las placas discontinuas de los carburos tienden a tener una orientación paralela a la dirección de las agujas de la propia bainita.

La bainita inferior está constituida por agujas alargadas de ferrita que contienen delgadas placas de carburos. Estas pequeñas placas son paralelas entre si y su dirección forma un ángulo de 60° con el eje de las agujas de ferrita. Su morfología cambia progresivamente con la temperatura de transformación en el sentido de que el tamaño de las partículas y la acicularidad de la estructura aumenta al disminuir la temperatura.

2.14.6.- Martensita.

Es el constituyente típico de los aceros templados. Se admite que está formado por una solución sólida sobre saturada de carbono o carbono de hierro en hierro alfa, y que se obtiene por enfriamiento rápido de los aceros desde altas temperaturas.

Sus propiedades químicas varían con su composición, aumentando su dureza, resistencia y fragilidad con el contenido en carbono, hasta un máximo de 0,09% aproximadamente.

Tiene una resistencia de 170 a 250 Kgf/mm², una dureza de 50 a 68 rockwell-c y un alargamiento de 2,5 a 95%. Es magnética.

Su estructura varía de BCC a tetragonal de cuerpo centrado. Cuando se forma ni los átomos de carbono se pueden difundir quedando atrapados en los intersticios octaedrales y creando una ferrita supersaturada, con una estructura cristalina tetragonal de un cuerpo centrado, que es la martensita fresca o blanca.

Cuando el temple se hace a la temperatura correcta, en general se obtienen estructuras de martensita muy fina, de aspecto difuso, que suelen exigir 1000 o más aumento para su visualización. A la retícula tetragonal obtenida en el temple se le llama martensita alfa.

2.15.- Metalografía.

La metalografía es la ciencia que estudia las características estructurales o constitutivas de un metal o aleación relacionándolas con las propiedades físicas y mecánicas. Mucha es la información que puede suministrar un examen metalográfico.

2.15.1.- Preparación de la superficie a analizar.

Para este ensayo es necesaria la preparación de una muestra.

2.15.2.- Corte metalográfico.

Cortar la muestra con una cortadora o micro-cortadora metalográfica: es un equipo capaz de cortar con un disco especial de corte por abrasión, mientras suministra un gran caudal de refrigerante, evitando así el sobrecalentamiento de la muestra. De este modo, no se alteran las condiciones microestructurales de la misma.

2.15.3.- Embutido metalográfico.

La muestra cortada se embute en resina para su mejor tratamiento posterior y almacenado. La embutición se puede realizar mediante resina **en frío**: normalmente dos componentes, resina en polvo y un catalizador en líquido, o bien **en caliente**: mediante una embutidora, que, mediante una resistencia interior calienta la resina (monocomponente) hasta que se deshace. La misma máquina tiene la capacidad de

enfriar la muestra, por lo que es un proceso recomendado en caso de requerimientos de muchas muestras al cabo del día.

2.15.4.- Pulido metalográfico.

Se usa el equipo Debastadora ó Pulidora Metalográfica, se prepara la superficie del material, en su primera fase denominada Desbaste Grueso, donde se debasta la superficie de la muestra con papel de lija, de manera uniforme y así sucesivamente disminuyendo el tamaño de grano (Nº de papel de lija) hasta llegar al papel de menor tamaño de grano. Una vez obtenido el último pulido con el papel de lija de tamaño de grano más pequeño. Al inicio de la segunda fase de pulido denominada Desbaste Fino, en la que se requiere de una superficie plana libre de ralladuras la cual se obtiene mediante una rueda giratoria húmeda cubierta con un paño especial cargado con partículas abrasivas cuidadosamente seleccionadas en su tamaño para ello existen gran posibilidad de abrasivos para efectuar el último pulido; en tanto que muchos harán un trabajo satisfactorio existe preferencia por la gama de óxidos de aluminio para pulir materiales ferrosos y de los basados en cobre y óxido de cerio para pulir aluminio, magnesia y sus aleaciones.

La etapa del pulimento es ejecutada en general con paños macizos colocados sobre platos giratorios circulares, sobre los cuales son depositadas pequeñas cantidades de abrasivos, en general diamante industrial en polvo fino o bien en suspensión, con granulometrías como por ejemplo 10, 6, 3, 1, y 0,25 micras

El pulido se realiza sujetando la muestra a tratar con la mano o bien mediante un cabezal automático para pulir varias muestras a la vez. El cabezal automático ejerce una presión pre-configurada hacia el disco o paño de desbaste o pulido durante un tiempo concreto. Estos parámetros deben ser configurados según tipo de material (dureza, estado del pulido, etc...) Opcionalmente existen sistemas con dosificador automático de suspensión diamantada.

2.15.5.- Ataque químico.

Hay una enormidad de ataques químicos, para diferentes tipos de metales y situaciones. En general, el ataque es hecho por inmersión o fregado con algodón embebido en el líquido escogido por la región a ser observada, durante algunos segundos hasta que la estructura o defecto sea revelada.

Uno de los más usados es el NITAL, (ácido nítrico y alcohol), para la gran mayoría de los metales ferrosos.

2.15.6.- Microscopia.

Utilización de microscopios estéreos (que favorecen la profundidad de foco y permiten por tanto, visión tridimensional de el área observada) con aumentos que pueden variar de 5x a 64X.

El principal instrumento para la realización de un examen metalográfico lo constituye el microscopio metalográfico, con el cual es posible examinar una muestra con aumentos que varían entre 50x y 2000x.

2.15.6.1.- El microscopio metalográfico.

Debido a la opacidad de los metales y aleaciones, opera con la luz reflejada por el metal. Por lo que para poder observar la muestra es necesario preparar una probeta y pulir a espejo la superficie.

Existe una norma internacional ASTM E - 112 que trata sobre las correctas técnicas de Metalografía.

2.16.- Análisis Macroscópico.

El examen macroscópico de los metales tiene por objeto el detectar los defectos que pueden presentarse en una sección o parte de una pieza metálica detectables a simple vista o utilizando elementos de observación con aumentos máximos de 10X.

Es muy frecuente la necesidad de conocer si las uniones soldadas están sanas o no. Con ataque adecuado es posible revelar la soldadura y determinar si ha sido bien realizada o tiene defectos ocasionados por porosidades, mala fluidez de la soldadura, etc.

2.16.1.- Técnica de evaluación para análisis macroscópico.

Para la preparación de un espécimen macrográfico se realiza el siguiente procedimiento:

Se escoge y localiza la sección a ser estudiada aquí interviene el criterio del operador, dependiendo de las fallas que se quieran estudiar. Así, se pueden realizar (y normalmente se realiza un corte transversal y un corte longitudinal).

En el corte transversal se observan defectos como: forma e intensidad de las segregaciones, forma e intensidad de las dendritas, ciertos detalles de soldaduras en chapas, profundidad de temple, posición, formas y dimensiones de las porosidades, entre otros.

En el corte longitudinal, se observan defectos como: si la pieza ha sido fundida o laminada, si la pieza fue estampada o torneada, si la pieza fue recalentada, entre otros.

Se realiza una preparación de espécimen, dejando la superficie plana por desbaste grueso y luego desbaste fino.

Se ataca la superficie con un reactivo químico adecuado. Puede ser yodo en yoduro de potasio al 10%. Se ataca la pieza y luego se pasa por agua corriente hasta eliminar el exceso de reactivo. Se seca con un paño limpio, se seca con aire. A

continuación se muestra en la tabla 2.4 con las recomendaciones de reactivos para ataque según defecto o caracterización a observar. El material base es acero.

Tabla 2.4. – Ataques recomendados para piezas de acero, según los defectos a observar.

Aplicación	Composición	Modo de empleo	Defectos observados
Orientación de fibras	Solución de persulfato amónico en agua al 10 / 20%	Superficie desbaste fino. Untar con la solución recién hecha por medio minuto.	Fibra y grano.
	Solución de ácido clorhídrico en agua al 50%	Ataque a 70 – 80°C. Superficie desbaste grueso	Orientación de la fibra.
Grano	1,5g de cloruro cúprico, 30mL de ácido clorhídrico, 95mL agua, 30mL de alcohol etílico.	Superficie pulida	Muestra el contraste del grano.
Penetración del temple	Solución del ácido nítrico en el alcohol al 5%.	Ataque a 70 – 80°C. durante 15-16s, para suspender y proteger la pieza, sumergir en chorro de agua y luego en solución débil de NH ₄ OH y luego en otra de aceite soluble y secar con corriente de aire.	Profundidad del temple, especialmente en aceros al carbono. Produce un buen contraste entre las zonas.

Tabla 2.4. – Ataques recomendados para piezas de acero, según los defectos a observar. (Continuación)

Heterogeneidad	Solución de ácido clorhídrico en agua al 50%	Sumergir la muestra a 70-80°C por media hora – una hora. Superficie pulida.	Muestra la heterogeneidad en general.
Grietas interiores	Solución de ácido clorhídrico en agua.	Sumergir la muestra a 70-80°C por media hora – una hora.	Grietas internas y control del temple.
Inclusiones	Solución de ácido sulfúrico en agua al 10%	Ataque en frío para grandes superficies durante 24 horas. Superficie desbaste fino.	Inclusiones, sopladuras, poros y rechupes.
Segregaciones	Solución de ácido pícrico en el alcohol etílico al 3%	Ataque a temperatura ambiente dura 4-5 horas. Superficie desbaste fino.	Segregaciones
Defectos y dendritas	Solución de ácido clorhídrico en agua al 50%	Ataque a 70-80°C durante media hora al menos. Superficie desbaste grueso.	Estructura dendrítica
Reactivo universal	500mL de ácido clorhídrico, 70mL de ácido sulfúrico y 180mL de agua.	Ataque a 70-80°C durante media hora al menos. Superficie desbaste grueso.	Buen reactivo universal.

Tabla 2.4. – Ataques recomendados para piezas de acero, según los defectos a observar. (Continuación)

<p>Segregación de azufre (Impresión Bauman)</p>	<p>Sumergir papel fotográfico a base de bromuro de plata en ácido sulfúrico al 5% por 5min. Colocarlo sobre superficie plana con la cara gelatinosa hacia arriba. Hacer contacto con la superficie de la pieza desbaste fino por espacio de un minuto. Separar y lavar el papel en solución fijadora.</p>	<p>Manchas pardas en el papel indican la distribución de los sulfuros.</p>	<p>Distribución de azufre en el acero.</p>
<p>Deformaciones, líneas.</p>	<p>6g de cloruro cúprico, 6g cloruro férrico, 10 mL de ácido clorhídrico y 100mL de alcohol etílico.</p>	<p>Calentar la muestra a 200°C y sumergir la superficie en la solución. Superficie desbaste grueso.</p>	<p>Deformaciones.</p>

Fuente: Guía de laboratorio de materiales. Prof. Militza J. Iriza Castro. Edición 2008

CAPÍTULO 3

Marco Metodológico

Este capítulo, recopila la información necesaria acerca del tipo de investigación y de los procedimientos a seguir para el desarrollo del estudio, presentándolos a su vez de manera ordenada y lógica teniendo esto, consecuencias inmediatas sobre el correcto progreso de la investigación.

3.1.- Nivel de la Investigación.

La presente investigación es de tipo descriptiva explicativa, donde se busca relacionar el efecto producido en la generación de esfuerzos mecánicos en la soldadura por causa del cambio de recubrimiento del material de aporte; y con ello, establecer una relación causa-efecto que permita elaborar resultados y conclusiones que profundicen la investigación; siendo así ésta, material fundamental en la elaboración de estudios futuros.

3.2.-Diseño de la Investigación.

En ésta investigación se pretende determinar de una manera experimental, el efecto que produce el recubrimiento del material de aporte en la generación de

esfuerzos mecánicos en un proceso de soldadura con electrodo revestido; de tal manera, que esos esfuerzos puedan ser cuantificados.

3.2.1.- Determinación Experimental de los Esfuerzos Mecánicos.

Para determinar los esfuerzos mecánicos experimentalmente es necesario realizar la siguiente metodología:

3.2.1.1.- Selección del material para las probetas.

El material que se utilizó para la realización de las probetas es acero ASTM-A36, preestablecido como material de estudio para este caso, cuyas propiedades mecánicas son: límite de fluencia de 250 MPa, límite de rotura de 450 MPa, resistencia a la tracción mínima de 400 MPa y resistencia a la tracción máxima de 550 MPa (ASTM, 2004).

3.2.1.2.- Mecanizado de las probetas.

El mecanizado se realizó cumpliendo con las recomendaciones ofrecidas por la norma ASTM E-8, la cual indica las dimensiones requeridas para la realización del ensayo de tracción. Se mecanizaron 32 probetas para determinar los esfuerzos mecánicos experimentalmente; de las cuales, se utilizaron 2 probetas sin soldar para evaluar el comportamiento del material. Se emplearon 10 probetas soldadas por cada tipo de recubrimiento en el material de aporte; donde, 5 de ellas son testigos y las otras 5 son las no testigos.

A las probetas testigos se les realizó un tratamiento térmico de Recocido para aliviar las tensiones, antes y después de realizar el cordón de soldadura. Las probetas no testigos reciben el tratamiento térmico de recocido sólo antes de realizarse el cordón; con la finalidad de que queden presentes los esfuerzos generados al realizar dicho cordón de soldadura.

AISI	1010 al 1020	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
------	--------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	--

(*) Posición a soldar; plana, horizontal y filete

(**) Electrodo con bajo hidrógeno

A1 Electrodo de acero con 0,5% de Molibdeno

C1 Electrodo de acero con 2,5% de Niquel y 1,2% de Manganeso

Fuente: Compendio de normas para productos de acero (Gerdau Aza primera edición, 2002)

3.2.1.4.-Selección de los tipos de revestimiento del material de aporte.

Los recubrimientos del material de aporte se seleccionaron tomando en cuenta las recomendaciones de la AWS, obtenidos del ASM Metals Handbook Volumen 6 Welding, Brazing, and Soldering para la soldadura por arco eléctrico protegido con electrodo y de la accesibilidad de los mismos.

En éste estudio se tomaron en cuenta tres tipos de revestimiento existentes según la norma A.W.S.; siendo estos de tipo: celulósico, rutílico y de bajo hidrógeno.

En base a lo establecido anteriormente y al sistema de clasificación A.W.S para electrodos de acero al carbono mostrado en la figura 3.2 se seleccionan los siguientes electrodos:

E6010: Electrodo de revestimiento celulósico que genera alta energía en el arco, lo cual asegura una penetración en todas las posiciones. Sus depósitos están libres de poros e inclusiones de escoria.

E6013: Electrodo de revestimiento rutílico que presenta arco estable de un muy fácil encendido y reencendido. Penetración mediana con cordones convexos y de muy buena apariencia, con muy baja salpicadura y escoria autodesprendible.

E7018: Electrodo de revestimiento básico con alto contenido de hierro en polvo. Sus depósitos de bajo hidrógeno, tenaces, resistentes al agrietamiento libres de poros e inclusiones de escoria. Presenta arco estable de poca salpicadura, cordones de apariencia uniforme con fácil remoción de escoria

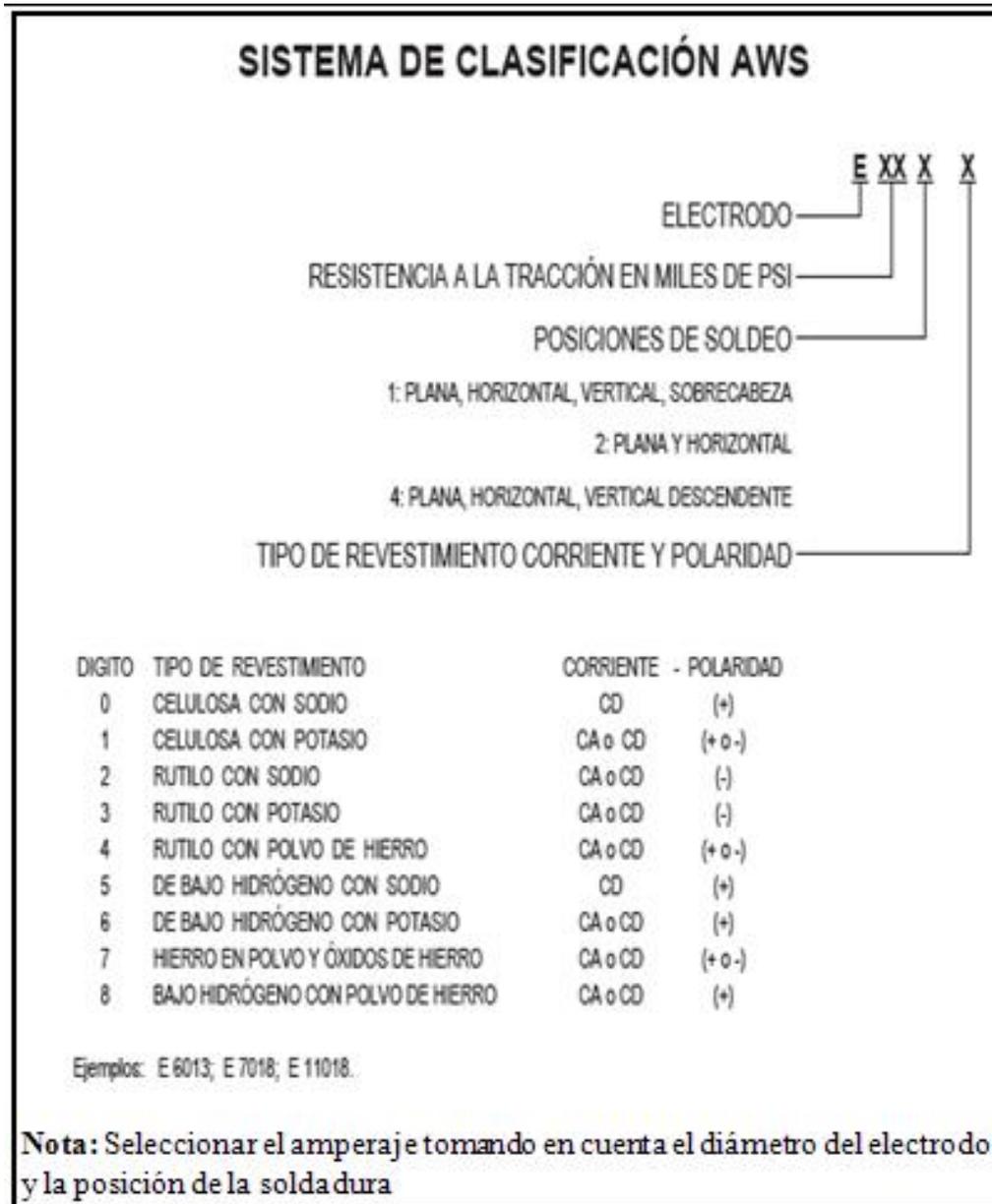


Figura 3.2- Clasificación A.W.S. Electrodo de acero al carbono
Fuente: Metals Handbook Volumen 6 Welding, Brazing, and Soldering

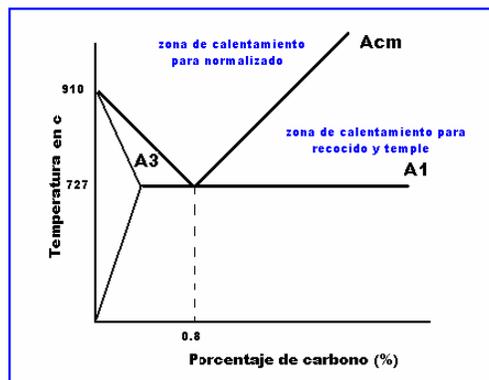
Cada uno de estos Electrodo posee un tipo de revestimiento diferente, los cuales son necesarios para llevar a cabo ésta investigación, además; son electrodo comerciales y se encuentran entre los recomendados para soldar el material base seleccionado, las propiedades de cada electrodo seleccionado se mencionan a continuación en la tabla 3.2

Tabla 3.2. Propiedades de los Electrodo seleccionados

Electrodo	Composición química (%)			Resistencia a la tracción (N/mm ²)	Limite elástico (N/mm ²)	Alargamiento (%)	Resistencia al impacto (N.m) a -30°C
	C	Mn	Si				
E6010	0,1	0,6	0,3	510-580	430-490	24-28	40-60
E6013	0,1	0,50-0,80	0,3	510-560	420-480	23-27	No requerida por A.W.S.
E7028	0,08	1-1,4	0,30-0,60	540-610	450-510	25-29	120-160

3.2.1.5.- Tratamiento térmico de las láminas de acero ASTM A36.

Se realizó un tratamiento térmico de recocido con una temperatura de 850°C. Con el propósito de lograr una pieza con la máxima resistencia mecánica sin aumentar apreciablemente la dureza; para ello, se tomó en cuenta el diagrama hierro – carbono que se observa en la figura 3.3 y el porcentaje de carbono presente en el acero ASTM A36. Este tratamiento térmico es el más recomendado para realizar posteriores mecanizados al material

**Figura 3.3.-** Diagrama Hierro – Carbono del acero.

Fuente: Guía de laboratorio de materiales de la Prof. Militza J. Iriza Castro

Posteriormente se mantiene a esa temperatura por un tiempo que dependerá del espesor de la probeta; es decir, de 1 a 2 minutos por cada milímetro de espesor, por lo que la probeta dura dentro del horno 8 minutos; para finalmente dejarlas enfriar dentro del horno. (Prof. Militza J. Iriza Castro)

Este tratamiento se realizó a las láminas de acero ASTM – A36 antes de realizar el proceso de soldadura, para eliminar las tensiones acumuladas durante el corte y biselado de las mismas. Las láminas de acero ASTM – A36 después del tratamiento térmico se observan en la figura 3.4.



Figura3.4. Láminas de acero ASTM A36 después del Tratamiento térmico.

3.2.1.6.- Soldadura de las probetas.

Las probetas fueron soldadas a tope; con borde en V en las dos caras de la lámina para garantizar la penetración adecuada del electrodo en el material base, utilizando el método de soldadura manual, por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW). En donde, el ancho de cada cordón de soldadura es aproximadamente 9 mm y de alto 4 mm, con una separación de 3 mm y un bisel con un ángulo de 60°. El diseño del cordón de soldadura se observa en la figura 3.5.

La sujeción de la probeta se realizó mediante un dispositivo, el cual impide la libre dilatación y contracción de la misma durante la aplicación del calor en el proceso de soldadura.

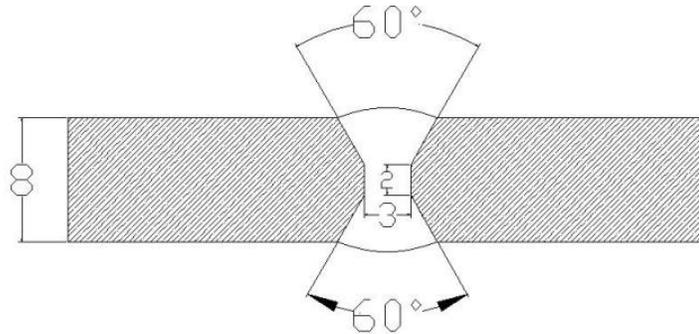


Figura 3.5.- Diseño del cordón de Soldadura

Se soldaron tres grupos de probetas A, B y C con diferentes recubrimientos en el material de aporte; y de 10 probetas cada uno. El cordón de soldadura realizado en las láminas de acero ASTM – A36 para cada grupo de probetas, se observan en las figuras 3.6 a 3.8.



Figura 3.6.- Plancha A soldada con E6010.



Figura 3.7.- Plancha B soldada con E6013



Figura 3.8.- Plancha C soldada con E7018.

Los parámetros para la construcción de la soldadura se mantienen constantes; como: intensidad de corriente, voltaje, número de pasadas, material base, diámetro del electrodo tipo de corriente y polaridad (Ver tabla 3.3). Excepto el tipo de recubrimiento del material de aporte.

Tabla 3.3. Parámetros para la construcción de la soldadura.

Tipo de Recubrimiento	tiempo (s)	Diámetro del electrodo (pulg)	Voltaje (V)	Intensidad de Corriente (A)	Tipo de corriente	Polaridad
Celulósico (E6010)	95	5 / 32"	25	130	Corriente Directa	Negativa
Rutílico (E6013)						
Bajo hidrógeno (E7018)						

Para la selección del diámetro del electrodo e intensidad de corriente se toman en cuenta los valores de la tabla 3.4:

Tabla 3.4. Selección del Diámetro del electrodo e Intensidad de corriente según el espesor de chapa.

Espesor de chapa (mm)	Diámetro del Electrodo (Pulg)	Intensidad (A)
2 a 4	3/32 a 1/8	60-100
4 a 6	1/8 a 5/32	100-150
6 a 10	5/32 a 3/16	150-200

Fuente: Metals Handbook Volumen 6 Welding, Brazing, and Soldering

El tipo de corriente y polaridad se obtuvieron del sistema de clasificación A.W.S para electrodos de acero al carbono (figura 3.2). El tiempo de pasada y velocidad de pasada se obtuvieron de manera experimental durante la realización de los cordones de soldadura.

3.2.1.7.- Tratamiento térmico de las probetas soldadas.

Se realiza un tratamiento térmico de recocido para aliviar las tensiones producidas por el proceso de soldadura, con una temperatura de 595°C tomando en cuenta las recomendaciones de la norma ASME, sección VIII edición; 2007.

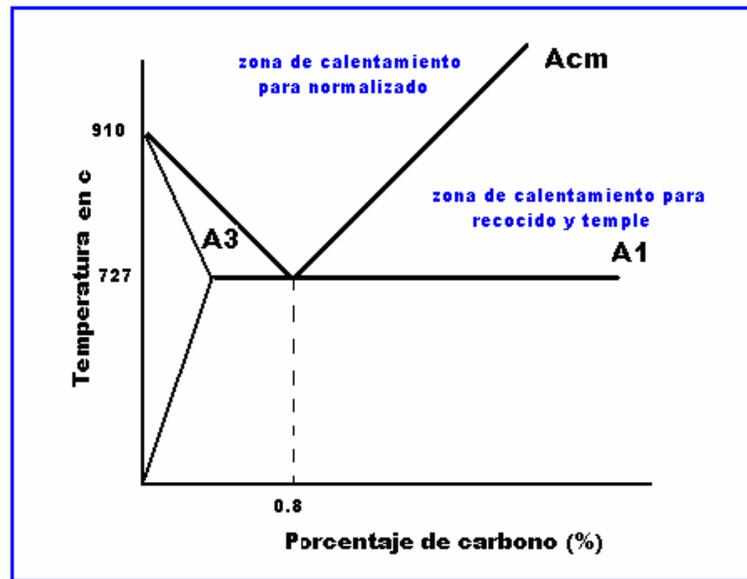


Figura 3.9.- Diagrama Hierro – Carbono del acero.

Fuente: Guía de laboratorio de materiales de la Prof. Militza J. Iriza Castro

Posteriormente se mantiene a esa temperatura por un tiempo que dependió del espesor de la probeta; es decir de 1 por cada milímetro de espesor para que la temperatura sea la misma en toda la probeta, por lo que cada una de ellas dura dentro del horno 8 minutos, para finalmente dejarlas enfriar dentro del mismo.

Este tratamiento se realizó a probetas después de realizar el cordón de soldadura, para eliminar las tensiones acumuladas por el mecanizado y por la soldadura; estas se denominan probetas testigo.

Las probetas no testigos o con esfuerzos no se les realizó el tratamiento térmico de recocido, con la finalidad de que queden presentes los esfuerzos generados al realizar el cordón de soldadura.

3.2.1.8.- Ensayo de Dureza

Para realizar el ensayo de dureza se realizó el siguiente procedimiento descrito por la norma ASME E 384:

3.2.1.8.1.- Preparación de las probetas para el ensayo de microdureza Vickers

La preparación del material bajo prueba debe controlarse cuidadosamente para evitar cualquier alteración en su dureza. La superficie de prueba de la probeta debe ser tal que la carga pueda aplicarse perpendicular a ella. La superficie debe estar limpia, seca, libre de óxido, porosidades y material extraño que pudiera aplastarse o fluir abajo la presión de la prueba y afectar los resultados.

El proceso de preparación de la probeta para el ensayo de microdureza consiste en un desbaste y pulitura para remover óxidos, impurezas superficiales, poros y ralladuras profundas presentes en ellas.

La actividad comienza con un desbaste desde un tamaño de grano grueso N° 120, pasando por uno de número N°240 y N°320 respectivamente, y por último se utilizó un tamaño de grano N° 600, dejando totalmente pulida la superficie de la probeta en la que se requiere trabajar.

3.2.1.8.2.- Identificación de los puntos de medición de dureza superficial de las probetas para la posterior comparación con las galgas.

Para identificar los puntos de medición de la dureza superficial se tomó sólo en cuenta la parte superior de la probeta y la zona donde estará ubicada la galga extensométrica (estará a 3 mm del cordón de soldadura y a 3,5 mm del borde de la probeta, coincidiendo así el eje neutro de la galga con el eje neutro de la probeta).

Se trazaron dos líneas paralelas al cordón de soldadura ubicadas una a 1mm del borde superior y la otra a 1 mm del borde inferior de la galga, marcando sobre cada una de ellas 2 puntos que estuvieron separados entre sí 3 mm y cada uno distanciado 1,5 mm del eje neutro de la probeta. Luego se trazaron dos líneas perpendiculares al cordón de soldaduras separadas una a 1mm del borde izquierdo y la otra a 1 mm del borde derecho de la galga; se marcaron sobre cada una de ellas dos puntos distanciados entre sí 3 mm, uno de ellos ubicado a 2 mm por debajo del borde superior de la galga y

el otro a 2 mm por encima del borde inferior de la galga. Quedando finalmente la distribución de los 8 puntos como se muestra en la figura 3.10

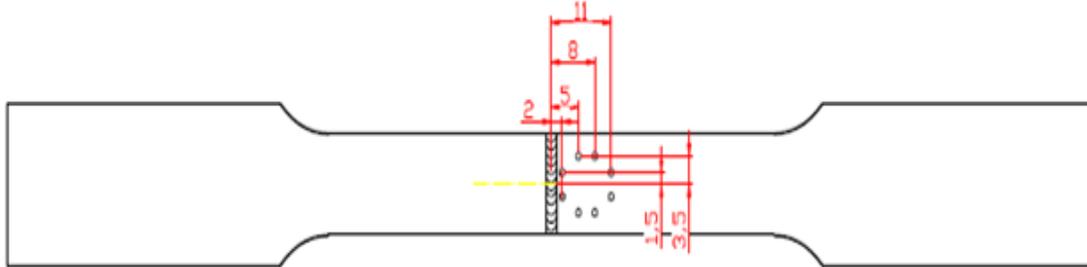


Figura 3.10.- Distribución de los puntos de medición de dureza de la probeta [fuente propia]

La distribución de los puntos de medición observada en la figura 3.10, se realizó con la finalidad de obtener un promedio del valor de microdureza vickers en la zona adyacente a la galga extensométrica, para lograr realizar una comparación entre los dos métodos de medición de esfuerzo residual.

3.2.1.8.2.- Identificación de los puntos de medición de dureza superficial de las probetas para evaluar el comportamiento longitudinal

Para obtener el comportamiento longitudinal de la dureza superficial a medida q se aleja del cordón de soldadura se realizó la distribución de los puntos de medición de la figura 3.11.

Para identificar dichos puntos de medición de dureza superficial, se tomó sólo en cuenta la parte superior de la probeta a partir de 2 mm del cordón de soldadura; para ello, se trazaron 8 líneas paralelas al cordón de soldadura con una separación de 2 mm entre ellas, en la cuales se marcaron 5 puntos espaciados 2 mm entre ellos y 1mm del borde de la probeta, como se muestra en la figura 3.11



Figura 3.11.- Distribución de los puntos de medición de dureza de la probeta para evaluar comportamiento longitudinal [fuente propia]

3.2.1.8.3.- Mediciones de durezas a realizar.

Se realizaron mediciones de dureza a 2 probetas sin soldar para adquirir una referencia del comportamiento del material de estudio (acero ASTM A36); y a las tres probetas de cada grupo A, B y C tanto testigos como no testigos en los puntos identificados en la figura 3.11; tomando como resultado un promedio de éstas tres mediciones, y obtener una tabla para cada uno de ellos.

Debido a las dimensiones de las probetas a estudiar se realizaron mediciones superficiales de dureza Vickers (con indentador punta de diamante) con una precarga de 50 Kg. mediante el durómetro digital Micro Hordness Tester marca Buehler (figura 3.11) ubicado en la empresa DANA Ejes y Cardanes situada en la Zona Industrial de Valencia Edo. Carabobo.



Figura 3.12.- Durómetro digital Micro Hordness Tester [fuente propia]

3.2.1.8.4.- Obtención de esfuerzos residuales mediante del ensayo de microdureza Vickers.

Para obtener el valor del esfuerzo residual generado por el proceso de soldadura se empleó la teoría de Masubushi K. donde; se plantea que la tensión residual es proporcional a la deformación del material; lo cual se puede definir por la siguiente ecuación.

$$\sigma_{residual} = Sy_{PT} - Sy_{PNT} \quad 3.1$$

Donde:

$\sigma_{residual}$ = esfuerzo residual en el punto de medición (MPa)

Sy_{PT} = límite de fluencia del acero ASTM - A36 para las probetas a la cual se les realizó el tratamiento térmico (probetas testigos. Unidades en MPa).

Sy_{PNT} = límite de fluencia en el punto de medición del material soldado (MPa)

Una vez conocida la dureza en los diferentes puntos del material para cada una de las probetas testigo y no testigos, y con la ecuación 3.1, se obtiene que:

$$Sy_{PT} = (-90,7 + 2,876HV_{PT}) \quad 3.2$$

$$Sy_{PNT} = (-90,7 + 2,876HV_{PNT}) \quad 3.3$$

Las expresiones 3.2 y 3.3 son las ecuaciones que ofrecen la relación entre el esfuerzo residual presente en un punto y la dureza en escala Vickers para el acero ASTM A36 tanto en una probeta testigo y una probeta no testigo respectivamente.

3.2.1.9.-Ensayo de Tracción.

En el ensayo de tracción realizado se empleó como método de medición las galgas extensométricas; con la finalidad de obtener un esfuerzo residual generado durante el proceso de soldadura que no se vería reflejado sin su utilización, pues éstas garantizan mayor precisión de los resultados obtenidos.

3.2.1.9.1.-Preparación de la probeta para la realización del ensayo de tracción con galgas extensométricas

La superficie donde va a estar ubicada la galga extensométrica debe estar limpia, seca, libre de óxido, porosidades y material extraño para garantizar la buena adherencia de éstas. Es por ello; que se realizó un acabado superficial mediante el uso de abrasivo con un tamaño de grano de 600.

Una vez obtenida la superficie adecuada para una perfecta adherencia de las galgas extensométricas; se procedió a realizar los ejes de simetrías que se utilizaron como referencia para la ubicación de las mismas. Para ello; se trazó un eje de simetría perpendicular al cordón de soldadura y un eje auxiliar perpendicular a dicho eje, ubicado a una distancia de 2 mm del cordón como se observa en la figura 3.13



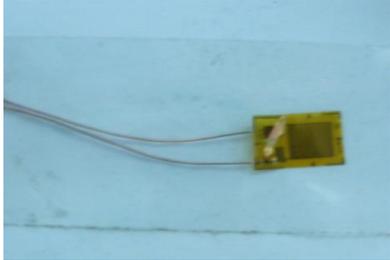
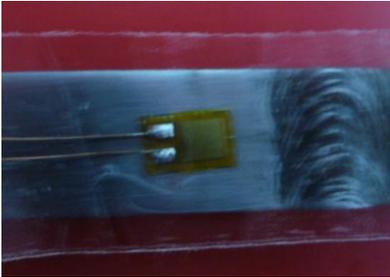
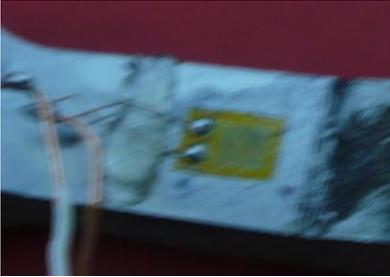
Figura 3.13.- Demarcación de los ejes centrales de la probeta, para la posterior colocación de las galgas.

Al trazar los ejes mencionados anteriormente se logró puntualizar la ubicación de las galgas y de esta manera se garantizó que todas se encontraran posicionadas en el mismo lugar de las probetas (zona del ensayo de dureza). Una vez establecida la ubicación, se procedió a verificar que el área donde se colocaron las galgas está totalmente libre de impurezas; es por ello, que se limpia la superficie con alcohol en un solo sentido y dirección.

3.2.1.9.2.-Instrumentación de la probeta para la realización del ensayo de tracción con galgas extensométricas

Para la fijación de las galgas extensométricas a las probetas se emplea el procedimiento descrito en la tabla 3.5.

Tabla N 3.5 Procedimientos para una correcta adherencia de las galgas sobre la probeta [fuente propia]

Procedimientos	Imágenes ilustrativas
<p>Se adhiere la galga a una cinta plástica adhesiva</p>	
<p>Se centra la galga sobre los ejes trazados en la probeta y se adhiere la cinta plástica con la galga a la probeta.</p>	
<p>Se desprende uno de los extremos de la cinta adhesiva levantando completamente la galga sin desprender el otro extremo de ella y se aplica una capa de resina epóxica sobre la galga para una mejor adherencia de las dos superficies en contacto. (evitando que al adherir la galga con la resina a la probeta queden burbujas de aire entre las dos superficies)</p>	
<p>Retirar cuidadosamente la cinta adhesiva, dejando finalmente la galga adherida a la probeta para finalmente soldar cuidadosamente con estaño los terminales de las galgas a cables.</p>	

3.2.1.9.3.- Ensayo de tracción con galga extensométrica

Luego de la preparación e instrumentación de las probetas, se realizó el ensayo de tracción con las galgas extensométricas que permitió obtener las deformaciones generadas al aplicarle una carga establecida y así poder obtener los esfuerzos residuales. El ensayo se ejecutó con una máquina universal de ensayo de materiales marca Tinius Olsen, constituida por dos mordazas, una fija o adosada a tierra y otra móvil actuada mediante un sistema neumático ubicada en el laboratorio de calidad de la empresa Tuboauto Dana de Venezuela C.A. Este ensayo se realizó tomando en cuenta el procedimiento descrito por la norma ASTM E8.

Todo los materiales y los equipos electrónicos necesarios para el procesamiento de la información relacionada con el ensayo tracción y galgas extensométricas; tales como: destornilladores, alicate, cables, circuito eléctrico (puente de wheatstone), multímetro de alta precisión, fuente para el voltaje de excitación, papel milimetrado (para obtener las gráficas de los puntos suministrados por la máquina), se trasladaron a la empresa Tuboauto Dana de Venezuela, C.A. Sucesivamente, se instaló firmemente la probeta con el circuito instalado en las mordazas de la prensa, las cuales son estriadas con la intención de evitar posibles deslizamientos mientras se aplica el ensayo de tracción.



Figura 3.14.- Máquina universal de ensayo de materiales marca Tinius Olsen,

Para iniciar el ensayo de tracción es necesario conocer el comportamiento real del material sin ser soldado y libre de tensiones con la finalidad de obtener la zona de

fluencia del mismo; es por ello que inicialmente, se realizó el montaje de una probeta sin ser soldada y libre de tensiones.

Una vez conocida la zona de fluencia; se observó la deformación máxima obtenida en dicha zona para fijar un valor de deformación que fué empleado para la toma de los datos a obtener por las galgas. Una vez fijada la probeta a la máquina con el circuito, se comenzó el ensayo con una carga de 0 kg y se mide el voltaje presente para dicha carga, con éste procedimiento se obtuvo el cero mecánico a partir del cual se va a contabilizar la variación del voltaje en función del incremento de carga. Después de calibrado el equipo y alcanzado el cero mecánico, se fija la deformación que será el 50% de la obtenida en el límite elástico y así garantizar que los resultados a obtener se encuentren en la zona elástica del material.

Se realizó la tracción de las probetas hasta obtener el valor de deformación establecido por el primer ensayo; y así tomar los valores de voltaje suministrados por el circuito.

3.12.- Obtención de los esfuerzos Residuales mediante galgas extensométricas

Mediante el ensayo de tracción por galgas realizado, se obtuvieron directamente distintos valores de voltaje para cada deformación establecida en las probetas ensayadas, que fueron sustituidos en la ecuación 3.4; que se obtuvo, de relacionar el cálculo del valor de la resistencia de una galga extensométrica en el Puente de Wheatstone para lograr determinar la deformación real de la probeta.

$$\varepsilon = \frac{4 \times V_s}{K_s \times V_e} \quad 3.4$$

ε : Deformación (mm)

V_s : Voltaje de Salida (V)

K_s : Factor de Galga = $2,8 \pm 0,5$

V_e : Voltaje de entrada (V) = 6 V

Con los valores determinados mediante la ecuación 3.4; se obtienen sustituyendo en la ecuación que describe la Ley de Hooke (Ecuación 3.5), el esfuerzo presente en las probetas testigos y no testigos.

$$\sigma = \varepsilon * E \quad 3.5$$

Donde,

σ : Esfuerzo (MPa)

ε : Deformación Unitaria

E : Módulo de Young (MPa)

Al obtener los esfuerzos mediante la ecuación de Hooke tanto para las probetas testigo como no testigo; se determinaron los esfuerzos residuales aplicando la siguiente ecuación descrita por Masubuchi K.:

$$\sigma_{res} = \sigma_T - \sigma_{NT} \quad 3.6$$

Donde,

σ_{res} : Esfuerzo Residual. (MPa)

σ_T : Esfuerzo Aplicado para la probeta testigo (MPa)

σ_{NT} : Esfuerzo Aplicado para la probeta No testigo (MPa)

3.2.1.10.-Análisis Metalográfico.

El ensayo metalográfico se realizó para revelar la estructura verdadera de la zona afectada por el proceso de soldadura y la zona de fusión.

3.2.1.10.1.-Preparación de las probetas para el análisis metalográfico.

Se escogió y localizó la sección a ser estudiada (Zona afectada por el proceso de soldadura) haciendo un corte transversal a la soldadura realizada para cada tipo de probeta. Para evaluar la superficie de las muestras, se requirió de una imagen precisa de la zona a analizar; es por ello, que la superficie debió estar completamente limpia, sin deformación, rayas, manchas, entre otros. Para esto, se realizó un desbaste fino comenzando de un tamaño de grano de 120, 240, 320, 400, 600 respectivamente.

3.2.1.10.2.-Ataque químico.

Para realizar la observación de la zona a tratar una vez pulida la probeta, se aplicó NITAL al 5% por 16 s (tabla 2.4); para luego, aplicarle a la superficie agua y alcohol. Con ayuda de un secador deshumedecer la superficie; para finalmente llevar a cabo, una reacción química que permitió observar en detalle la dilución de la soldadura. (Procedimiento tomado de la Norma ASTM E112 que indica el tiempo y tipo de reactivo adecuado según el defecto a caracterización a observar).

3.2.1.10.3.-Observación de la microestructura de la zona afectada por el proceso de soldadura.

Se realizó el análisis a una muestra de cada tipo de recubrimiento tanto para las probetas tratadas como no tratadas térmicamente; observando el porcentaje de perlita y ferrita que se encuentra dentro de la zona afectada por el calor; además de observó el tamaño de los granos en los alrededores del cordón de soldadura.

Se observaron las muestras ya preparadas mediante el microscopio metalográfico marca: OLYMPUS, modelo: PME3 (figura. 3.15) con una comparación entre microestructuras a 100X, 400X Y 1000X. Ubicado en la empresa Dana Ejes y Cardanes situada en la Zona Industrial de Valencia Edo. Carabobo.



Figura 3.15. Microscopio metalográfico

3.2.1.11.-Análisis Macroscópico.

El ensayo macroscópico se realizó para evaluar la dilución de la soldadura; es decir, conocer la zona en donde el material base fundido es incorporado a la soldadura.

3.2.1.11.1.-Preparación de las probetas para el análisis metalográfico.

Para realizar la observación de la microestructura de la zona afectada del material por el proceso de soldadura se tomaron las muestras ya atacadas en el análisis macroscópico (Procedimiento tomado de la Norma ASTM E112).

3.2.1.11.2.-Observación macroscópica de las muestras

Se observa la dilución de la soldadura para cada muestra preparada, mediante el ataque químico realizado anteriormente para el ensayo metalográfico. En donde, se evaluó el cordón de soldadura, la zona afectada por el calor y el material base.

CAPÍTULO 4

Resultados Experimentales

4.1.- Ensayos de dureza

4.1.1.-Ensayo de dureza superficial de las probetas para la posterior comparación con las galgas.

Este ensayo se realizó con la finalidad de obtener el comportamiento de la dureza del material a estudiar justo en la zona donde se coloca la galga extensométrica, según la distribución anexa en la figura 3.10

En las tablas 4.1 y 4.2, se muestran los resultados obtenidos de los promedios de las mediciones de microdureza Vickers para las probetas testigo y no testigo en cada tipo de recubrimiento.

Tabla 4.1 Datos promedios de la Microdureza Vickers de las probetas testigos

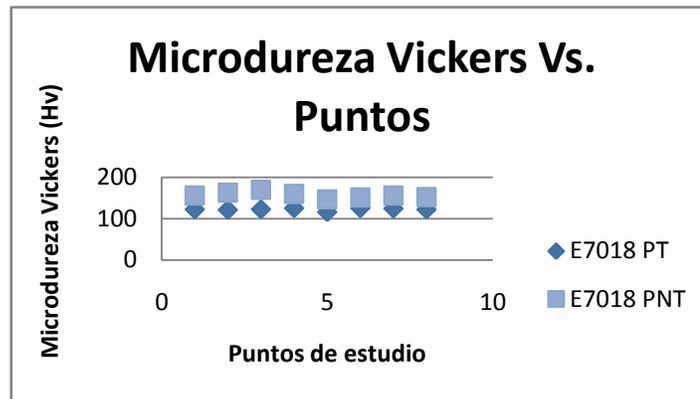
PUNTO	E6010 (Hv)	E6013 (Hv)	E7018 (Hv)
1	134,025	127,100	122,375
2	141,650	130,850	121,125
3	129,250	115,900	122,700
4	126,875	115,300	125,375
5	123,825	126,350	115,825
6	130,900	134,050	125,400
7	129,600	127,950	124,475
8	128,275	112,650	122,275

Tabla 4.2 Datos promedios de la Microdureza Vickers de las probetas no testigos.

PUNTO	E6010 (Hv)	E6013 (Hv)	E7018 (Hv)
1	161,675	143,025	156,375
2	154,600	158,950	163,300
3	149,950	165,200	169,925
4	142,750	140,375	159,925
5	142,075	142,600	146,725
6	139,250	148,900	151,200
7	154,275	159,850	155,750
8	153,575	141,100	152,275

Una vez obtenidos los datos de dureza, se prosigue a la representación gráfica de los valores logrados con el fin de observar la diferencia entre las probetas testigos y no testigos. Dicha representación se observan en las gráficas 4.1 a la 4.3.

**Gráfica 4.1.** Microdureza Vickers vs punto probetas soldadas con electrodo E6010**Gráfica 4.2.** Microdureza Vickers vs punto probetas soldadas con electrodo E6013



Gráfica 4.3. Microdureza Vickers vs punto probetas soldadas con electrodo E7018

4.1.2.- Cálculo experimental del límite de fluencia del material para las distintas composiciones del recubrimiento en el electrodo de las probetas para la posterior comparación con las galgas.

Se obtuvo por medio del ensayo de dureza el límite de fluencia del material base en estudio sustituyendo el resultado obtenido por éste (160 HV de dureza para el acero ASTM – 36), en la ecuación 3.2; resultando:

$$S_{y_0} = -90,7 + 2,876 * 160$$

El cual da como resultado: $S_{y_0} = 368,7 \text{ MPa}$

Se calculó el valor del límite de fluencia del material en cada probeta realizada, tanto para las probetas testigos como no testigos. En la tabla 4.3. y 4.4., se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 4.3. Límite de fluencia del material para las distintas composiciones del recubrimiento en el electrodo a las probetas testigo

PUNTO	E6010(Mpa)	E6013(Mpa)	E7018(Mpa)
1	294,755	274,839	261,250
2	316,685	285,624	257,655
3	281,020	242,628	262,185
4	274,195	240,902	269,878
5	265,420	272,682	242,412
6	285,768	294,827	269,950
7	282,029	277,284	267,290
8	278,218	233,281	260,962

Tabla 4.4. Límite de fluencia del material para las distintas composiciones del recubrimiento en el electrodo a las probetas no testigo

PUNTO	E6010(Mpa)	E6013(Mpa)	E7018(Mpa)
1	374,277	320,639	359,034
2	353,929	366,440	378,950
3	340,556	384,415	398,004
4	319,849	313,018	369,244
5	317,907	319,417	331,281
6	309,783	337,536	344,151
7	352,994	369,028	357,237
8	350,981	315,103	347,242

4.1.3.- Cálculo de esfuerzos residuales superficiales mediante ensayo de microdureza Vickers de las probetas para la posterior comparación con las galgas.

Los esfuerzos residuales superficiales se obtuvieron mediante la ecuación 3.1, donde SY_{PT} y SY_{NPT} se encuentran en la tabla 4.3 y 4.4 respectivamente. A continuación se muestran los datos de esfuerzos residuales obtenidos para cada punto de estudio.

Tabla 4.5. Esfuerzo residual en cada punto de estudio para las distintas composiciones del recubrimiento.

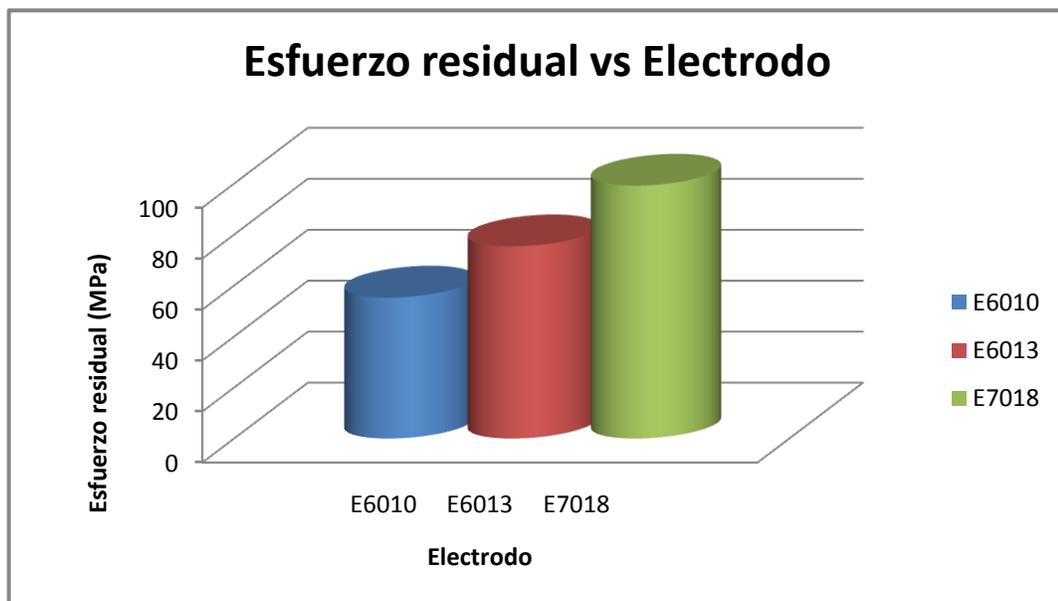
PUNTO	E6010(Mpa)	E6013(Mpa)	E7018(Mpa)
1	79,521	45,800	97,784
2	37,244	80,815	121,295
3	59,533	141,786	135,819
4	45,656	72,115	99,365
5	52,487	46,735	88,868
6	24,014	42,708	74,200
7	70,965	91,744	89,946
8	72,762	81,822	86,280

Se obtiene un valor único del esfuerzo residual para las distintas composiciones del recubrimiento realizando un promedio de los valores obtenidos para cada punto como se muestra en la tabla 4.6

Tabla 4.6. Esfuerzo residual promedio para las distintas composiciones del recubrimiento en el material de aporte

Tipo de recubrimiento	Esfuerzo Residual (Mpa)
E6010	55,300
E6013	75,400
E7018	99,200

En el gráfico 4.1 se representa el esfuerzo residual promedio. Se utilizó dicho valor con el fin de poder tener una referencia; para luego, realizar la comparación con los resultados que se obtendrán en el ensayo de tracción utilizando galgas extensométricas.



Gráfica 4.4. Esfuerzos residuales Vs Electrodo obtenido mediante el ensayo de microdureza

4.1.4 Medición de dureza superficial de las probetas para evaluar el comportamiento longitudinal

Este ensayo se realizó con el fin de poder obtener el comportamiento longitudinal de la dureza del material a estudiar, según la distribución anexa en la figura 3.11

En las tablas 4.7 y 4.8, se muestran los resultados de los promedios de las probetas testigo y no testigo para cada tipo de recubrimiento obtenida en las mediciones de microdureza Vickers.

Tabla 4.7 Datos promedios de la Microdureza Vickers de las probetas tratadas térmicamente

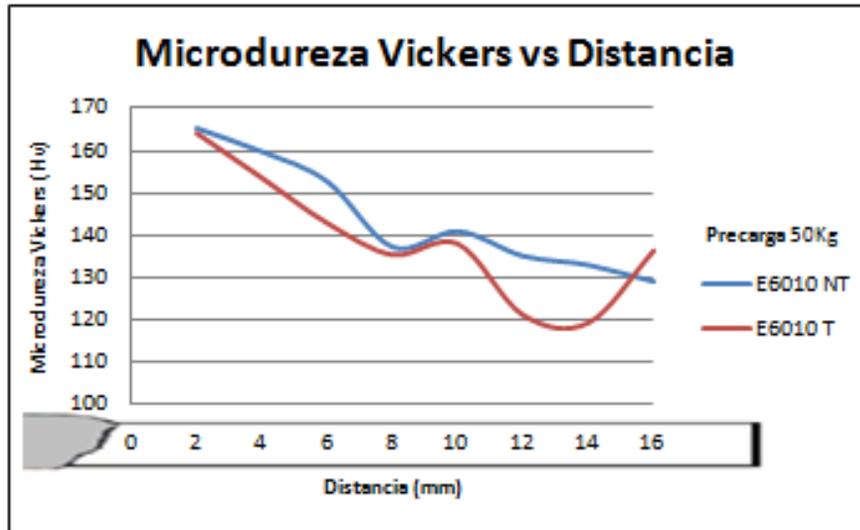
Distancia(mm)	E6010	E6013	E7018
2	164,400	165,100	166,500
4	153,800	159,600	168,430
6	143,100	152,600	146,300
8	135,600	137,200	156,200
10	138,200	140,900	139,800
12	121,300	135,100	124,000
14	119,500	133,000	155,200
16	136,600	129,100	152,800

Tabla 4.8 Datos promedios de la Microdureza Vickers de las probetas no tratadas térmicamente

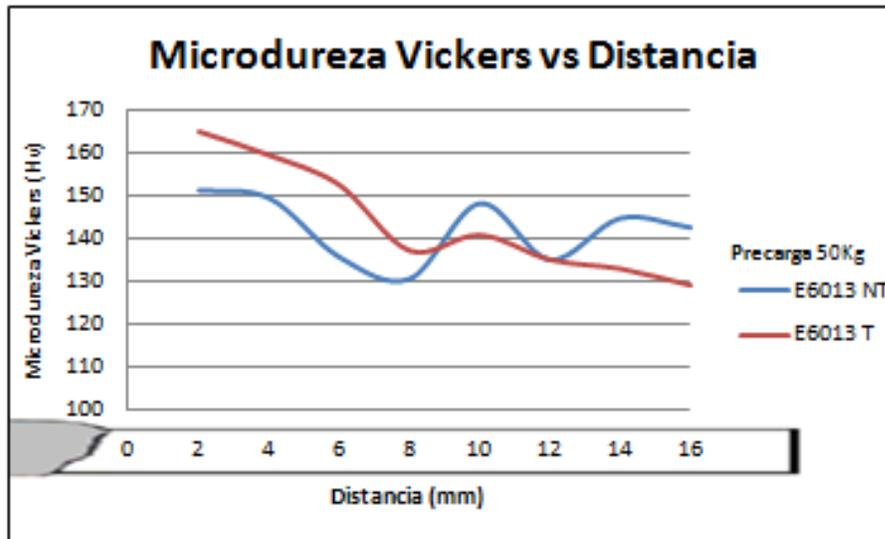
Distancia(mm)	E6010	E6013	E7018
2	165,100	151,400	161,900
4	159,600	149,500	184,200
6	152,600	135,600	179,900
8	137,200	130,500	126,900
10	140,900	148,300	147,800
12	135,100	135,000	150,000
14	133,000	144,800	152,800
16	129,100	142,600	169,800

Una vez obtenidos los datos de dureza, se prosigue a la representación gráfica de los valores logrados con el fin de observar el comportamiento de la dureza del material

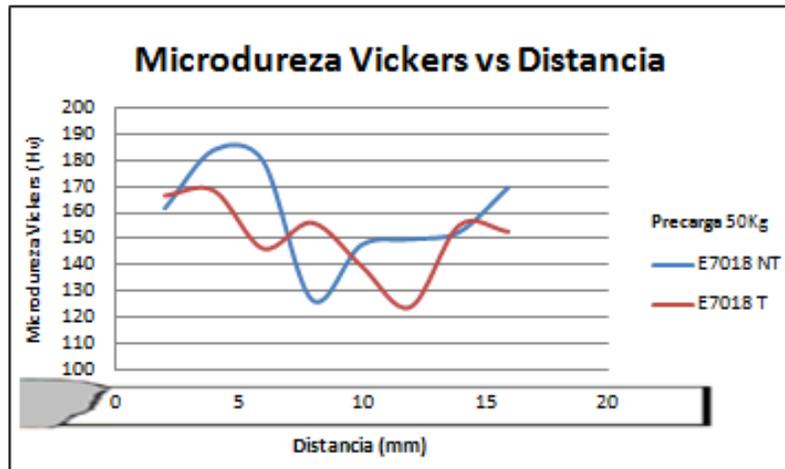
a medida que se aleja del cordón de soldadura. Dicha representación se observa en las gráficas 4.5 a la 4.7.



Gráfica 4.5. Microdureza Vickers vs Distancia probeta testigo y no testigo Para un electrodo E6010.



Gráfica 4.6. Microdureza Vickers vs Distancia probeta testigo y no testigo Para un electrodo E6013.



Gráfica 4.7. Microdureza Vickers vs Distancia probeta testigo y no testigo
Para un electrodo E7018.

4.1.5.- Cálculo experimental del límite de fluencia del material para las distintas composiciones del recubrimiento en el electrodo para evaluar el comportamiento longitudinal

Se calculó el valor del límite de fluencia del material en cada probeta realizada, tanto para las probetas testigos como no testigos. En la tabla 4.9. y 4.10., se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 4.9. Promedio del límite de fluencia del material para las distintas composiciones del recubrimiento en el electrodo a las probetas tratadas

Distancia(mm)	E6010 (Mpa)	E6013 (Mpa)	E7018 (Mpa)
2	159,000	366,584	374,900
4	126,200	272,251	439,200
6	118,700	250,681	426,800
8	148,300	335,810	274,300
10	136,600	302,161	334,500
12	131,000	286,056	340,700
14	145,400	327,470	348,700
16	140,900	314,528	397,500

Tabla 4.10. Límite de fluencia del material para las distintas composiciones del recubrimiento en el electrodo a las probetas no testigo

Distancia(mm)	E6010 (Mpa)	E6013 (Mpa)	E7018 (Mpa)
2	384,200	344,700	388,154
4	368,300	339,300	393,714
6	348,200	299,300	330,058
8	303,800	284,600	358,531
10	314,500	335,800	311,460
12	297,800	297,500	266,019
14	291,800	325,700	355,559
16	280,600	319,400	348,656

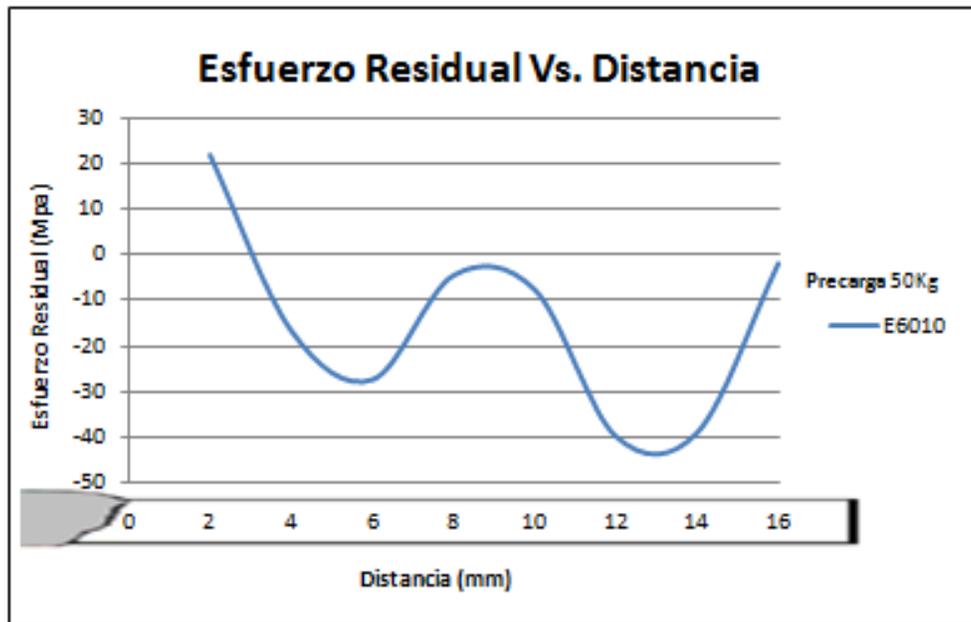
4.1.6.- Cálculo de esfuerzos residuales superficiales mediante ensayo de microdureza Vickers para evaluar el comportamiento longitudinal

Los esfuerzos residuales superficiales se obtuvieron mediante la ecuación 3.1, donde SY_{PT} y SY_{NPT} se encuentran en la tabla 4.9 y 4.10 respectivamente. A continuación se muestran los datos de esfuerzos residuales obtenidos para cada punto de estudio.

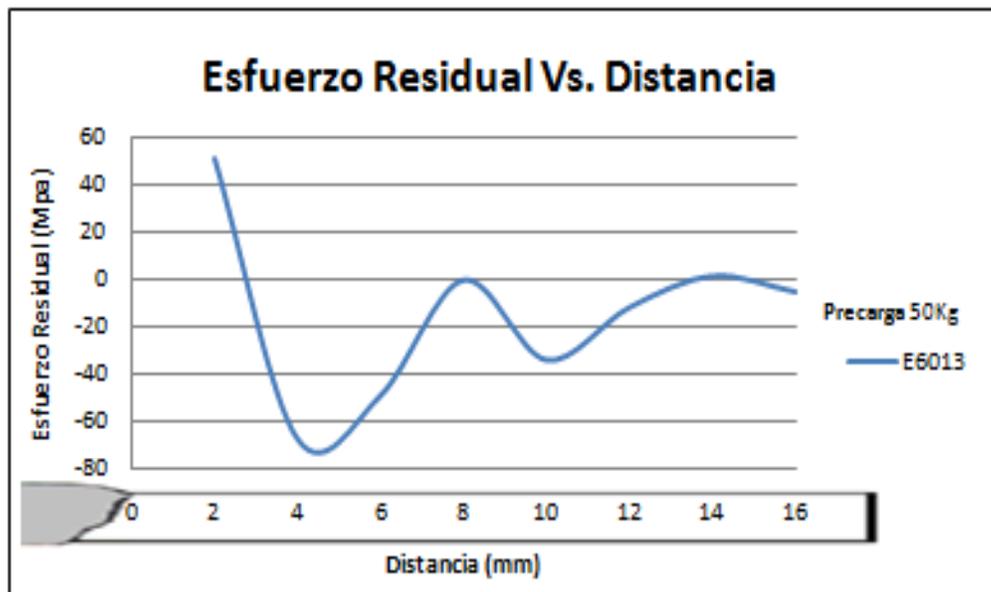
Tabla 4.11. Esfuerzo residual en cada punto de estudio para las distintas composiciones del recubrimiento.

Distancia(mm)	E6010	E6013	E7018
2	21,600	51,200	13,200
4	-16,700	-67,100	-45,400
6	-27,300	-48,600	-96,700
8	-4,600	21,800	84,200
10	-7,800	-33,600	-23,000
12	-39,700	-11,500	-74,700
14	-38,800	1,700	6,800
16	-2,100	-4,800	-48,900

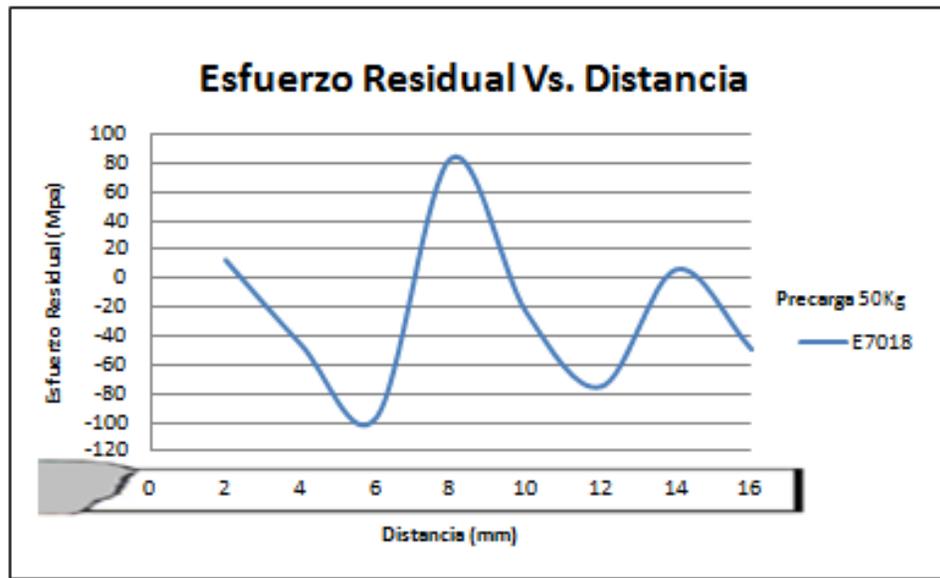
Los gráficos 4.8 al 4.10 representan el comportamiento del esfuerzo residual a medida que se aleja del cordón de soldadura.



Gráfica 4.8 Esfuerzos residuales Vs Distancia Electrodo E6010

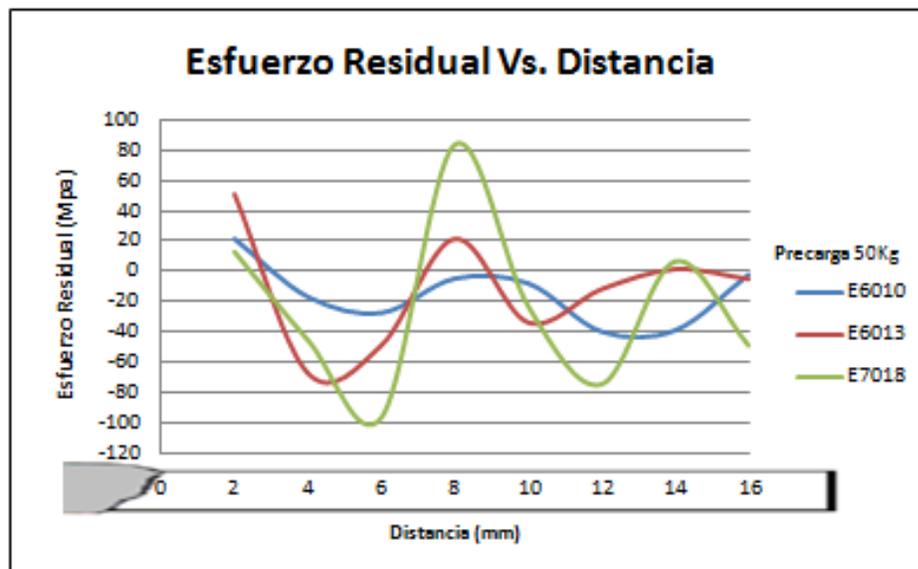


Gráfica 4.9 Esfuerzos residuales Vs Distancia Electrodo E6013



Gráfica 4.10. Esfuerzos residuales Vs Distancia Electrodo E7018

Para observar con claridad la variación de los comportamientos de esfuerzos residuales en los distintos tipos de recubrimiento es necesario representar gráficamente las tres curvas anteriores en un mismo gráfico como se muestra a continuación en el grafico 4.11.



Gráfica 4.11. Esfuerzos residuales Vs Distancia

4.2.-Ensayo de Tracción

4.2.1.-Obtención de los esfuerzos Residuales mediante galgas extensométricas

Los resultados presentados a continuación son los obtenidos mediante la medición de las galgas extensométricas, colocadas a una distancia de 3 mm después del cordón de soldadura, la cual coincide perfectamente con el centro de los puntos de dureza con los que se realizó el cálculo de esfuerzo residual y de esta manera poder realizar una comparación de resultados.

Las galgas extensométrica proporcionaron valores de voltajes para cada tipo de electrodo como se muestra en las tablas 4.12 y 4.13 para poder hallar posteriormente los valores de esfuerzos residuales requeridos.

Tabla 4.12. Voltajes de las probetas tratadas térmicamente

Recubrimiento	Voltaje de la Probeta T (Volt)		
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
E6010	0,00154	0,00136	0,00175
E6013	0,00176	0,00196	0,00212
E7018	0,00123	0,00312	0,00111

Tabla 4.13. Voltajes de las probetas tratadas térmicamente

Recubrimiento	Voltaje de la Probeta NT (Volt)		
	probeta 1	probeta 2	probeta 3
E6010	0,00323	0,00312	0,00358
E6013	0,00497	0,00527	0,00513
E7018	0,00482	0,00668	0,00465

Haciendo uso de la ecuación 3.4 y sustituyendo los valores de voltaje obtenidos mediante las galgas extensométricas, se determinaron las deformaciones unitarias de las que se hace referencia en las tablas 4.14 y 4.15

Tabla 4.14. Deformaciones de las probetas tratadas térmicamente

Deformación de la Probeta T			
Recubrimiento	Probeta 1 (mm)	Probeta 2 (mm)	Probeta 3 (mm)
E6010	0,00037	0,00032	0,00042
E6013	0,00042	0,00047	0,00050
E7018	0,00029	0,00074	0,00026

Tabla 4.15. Deformaciones de las probetas no tratadas térmicamente

Deformación de la Probeta NT			
Recubrimiento	Probeta 1 (mm)	Probeta 2 (mm)	Probeta 3 (mm)
E6010	0,00077	0,00074	0,00085
E6013	0,00118	0,00125	0,00122
E7018	0,00115	0,00159	0,00111

Con la ecuación 3.4 que hace referencia a la Ley de Hooke estudiada en el capítulo 3, y sustituyendo los valores de deformación de las tabla 4.14 y 4.15; se obtuvieron, los valores de esfuerzos aplicados para cada tipo de recubrimiento tanto para las probetas tratadas como no tratadas térmicamente.

Tabla 4.16. Esfuerzos aplicados para cada tipo de recubrimiento en las probetas tratadas.

Esfuerzo de la Probeta T (Mpa)			
Recubrimiento	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
E6010	73,33333	64,76190	83,33333
E6013	83,80952	93,33333	100,95238
E7018	58,57143	148,57143	52,85714

Tabla 4.17. Esfuerzos aplicados para cada tipo de recubrimiento en las probetas no tratadas.

Esfuerzo de la Probeta NT (Mpa)			
Recubrimiento	probeta 1	probeta 2	probeta 3
E6010	153,80952	148,57143	170,47619
E6013	236,66667	250,95238	244,28571
E7018	229,52381	318,09524	221,42857

Haciendo uso de las tablas 4.16 y 4.17 se obtuvieron los valores de esfuerzos residuales para cada tipo de recubrimiento en estudio.

Tabla 4.18. Esfuerzos aplicados para cada tipo de recubrimiento en las probetas

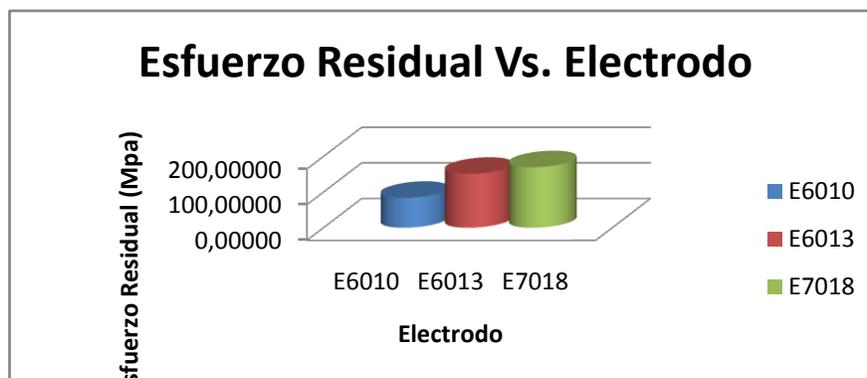
Esfuerzo Residual de las Probetas (Mpa)			
Recubrimiento	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
E6010	80,47619	83,80952	87,14286
E6013	152,85714	157,61905	143,33333
E7018	170,95238	169,52381	168,57143

Finalmente para obtener un valor de esfuerzo residual se realizó un promedio de los esfuerzos para cada tipo de recubrimiento como se observa en la tabla 4.19.

Tabla 4.19. Esfuerzos aplicados para cada tipo de recubrimiento.

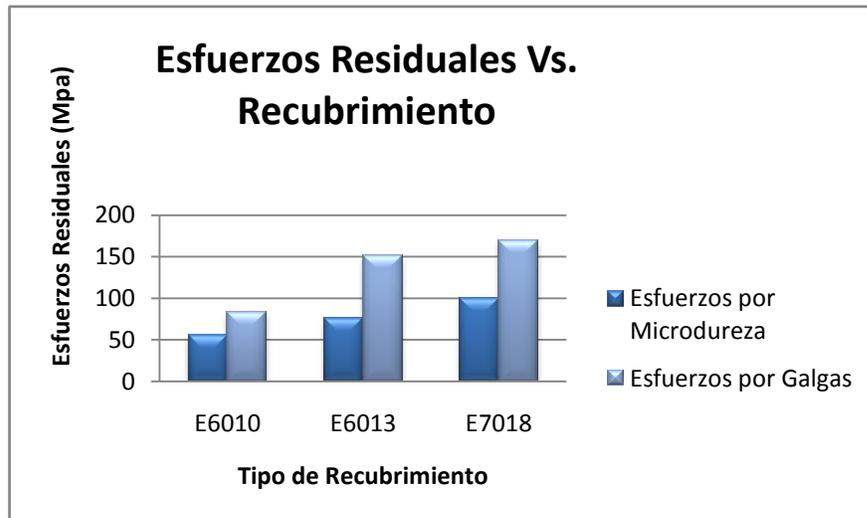
Recubrimiento	Esfuerzo Residual (Mpa)
E6010	83,80952
E6013	151,26984
E7018	169,68254

En el gráfico 4.12 se puede observar con claridad la diferencia de la generación de esfuerzos residuales entre los distintos tipos de recubrimiento por galgas extensométricas



Gráfica 4.12. Esfuerzos residuales Vs Electrodo obtenido mediante galgas extensométricas.

Para poder comparar los datos obtenidos por la dureza Vickers y las galgas extensométricas, se presentó una gráfica ilustrativa 4.13 donde se sobreponen los dos resultados.



Gráfica 4.13. Representación gráfica de los esfuerzos residuales calculados por el método de microdureza Vickers y utilizando galgas extensométricas

4.3.-Análisis Metalográfico.

El ensayo metalográfico se realizó con la finalidad de revelar la estructura verdadera de la zona afectada por el proceso de soldadura; se realizó el análisis a una muestra del material sin soldar (figura 4.1) y a una muestra de cada tipo de recubrimiento tanto para las probetas tratadas como no tratadas térmicamente.

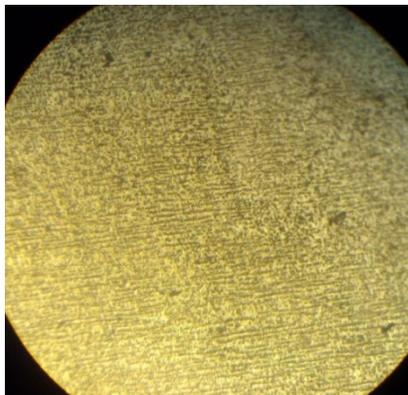


Figura 4.1. Microestructura del material base.

A continuación en las tablas de 4.19 a 4.24 se observan los resultados obtenidos en este ensayo.

Tabla 4.20. Microestructura de la zona afectada por el calor de la soldadura con E6010 sin tratamiento térmico.(1000X)

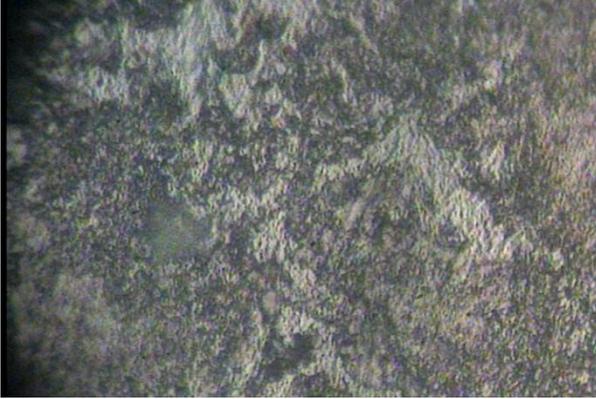
Microestructura Observada	Resultado metalográfico
<p>En la zona de dilución se observa una microestructura con un porcentaje de perlita de 80%, 10% de ferrita y se observa la presencia en un 10% de una microestructura llamada Widmånstatten.</p>	

Tabla 4.21. Microestructura de la zona afectada por el calor de la soldadura con E6013 sin tratamiento térmico. .(1000X)

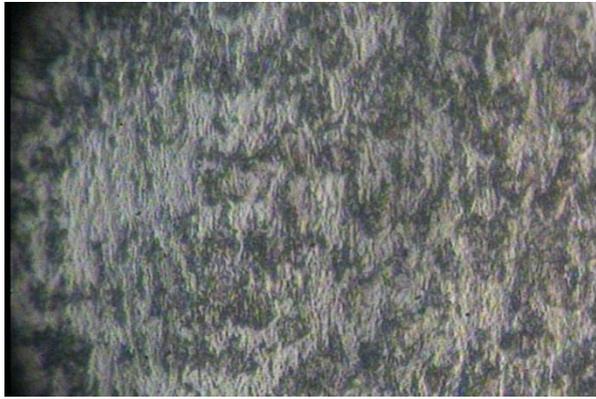
Microestructura Observada	Resultado metalográfico
<p>En la zona de dilución se observa una microestructura con un porcentaje de perlita de 60%, 35% de ferrita y se observa la presencia en un 5% de la microestructura llamada Widmånstatten.</p>	

Tabla 4.22. Microestructura de la zona afectada por el calor de la soldadura con E7018 sin tratamiento térmico. .(1000X)

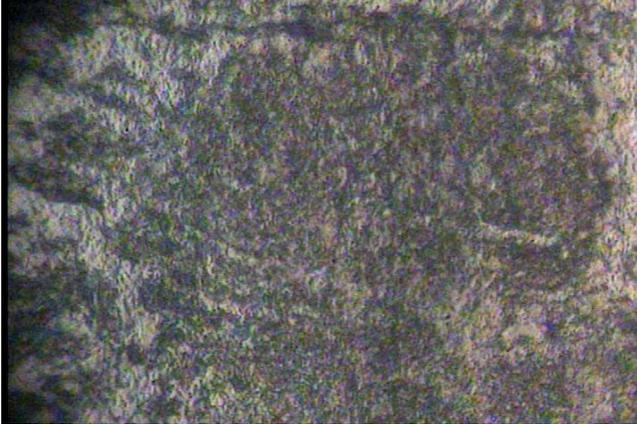
Microestructura Observada	Resultado metalográfico
<p>Se observa un 80% de perlita y un 20 % de ferrita en la zona de dilución.</p>	

Tabla 4.23. Microestructura de la zona afectada por el calor de la soldadura con E6010 con tratamiento térmico. .(1000X)

Microestructura Observada	Resultado metalográfico
<p>Se observa en la zona de dilución un 60% de presencia de perlita y una 40% de presencia de ferrita. También se observa microestructura Widmånstatten.</p>	

Tabla 4.24. Microestructura de la zona afectada por el calor de la soldadura con E6013 con tratamiento térmico .(1000X).

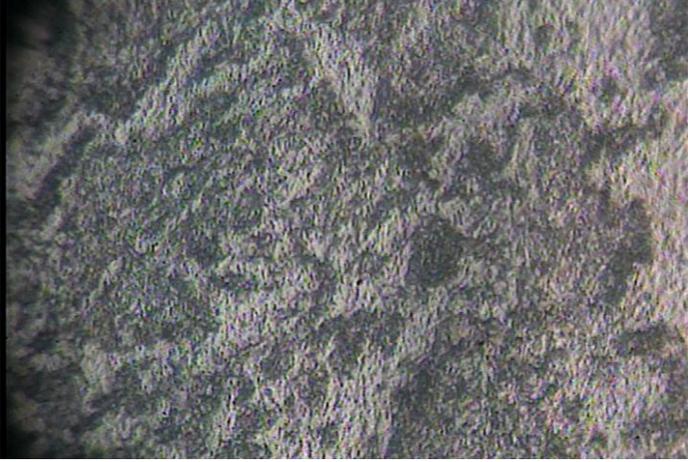
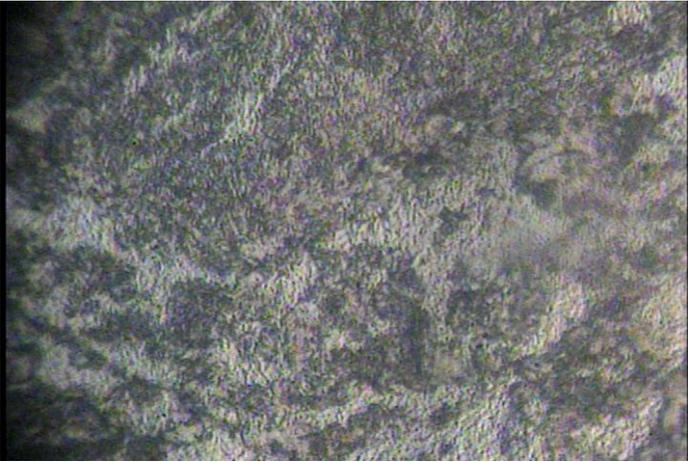
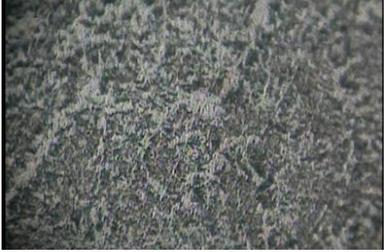
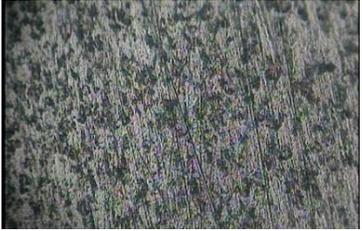
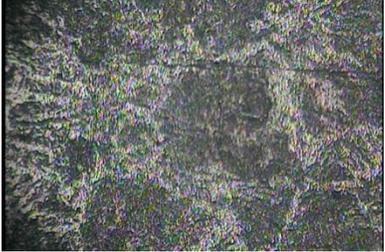
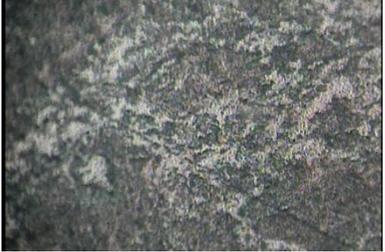
Microestructura Observada	Resultado metalográfico
Se observa un 70% de perlita y un 30% de ferrita en la zona de dilución.	

Tabla 4.25. Microestructura de la zona afectada por el calor de la soldadura con E7018 con tratamiento térmico .(1000X)

Microestructura Observada	Resultado metalográfico
En la zona de dilución se observa presencia de un 15% de microestructura Widmännstätten y presencia de 70% de perlita con 15% de ferrita.	

Para lograr realizar una comparación de las microestructuras obtenidas para las muestras tratadas térmicamente como las no tratadas, se presentó la tabla 4.25; donde se observa el resultado obtenido de dicha comparación.

Tabla 4.26. Comparación entre las microestructuras de las muestras de las probetas con tratamiento térmico y las microestructuras de las muestras de las probetas sin tratamiento térmico. (400X)

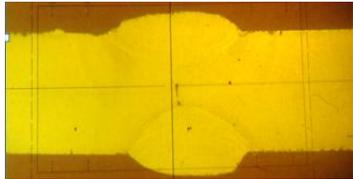
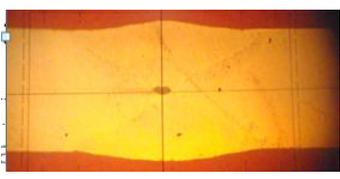
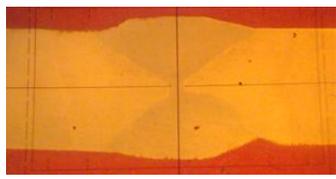
Microestructura		Comparación
E6010 sin tratamiento	E6010 con tratamiento	Se observa el cambio de la microestructura de la zona de dilución debido al tratamiento térmico; pues los granos se notan más alargados y con una distribución uniforme. (El efecto Widmånstatten sigue estando presente en las muestras sin tratamiento térmico pero en menor proporción)
		
Microestructura		
E6013 sin tratamiento	E6013 con tratamiento	
		
Microestructura		
E7018 sin tratamiento	E7018 con tratamiento	
		

4.4.-Análisis Macroscópico

Ensayo que se realizó para evaluar la dilución de la soldadura; es decir, conocer la zona en donde el material base fundido es incorporado a la soldadura.

En la tabla 4.26 se muestran claramente la dilución del material para los diferentes tipos de electrodos en las muestras observadas

Tabla 4.27.Tabla comparativa de la zona de dilución para las distintas muestras.

Muestra Macroscópica de la zona de dilución		
E6010	E6013	E7018
		
% de Dilución (Aproximado)		
61%	66%	70%
El límite de fusión y el fin de la ZAT están localizados entre 4mm y 7mm del centro del cordón, respectivamente.	El límite de fusión y el fin de la ZAT están localizados entre 5mm y 8mm del centro del cordón, respectivamente.	El límite de fusión y el fin de la ZAT están localizados entre 6mm y 8mm del centro del cordón, respectivamente.

CAPÍTULO 5

Análisis y Discusiones

5.1.-Análisis de resultados:

En la macroscopía de la unión soldada realizada para todas las muestras en estudio, se pueden distinguir la zona fundida (metal líquido que se ha solidificado) y la zona afectada por el calor (es la parte del metal base que no ha sido fundido, pero producto del calentamiento presenta cambios macroestructurales que varían las propiedades mecánicas) como se observa en la tabla 4.27. Al detallar éstas zonas a nivel microscópico (ver tabla 4.20 a 4.25); es de notar, que el tamaño de grano tiene un comportamiento distinto a medida que se aleja del cordón de soldadura; pues éstos, se van afinando hasta adaptarse a la microestructura del metal base. Éste comportamiento se debe al ciclo térmico de soldadura que establece en cada punto del metal base un estado térmico estacionario definido por la máxima temperatura alcanzada y la velocidad de enfriamiento. (Como explica Daniel Séférián en su libro: metalurgia de la soldadura).

En el análisis macroscópico el comportamiento de la zona de dilución varía para todas las muestras; en donde, se presenta una mayor dilución con un valor del 70% en las muestras soldadas con E7018 y una menor dilución del 61% en las soldadas con E6010, dicha información convalida los resultados obtenidos mediante el ensayo de dureza (ver graficas 4.5 a 4.7) donde se observa que justo donde culmina la zona de dilución la dureza tiende a disminuir considerablemente; esto se debe, a que existe

material de aporte incorporado en el metal base haciendo que la dureza en esta zona aumente debido a la composición química más resistente que aporta el electrodo.

Al relacionar los resultados obtenidos en la microscopía con los resultados obtenidos en el ensayo de microdureza; se puede decir que, la tendencia observadas en las curvas de las gráficas 4.5 y 4.6 están íntimamente relacionadas con las microestructuras formadas durante el proceso de soldadura; ya que a menor distancia del cordón de soldadura, mayores velocidades de calentamiento y enfriamiento; por lo tanto, se genera sobrecalentamiento y un crecimiento exagerado del grano estructural (microestructura más dura); obteniéndose mayor dureza.

Para el electrodo E6010 el tratamiento térmico de recocido realizado a las probetas luego de ser soldadas, regeneró la microestructura del acero en la zona de sobrecalentamiento, (tabla 4.23), afinando el tamaño de grano y homogeneizando la microestructura; lo que corresponde a un ablandamiento del material disminuyendo de manera significativa la dureza de éste. Es por ello, que los valores de microdureza obtenidos para éstas probetas son menores a los valores de microdureza de las probetas sin el tratamiento térmico post-soldadura en ésta zona afectada térmicamente.

Al analizar la gráfica 4.13 cabe destacar que los esfuerzos residuales calculados por el método de microdureza vickers presentan valores menores a los obtenidos mediante el uso de galgas extensométricas, comportamiento que era de esperarse debido a que el indentador del microdurómetro al entrar en contacto con el material genera distintos modos de deformación (como se explica en el estudio expuesto por M. Mata, M. Anglada y J. Alcalá titulado: ecuaciones de dureza para la caracterización de metales mediante indentación puntiaguda en el año 2002), mientras que por galgas extensométricas se toma en cuenta solamente una deformación longitudinal a la probeta, es decir, las deformaciones que se miden por microdureza presentan direcciones distintas que a su vez generan esfuerzos que se contrarrestaran entre sí, mientras que la deformación medidas por el método de galgas extensométricas sólo

son en una sola dirección generando un único esfuerzo (producto del ensayo de tracción).

En la tabla 5.1 se observa con mayor detalle la comparación de las estructuras obtenidas para los distintos recubrimientos de electrodos estudiados en las muestras tratadas térmicamente.

Tabla 5.1. Comparación entre las microestructuras de las muestras de las probetas con tratamiento térmico para los distintos recubrimientos estudiados.

MICROESTRUCTURA		
E6010	E6013	E7018
		
COMPARACIÓN		
<p>Las microestructuras observadas en la zona de dilución para todas las muestras presentan ferrita y perlita; pero aun así se observa microestructuras diferentes, esto se debe a la diferencia de porcentajes en cada una de ellas.</p> <p>En las muestras para E7018, la presencia de perlita fina es mayor con respecto a las demás muestras en la zona afectada por el calor. Además, se observa que en la muestra E6010 la presencia de perlita fina es menor. Esto corrobora los valores de dureza obtenidos en la tabla 4.7; en donde, la dureza es mayor en el electrodo E7018 que en el electrodo E6010, gracias a la mayor</p>		

presencia de perlita fina en su microestructura.

En la zona de fusión, se tiene una microestructura típica de solidificación, con granos columnares de ferrita creciendo en la dirección del centro del cordón y con perlita en el espaciado interdendrítico. Conforme se aleja del cordón, la microestructura cambia en morfología, pues la ferrita y la perlita se tornan poligonales, y el tamaño de grano se refina llegando a ser menor que el del metal base, esta heterogeneidad en el tamaño de los granos se debe a la fatiga térmica que sufre esta zona durante el proceso de soldadura.

En el gráfico 4.11 se pueden observar las tendencias oscilatorias de las curvas de esfuerzos residuales obtenidos para cada recubrimiento estudiado; en donde, se aprecian puntos de inflexión correspondientes al cambio de estado interno del material; es decir existen esfuerzos de compresión y esfuerzos de tracción, debido a la fatiga térmica que se genera durante el proceso de soldadura (Comportamiento explicado por un clásico sistema de tres barras utilizado por Masubushi K, el cual de una forma elemental explica el fenómeno de las tensiones residuales mediante las variaciones que se producen en una barra central calentada).

Al obtener los esfuerzos residuales mediante el método de microdureza se comparan los esfuerzos obtenidos en las probetas testigos con las no testigo, se observa que la diferencia es positiva en la zona más cercana al cordón de soldadura; esto se debe a que el calentamiento y posterior enfriamiento generado durante el proceso de soldadura, formó una microestructura más dura en esta zona (ver la dilución en la tabla 4.27). Este comportamiento no es contante ya que a medida que se aleja del cordón de soldadura la microestructura obtenida en las probetas testigo es heterogénea (granos de menor dureza a medida que se aleja del cordón de soldadura) alcanzando menores valores de dureza que las probetas no testigo y debido al afinamiento de los granos producto del tratamiento térmico de recocido en las probetas no testigo la microestructura es más homogénea y dura en todo el material; por lo que

se obtiene una diferencia de esfuerzos negativa. Este estado de esfuerzos de tracción y compresión es observado en gráficas obtenidas en el método de tres barras utilizado por Masubushi K.

A menor la cantidad de escoria generada durante el proceso de soldadura se genera un enfriamiento brusco en la zona afectada por el calor, generando un metal muy duro en la zona cercana al cordón de soldadura y mayores cambios en la microestructura del material base influyendo en la microdureza del mismo; es por esto, que el electrodo E7018 debido al mayor porcentaje de Mn y silicato de calcio presente en su composición química aporta menor generación de escoria en el proceso de soldadura y mayores diferencias entre las durezas obtenidas para las probetas testigos y no testigos; por lo tanto mayor presencia de esfuerzos residuales, como se observa en la gráfica 4.11.

Es de notar en la grafica 4.11 la presencia de valores mayores de oscilación en la curva de esfuerzos residuales para el electrodo E7018; esto se debe a la poca generación de escoria durante el proceso de soldadura y a su diseño a tope con doble bisel; produciendo doble fatiga térmica en direcciones contrarias; es decir, durante la soldadura de una de las caras de la lámina se produce un calentamiento local, haciendo que la zona fría de ésta impida la libre dilatación y contracción de la parte caliente (como se explica en el estudio expuesto por Carlos Fabián Ajila Camacho titulado: “Estudio y Control de Distorsión en Estructuras de Acero Soldadas” en el año 2008) generando una fatiga térmica en esta caras de la lámina. Al soldar en la cara contraria de la lamina se produce el mismo efecto pero en dirección contraria haciendo que a distancias alejadas del cordón de soldadura aparezcan esfuerzos de tracción produciendo mayores cambios en la microestructura del material.

La estabilidad del arco genera mayor cantidad de calor suministrado, es por ello que se obtiene una mayor penetración del material de aporte y una menor dilución en la soldadura (Como explica Daniel Sférian en su libro: metalurgia de la soldadura), estas son características del electrodo E6010, que debido a su composición química (revestimiento formado sobre todo por celulosa integrada con aleaciones ferrosas de

magnesio y silicio) generando menores cambios en la microestructura del material base (ver tabla 4.26) y por ende los valores de esfuerzos residuales son menores con respecto a los otros electrodos estudiados (ver figura 4.11).

También, es importante mencionar que los valores de dureza en la zona cercana al cordón de soldadura siempre serán mayores para el electrodo E7018 como se observa en las tablas 4.7 y 4.8; debido a la diferencia en la resistencia a la tracción de éste con respecto a los otros electrodos estudiados. Factor que no influye en la obtención de los esfuerzos residuales; ya que estos se obtienen de restar los esfuerzos presentes en una probeta tratada con una probeta no tratada térmicamente.

Durante la fusión del electrodo el revestimiento forma encima del metal en vía de solidificación una escoria cuya naturaleza depende de la composición del revestimiento. Estas escorias están formadas fundamentalmente por silicatos más o menos complejos; titanatos en los electrodos a base de rutilo (como explica Daniel Séférián en su libro: metalurgia de la soldadura) debido a esta composición química en el revestimiento origina un arco tranquilo, de mediana penetración (elevada intensidad de corriente); esto se refleja en la tabla 4.27 en donde el porcentaje de dilución obtenido es de 66%; siendo mayor al obtenido por el electrodo E6010. Es por ello que a mayor capacidad de penetración del electrodo menor dilución en el proceso de soldadura.

Observando las graficas 4.5 a 4.7 es de notar, que el comportamiento obtenido en curva de dureza para el electrodo E6010 presenta menores oscilaciones. Esto se explica debido al sistema metal-escoria (que permanece en contacto durante un tiempo más o menos largo) genera durante el proceso una desgasificación del metal líquido a través de la escoria, una menor presencia de porosidades (como se explica en el manual de SUNARC titulado: Los gases para la soldadura). Es por ello, que el electrodo E6010 presenta menores inclusiones y porosidades en su microestructura como se observa en la tabla 5.1. Esto conlleva a una microestructura más estable y con menores concentradores de esfuerzo.

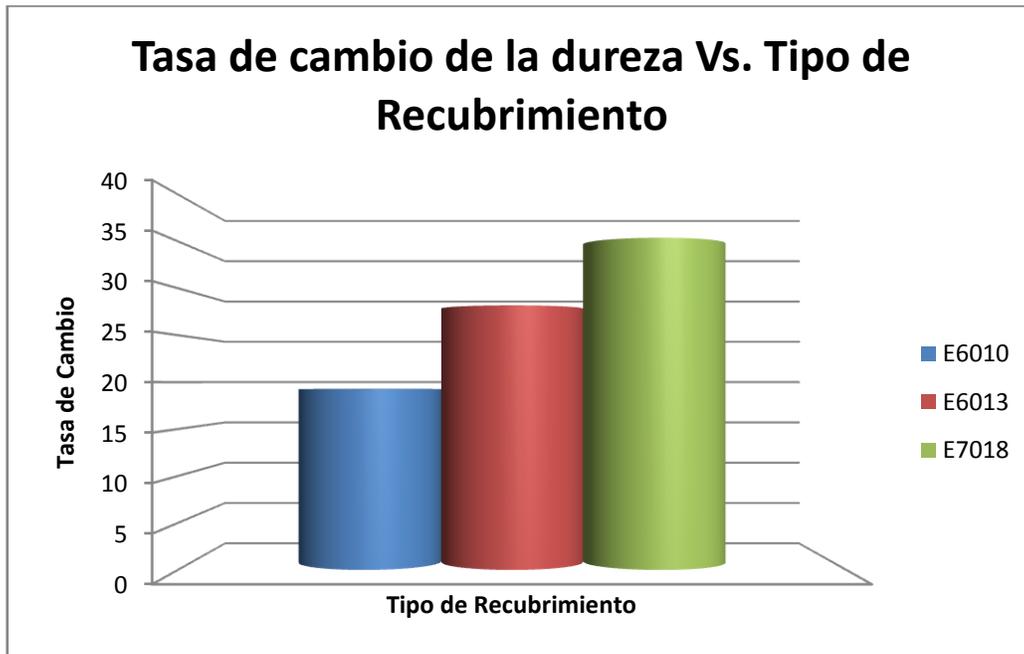
Analizando la tabla 4.27, se observa que aun cuando la velocidad de pasada, la intensidad de corriente y el voltaje son parámetros constantes en este estudio se obtiene un mayor depósito de material en el electrodo E6010; esto quiere decir que el recubrimiento del material afecta directamente a la velocidad de depósito del material de aporte en la unión soldada (como lo explica Amado Cruz Crespo, Americo Scotti, Tamara M. Ortiz en la investigación realizada en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas titulado Influencia del factor de revestimiento sobre el comportamiento operacional de de electrodos tubulares revestidos para recubrimiento duro por SMAW en el año 2003). Esta velocidad de depósito está íntimamente relacionada con la dilución obtenida, ya que existe menor presencia de material base y mayor cantidad de material de aporte en la zona fundida, afectando directamente a la dureza del material.

Se logra diferenciar en las muestras del análisis macroscópico (tabla 4.27), la zona fundida y la zona de influencia térmica que se generan por el proceso de soldadura. la microestructura en el centro del cordón de soldadura está constituido por el metal líquido que se ha solidificado (material de mayor resistencia) presentando un comportamiento diferente al del material base debido a que esta zona es la resultante de la mezcla de la composición química del material base y el material de aporte. En la zona de influencia térmica se presentan cambios macroestructurales que varían las propiedades mecánicas del material; debido a que ésta es la parte del metal base que no ha sido fundido pero que ha sido afectado por el calentamiento térmico generado durante el proceso de unión.

Es importante destacar que tanto en las probetas tratadas como no tratadas el recubrimiento bajo en hidrógeno presenta un rango más amplio entre sus valores de microdureza, lo que indica que la tasa de cambio en la dureza por efecto del proceso de soldadura es mayor para el recubrimiento de bajo hidrogeno que para los otros dos recubrimientos estudiados como se observa en las tablas 4.7 y 4.8

La variación existente en la tasa de cambio (entre la dureza las probetas testigo y no testigo) observada en los graficos 4.5 a 4.7 indica anticipadamente la presencia de esfuerzos residuales; ya que los esfuerzos de fluencia utilizados para el cálculo de los

esfuerzos residuales según Masubuchi k. dependen directamente de la dureza del material.



Gráfica 4.9. Tasa de cambio de la dureza Vs tipo de recubrimiento

Una fuente importante de esfuerzos residuales es la diferencia en la contracción a causa del calentamiento y enfriamiento de las áreas de la junta soldada. El metal soldado, originalmente expuesto a las altas temperaturas, tiende a contraerse más rápido que las otras áreas, pero esta contracción es frenada por las áreas más frías (como mencionan Pereira, K. y Ochoa, R. en su trabajo de investigación titulado: "Caracterización de esfuerzos residuales en soldaduras a tope en juntas de acero AISI 1045 por arco eléctrico". Universidad de Carabobo); es por ello, que es de vital importancia tomar en consideración el proceso exotérmico que se genera durante el proceso de unión de las piezas soldadas; es decir, la transferencia de energía transformada en calor que adsorbe el material base, ya que a mayor disipación de calor mayor es la concentración de esfuerzos residuales.

Relacionando el proceso exotérmico con los recubrimientos estudiados, se puede decir que debido al bajo contenido de hidrógeno presente en la composición química del recubrimiento del electrodo básico (E7018), La presencia de humedad generada durante el proceso de soldadura es casi nula; debido a que la formación de ésta necesita la presencia de átomos de oxígeno (O_2 presentes en el aire) e hidrógeno (H). La atmósfera (Compuesta de gas producido por el recubrimiento y aire) creada por este tipo de electrodo es escasa en contenido de hidrógeno y por ende hay mayor disipación de calor ya que este factor (humedad) no obstruye la transferencia de calor existente entre el material de aporte y el material base, ocasionando una mayor dilución y generación de esfuerzos residuales.

Al observar la tabla 4.27 se observa mayor depósito de material de aporte en el electrodo E6010; esto se debe al proceso endotérmico que se genera durante el proceso de soldadura, ya que existe más energía consumida por el material de aporte y menor calor disipado hacia el material base, esto se debe al intercambio térmico que produce la humedad presente en la atmosfera generada por el recubrimiento, es decir, que el calor absorbido por el material base, es igual al calor suministrado al electrodo menos el calor consumido por la humedad (como lo explica Roá J. en su libro titulado Fundamentos Básicos de los procesos ambientales para ingenieros). Ésta menor disipación de calor genera menores cambios en la microestructura del material base y con ellos menor generación de esfuerzos residuales que los generados por el electrodo bajo en hidrógeno (E7018).

Observando los resultados obtenidos en los ensayos realizados en esta investigación se puede decir, que el electrodo con revestimiento rufílico (E6013) presenta un comportamiento intermedio entre el electrodo celulósico (E6010) y el electrodo básico (E7018); Esto se debe a las características presentes en su composición química (contenido de hidrógeno y manganeso presentes).

El análisis térmico realizado en este estudio convalida los resultados obtenidos en los diferentes ensayos (Tracción, Microdureza, Análisis Metalográfico y Análisis Macroscópico); ya que el calor disipado en el proceso de soldadura es el principal

factor en la generación de esfuerzos residuales macroestructurales producidos por las dilataciones a causa del calentamiento y posterior enfriamiento del material base durante su unión (como se explica en el estudio expuesto por Carlos Fabián Ajila Camacho titulado: “Estudio y Control de Distorsión en Estructuras de Acero Soldadas en el año 2008).

Conclusiones

Al variar el recubrimiento del material de aporte como uno de las variables presentes en el proceso de soldadura, se logra notar la presencia de esfuerzos residuales que se genera de manera distinta en cada uno de ellos, este efecto se produce debido a la composición química de los mismo; ya que estos son los encargados de la formación de escoria, la estabilidad del cordón de soldadura y la capacidad de dilución con el material base.

Al realizar el ensayo de tracción a probetas para obtener valores reales de esfuerzos mecánicos según la composición del recubrimiento del material de aporte; se logró determinar el tipo de recubrimiento del electrodo que genera mayores esfuerzos, siendo éste el electrodo de tipo básico. Con la realización del ensayo de tracción a probetas con las características de diseño descritas en el capítulo III, se logró cuantificar un valor aproximado de esfuerzo residual generado en el proceso de soldadura para cada tipo de recubrimiento estudiado; obteniendo que, en el electrodo celulósico el esfuerzo residual experimental es 84 MPa, en el electrodo rutílico es 151 MPa y en el electrodo básico es 170 MPa.

Al realizar ensayos de microdureza, análisis metalográficos y macroscópicos en la zona cercanas al cordón de soldadura de cada probeta, se logra evaluar el comportamiento de los esfuerzos residuales debido a la influencia del tipo de recubrimiento del electrodo, existiendo zonas sometidas a esfuerzos de tracción y zonas sometidas a esfuerzos de compresión.

El electrodo E6010 presenta en el proceso de unión poca escoria, poca dilución y buena penetración generando esfuerzos residuales de pequeñas magnitudes en la pieza obtenida.

El electrodo E6013 con su capacidad de buena presentación al final del proceso de unión, su penetración intermedia y su buena dilución con el material base; genera esfuerzos residuales considerables en el proceso de soldadura.

El electrodo E7018 con la característica de buen aportador de propiedades mecánicas en la unión; genera esfuerzos residuales con magnitudes muy considerables que deben tomarse en cuenta al momento de un diseño de una pieza.

Recomendaciones

Se recomienda realizar un estudio térmico para evaluar las temperaturas antes, durante y después del proceso de soldadura; ya que cualquier enfriamiento brusco que se pueda producir altera, en gran proporción la microestructura de la soldadura.

El uso de las galgas extensométricas debe ser muy cuidadoso debido a que por su alto grado de sensibilidad, cualquier efecto externo puede alterar los resultados reales.

Se recomienda realizar éste estudio para distintos amperajes; con la finalidad de conocer la verdadera tendencia de la generación de esfuerzos residuales debido al recubrimiento del material de aporte; ya que los valores obtenidos, sólo corresponden a los esfuerzos residuales generados para 130 A.

Los elementos que componen el puente de Wheatstone deben ser de alta precisión para disminuir posibles errores a la hora de la captura de la data de voltaje utilizando galgas extensométricas; ya que cualquier tipo de ruido o perturbación puede arrojar datos erróneos durante el ensayo, por lo tanto se propone estudiar la posibilidad de adquirir una serie de equipos de alta tecnología que permitan obtener datos más precisos y confiables a la hora de trabajar con galgas extensométricas para las mediciones de deformación en un ensayo de tracción.

La superficie donde se desea conocer la deformación por medio del uso de galgas extensométricas debe estar libre de: impurezas, porosidades, y con un buen acabado superficial; para obtener el verdadero valor de deformación de la zona a estudiar.

Se recomienda que la probeta a ser estudiada mediante el ensayo de dureza presente un buen acabado superficial, para evitar errores a la hora de la toma de mediciones; ya que cualquier tipo de porosidad, raya, mancha e imperfección en la superficie altera el resultado. Además, se debe tomar en cuenta que la zona a ser penetrada esté completamente perpendicular al indentador del microdurómetro.

Para poder realizar una comparación entre un ensayo de dureza y un ensayo de tracción empleando galgas extensométricas; se debe tomar un punto de estudio en común para éstos dos; ya que las galgas extensométricas sólo obtienen resultados puntuales.

A la hora de realizar un ensayo microscópico, se debe conocer con claridad lo que se desea observar con el mismo; ya que existen ataques químicos para los distintos defectos a observar. Además se debe estar al tanto de los tiempos recomendados para la realización del ataque químico; ya que se podrían obtener resultados alterados.

Referencia bibliográfica

- Bazán N., C. (1998). Determinación de electrodos y cálculo de costos de soldadura al arco asistidos por computadora. Perú: Universidad de Piura.
- Cesar Cerón Bolaños, John Sandro Rivas y John Jairo Coronado(2006) caracterización de la propiedades mecánicas y microestructurales de soldaduras empleadas en la recuperación de ejes, revista Facultad de Ingeniería de la universidad de Antioquia n° 36
- D. H. BAE, et al, (2003). Assessing the Effects of Residual Stresses on the Fatigue Strength of Spot Welds. Residual stress at the nugget's edge was taken into consideration in the evaluation of fatigue strength for spot welds of various shapes and dimensions.
- E.J. Pavlina and C.J. Van Tyne (2008). Correlation of Yield Strength and Tensile Strength with Hardness for Steels, ASM International
- Howard, C. (1981). Modern Welding Technology (3era Ed). New Jersey: Regents/Prentice Hall.
- **Jose E.** Horioka Osaki y Jorge Alencastre Miranda, (2002) Estudio de los esfuerzos en uniones soldadas por el método de los elementos finitos.
- Matus Parra (2005). Determinación de esfuerzos residuales en la Soldadura GMAW de planchas de 6 mm de espesor de Acero ASTM A-131-82-B, Universidad de Concepción, Chile.
- Montaña, F. (2004). Tecnología Mecánica II. Bolivia: Universidad Mayor de San Simón.
- W. Bullón C. , J. Acosta S. , R. Franco R. , Q. Valverde G. Simulación de un proceso de soldadura por el Método de los Elementos Finitos mediante un modelo de prescripción del ciclo térmico (2007)
- DANIEL SÉFÉRIAN. Metalurgia de la Soldadura
- M. Mata, M. Anglada y J. Alcalá. Ecuaciones de dureza para la caracterización de metales mediante indentación puntiaguda.
- Carlos Fabián Ajila Camacho. Estudio y Control de Distorsión en Estructuras de Acero Soldadas.
- Manual de SUNARC. Los gases para la soldadura.

- Amado Cruz Crespo, Americo Scotti, Tamara M. Ortiz. Influencia del factor de revestimiento sobre el comportamiento operacional de de electrodos tubulares revestidos para recubrimiento duro por SMAW.
- [1] Rafael Menezes Nunes et al, 1990, Welding, Brazing, and Solderi ASM Metals Handbook volume 6-Welding, ASM international.
- [2] O. Blodgett et al, 1999, Fabricators` and Erectors` guide to welded steel construction.
- [3] García, J. y Álvarez, M. (2006). **Tensiones Residuales en la Soldadura.**

Métodos para su atenuación. Cuba: Universidad Central de las Villas.

- [4] Avner, S. (1995). **Introducción a la Metalurgia Física (Segunda edición).**

México: McGraw-Hill.

- [5] Montaña, F. (2004). Tecnología Mecánica II. Bolivia: Universidad Mayor de San Simón, pagina
- [7] J. Kronfle, 1983, Efectos de los esfuerzos residuales sobre las uniones soldadas.