



UNIVERSIDAD DE CARABOBO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



*INFLUENCIA DEL NÚMERO DE PASADAS EN UNA
SOLDADURA DE ARCO ELÉCTRICO EN LA MAGNITUD
DE LOS ESFUERZOS MECÁNICOS.*

Exime Ana.

Mora Felix.

Naguanagua, 03 de Noviembre de 2010



UNIVERSIDAD DE CARABOBO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



*INFLUENCIA DEL NÚMERO DE PASADAS EN UNA
SOLDADURA DE ARCO ELÉCTRICO EN LA MAGNITUD
DE LOS ESFUERZOS MECÁNICOS.*

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

Tutor académico:

Ing. MSc. Edwin Peña

Autores:

Exime Ana.

Mora Felix.

Naguanagua, 03 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 **“Influencia del número de pasadas en una soldadura de arco eléctrico, en la magnitud de los esfuerzos mecánicos”**, presentada por los bachilleres: **Exime Ana, Mora Felix**, portadores de la Cédula de Identidad N°: **18.707.430, 18.554.502**, respectivamente; hacemos constar que hemos revisado y aprobado el mencionado trabajo.

Prof. Edwin Peña

Presidente del Jurado

Prof. Carmelo Torres

Miembro del jurado

Prof. Oswaldo Urbano

Miembro del jurado

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

Agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar a DIOS, que me ha conservado con vida, salud, inteligencia y que me ha guiado y cuidado a todo momento. A mi madre Hilda Quintero y a mi padre Félix Mora, que humildemente me han dado una maravillosa formación, por estar siempre a mi lado con ternura y todo su amor, LOS AMO. A mi hermano John Mora por ser como un padre y amigo, siempre iluminando mi progreso y a la vez siendo un ejemplo. A familiares, en especial a mi tía Auxiliadora por brindarme su hogar, su apoyo, cariño y por aceptarme como un hijo desde el inicio de mi carrera, también a Angela Jaquinet, por llegar a mi vida en el momento exacto. A todos mis amigos y sus respectivos familiares. A mi tutor Edwin Peña, quien me ha dado su apoyo intelectual, a todos los profesores que me integraron profesionalmente en esta gran casa de estudio, como lo es la Universidad de Carabobo.

Felix Mora.

Agradecimientos

Quisiera agradecerle en primer lugar a Dios por haberme dado fortaleza salud y vida, a mis padres David Exime y Nancy de Exime y a mis hermanos David y Karla por ser mis guías, mi apoyo y mis ejemplos a seguir, al Profesor Edwin Peña por su ayuda intelectual, por habernos guiado y apoyado en la realización de este trabajo y por formar parte del importante grupo de personas que hicieron posible alcanzar tan importante meta en mi vida. Por último quiero agradecerles a mis amigos con los que supere cada una de las etapas vividas durante estos 5 años de estudios universitarios.

Ana Exime

Introducción

Actualmente existen diversos procesos para el diseño mecánico, entre los cuales se encuentra la soldadura, empleada comúnmente con arco eléctrico protegido por su sencillez y bajo costo. Este tipo de soldadura consiste en realizar la unión de dos materiales (generalmente metales) a través de la fusión, en la cual las piezas son soldadas fundiendo ambas y agregando un material de relleno fundido que posee un punto de fusión menor al de la pieza a soldar.

Los efectos de soldar pueden ser perjudiciales en el material y aun más en los puntos cercanos al cordón de soldadura, dependiendo de los materiales usados y la entrada de calor del proceso de soldadura usado, la zona afectada térmicamente (ZAT) puede variar en tamaño y fortaleza, lo que significa en el material un cambio radical de las propiedades mecánicas de las piezas a diseñar en su fabricación que solo regresarán a sus condiciones iniciales si se le realizan un tratamiento térmico de recocido, pero algunos fabricantes han despreciado este fenómeno debido a que no tienen los recursos necesarios para aplicar los tratamientos requeridos.

La utilización de los procesos de soldadura puede traer como resultado el surgimiento de esfuerzos mecánicos debido a la expansión y contracción del material, que pueden llegar a tener valores elevados y no permisibles.

Frecuentemente, estos esfuerzos son de tal magnitud que es preciso atenuarlas para prevenir la excesiva distorsión o agrietamiento de la pieza

Para realizar dichas soldaduras se deben tomar en cuenta diversos parámetros que influyen en los esfuerzos producidos por la soldadura, como los son el voltaje, corriente eléctrica, velocidad de pasadas, número de pasadas, electrodos y otros.

El siguiente trabajo se determina la influencia del número de pasadas en una soldadura de arco eléctrico, en la magnitud de los esfuerzos mecánicos, para el cálculo de estos esfuerzo, se recurre el ensayo de tracción, este ensayo de tracción se le aplica a un número determinado de probetas de las cuales la mitad se someten a un proceso de recocido después de ser soldadas, las cuales se denominan probetas no testigos, ya que estas no poseen dichos esfuerzos, y la otras mitad no serán recocidas por lo cual se denominaran probetas testigos ya que estas si contiene los esfuerzos generados por el proceso de soldadura.

Para el método de obtención de la magnitud de los esfuerzos mecánicos se utiliza la diferencia de los esfuerzos obtenidos en el ensayo de tracción entre las probetas testigos y nos testigos para un mismo número de pasadas.

Resumen

El presente trabajo de investigación tiene como finalidad el estudio de la influencia del número de pasadas en una soldadura de arco eléctrico en la magnitud de los esfuerzos mecánicos. Inicialmente se somete a un proceso de recocido a la mitad de la población de probetas después de haber sido soldadas con los diferentes números de pases a estudiar, posterior al tratamiento térmico se realiza un ensayo de microdureza a toda la población estudiada. Con la correlación entre la dureza Vickers y el esfuerzo de fluencia se obtiene los primeros valores de esfuerzo residual para cada número de pase estudiado. El ensayo de tracción con galgas extensométricas se realiza igualmente a toda la población de probetas. Se le aplica una carga semejante a todas las probetas en estudio que estén comprendidas dentro del rango del límite elástico del material para encontrar la deformación y mediante la ecuación de la Ley de Hooke encontrar las tensiones aplicadas. Posteriormente se calcula la diferencia entre dichas tensiones donde se obtienen los esfuerzos residuales, y así comparar los resultados obtenidos con los adquiridos por medio de la dureza Vickers del material. Con dichos resultados se obtiene gráficas que muestran similitud en la tendencia del comportamiento de los esfuerzos residuales a medida que aumenta el número de pases en el cordón de soldadura para los dos métodos utilizados los cuales nos llevan a concluir que a mayor número de pasadas en el cordón mayor esfuerzo residual.

Índice de tablas

3.1.- Composición química Acero ASTM- A36	57
3.2.- Parámetros para la construcción de la soldadura según el grupo	59
4.1. Propiedades mecánicas del material base (Acero A36)	69
4.2. Datos promedios de la Microdureza Vickers de la probeta testigo	70
4.3. Datos promedio de la Microdureza Vickers de la probeta no testigo	71
4.4. Microdureza Vickers vs Numero de pases en el cordón soldadura,	73
4.5. Promedio límite de fluencia para cada una de las pasadas en las probetas testigo	74
4.6. Promedio límite de fluencia para cada una de las pasadas en las probetas no testigo.	74
4.7. Esfuerzos residuales por grupo con respecto a la distancia	75
4.8. Esfuerzos residuales promedio por número de pasadas	76
4.9 Deformaciones unitarias para las probetas testigo con dos pases	77
4.10 Deformaciones unitarias para las probetas testigos con cuatro pases	78
4.11. Deformaciones unitarias para las probetas testigos con seis pases	78
4.12. Deformaciones unitarias para las probetas testigos con ocho pases	78
4.13. Deformaciones unitarias para las probetas no testigos con dos pases	79
4.14. Deformaciones unitarias para las probetas no testigos cuatro pases.	79
4.15. Deformaciones unitarias para las probetas no testigos seis pases	79
4.16. Deformaciones unitarias para las probetas no testigos ocho pases	79

VIII

4.17. Promedio de deformación en las probetas testigos y no testigos	80
4.18. Esfuerzos de probetas testigos y no testigos	80
4.19. Esfuerzos residuales para cada número de pases.	81
4.20. Porcentaje de dilución para cada número de pase	84
4.21. Análisis metalográfico	84

Índice general

Índice general	I
Índice de figuras	IV
Índice de tablas	VII
Índice de Graficas	IX
CAPÍTULO 1 Introducción	1
1.2 Planteamiento del problema, 1	
1.3 Objetivos, 2	
1.3.1 <i>Objetivo General</i> , 2	
1.3.2 <i>Objetivos Específicos</i> , 2	
1.4 Justificación, 3	
1.5 Limitaciones, 4	
1.6 Delimitaciones, 4	
1.7 Antecedentes, 4	
CAPÍTULO 2 Marco Teórico	7
2.1 Definición de soldadura, 7	
2.2 Tipos de soldadura, 9	
2.2.1 <i>La soldadura de arco metálico con gas (GMAW)</i> , 9	
2.2.2 <i>soldadura manual con electrodo revestido</i> , 9	
2.2.3 <i>La soldadura de arco de gas de tungsteno (GTAW)</i> , 10	

- 2.2.4 *La soldadura de arco sumergido (SAW), 12*
- 2.2.5 *Soldadura por resistencia, 13*
- 2.2.6 *La soldadura por puntos, 13*
 - 2.2.7 *Soldadura por rayo de energía, 14*
 - 2.2.8 *Soldadura de estado sólido, 15*
- 2.3 Fuentes de energía en soldadura, 16
- 2.4 Soldabilidad, 18
 - 2.4.1 *Soldabilidad en aceros, 18*
- 2.5 Aplicación de norma discontinuidades y defectos en soldaduras, 19
- 2.6 Detección de las tensiones residuales, 33
- 2.7 Esfuerzo mecánico, 35
- 2.8 Ensayo de Tracción, 36
- 2.9 Métodos para el alivio de las tensiones en la soldadura, 37
 - 2.9.1 *Alivio de tensiones por vía térmica, 37*
 - 2.9.2. *Alivio de tensiones por vía mecánica, 38*
 - 2.9.3 *Martillado de los cordones de soldadura, 39*
 - 2.9.4 *Aplicación de vibraciones, 40*
 - 2.9.5 *Alivio por explosión, 41*
- 2.10 Tratamientos térmicos. 41
 - 2.10.1 Temple, 42
 - 2.10.2 Normalizado, 42
 - 2.10.3 Recocido, 43
 - 2.10.3.1 Recocido de ablandamiento, 43
 - 2.10.3.2 *Recocido de recristalización, 43*
 - 2.10.3.3 *Recocido de homogeneización, 44*
 - 2.10.4 Revenido, 44
 - 2.11 Definición de dureza, 44
 - 2.11.1 Tipos de dureza, 45
 - 2.11.2 Correlación de esfuerzo de fluencia y dureza, 46
 - 2.12 Extensometría, 48
 - 2.13 Ensayo metalográfico, 50
 - 2.13.1 Preparación de la muestra, 52
 - 2.13.2 Pulido de la muestra, 53
 - 2.13.3 Ataque químico, 54

CAPÍTULO 3 Marco metodológico

55

- 3.1 Introducción, 55
- 3.2 Nivel de investigación, 55
- 3.3 Diseño de la investigación, 56
 - 3.4 Población y muestras, 56
- 3.5 Determinación Experimental de los Esfuerzos Residuales, 56
 - 3.5.1 *Selección del material para las probeta, 56*
 - 3.5.2 *Tratamientos térmicos, 57*

Índice de figuras

2.1.- Tipos de uniones por soldadura	8
2.2.- Esquema de soldadura manual con electrodo sumergido	10
2.3 - Esquema de soldadura de arco de gas de tungsteno	11
2.4 - Esquema de soldadura de arco sumergido	12
2.5 - Esquema de soldadura por resistencia	13
2.6. - Soldador de punto	14
2.7 - Esquema de soldadura ultrasónica	16
2.8 - Máquina de ensayo de tracción	36
2.9 - Relación entre la corriente de soldadura y las tensiones residuales	38
2.10. Esfuerzo de fluencia para diferentes aceros en función de la dureza Vickers	47
2.11- Esfuerzo último para diferentes aceros en función de la dureza Vickers	47
2.12- Linealización de los puntos de estudios del esfuerzo de fluencia	48
2.13 - Linealización de los puntos de estudios del esfuerzo último	48

2.14 -Galga extensometrica	49
2.15-Plantilla de tamaños de grano	52
3.1 - Horno para recocido a 850 °C	57
3.2 - Diseño del cordón de soldadura.	58
3.3 - Foto de la tira de la lámina soldada.	59
3.4 -Dimensiones de las probetas en mm.	60
3.5 -Distribución de puntos para ensayo de dureza.	61
3.6 -Ubicación de la galga.	63
3.7- Colocación de cinta adhesiva	64
3.8- Pegado de la galga	64
3.9- Microscopio metalográfico.	68
3.10- Microscopio estéreo.	68
4.1. Probeta 2 pases sin tratamiento térmico	82
4.2 Probeta 4 pases sin tratamiento térmico	83
4.3. Probeta 6 pases sin tratamiento térmico	83
4.4. Probeta 8 pases con tratamiento térmico	83
4.5 Microestructura acero A36 (Aumento 1000 X)	84
4.6 Cordón de soldadura 2 pase	84
4.7 Zona afectada por el calor 2 pases	85
4.8. Cordón de soldadura 2 pases tratada	85
4.9 Zona afectada por el calor 2 pases tratada	85
4.10. Cordón de soldadura 4 pase	85

4.11 Zona afectada por el calor 4 pases	86
4.12 Cordón de soldadura 4 pases tratada	86
4.13 Zona afectada por el calor 4 pases tratada	86
4.14. Cordón de soldadura 6 pase	86
4.15 Zona afectada por el calor 6 pases	87
4.16 Cordón de soldadura 6 pases tratada	87
4.17 Zona afectada por el calor 6 pases tratada	87
4.18. Cordón de soldadura 8 pase	87
4.19 Zona afectada por el calor 8 pases	88
4.20 Cordón de soldadura 8 pases tratada	88
4.21 Zona afectada por el calor 8 pases tratada	88
4.22 Influencia del ciclo térmico de soldeo en el tamaño del grano del metal base.	90
4.23 Influencia de las pasadas sucesivas sobre la variación de la dureza	91
4.24 Efecto del ciclo térmico de las pasadas sucesivas de soldeo en las transformaciones del metal base	94

Índice de graficas

4.1. Microdureza Vickers Vs distancia de probeta testigo y no testigo para dos pases de soldadura	70
4.2. Microdureza Vickers Vs distancia de probeta testigo y no testigo bajo condiciones de soldeo de cuatro pases.	71
4.3. Microdureza Vickers Vs distancia de probeta testigo y no testigo bajo condiciones de soldeo de seis pases.	71
4.4. Microdureza Vickers Vs distancia de probeta testigo y no testigo bajo condiciones de soldeo de ocho pases.	72
4.5. Promedio de dureza Vickers vs distancia del cordón de soldadura de las probetas testigos.	72
4.6. Promedio de dureza Vickers Vs distancia del cordón de soldadura de las probetas no testigos.	73
4.7. Dureza Vickers Vs Numero de pases en el cordón de soldadura	74
4.8. Esfuerzos residuales de cada grupo con respecto a la distancia alejada del cordón de soldadura.	75
4.9. Perfil del esfuerzo residual por la variación del número de pasada.	76
4.10. Tendencia del esfuerzo residual obtenido por galgas extensométricas.	81
4.11. Esfuerzo residual obtenido por ensayo de dureza y galgas extensométricas.	81

CAPÍTULO 5

Discusión de resultados

5.1. Discusión de resultados.

En el estudio realizado por Claudia P. Serna-Giraldo del Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales de la Universidad de Antioquia Medellín – Colombia, respecto al monitoreo del comportamiento de la microdureza en uniones soldadas de aceros estructurales, establece que la microdureza es descendiente a medida que se aleja del cordón de soldadura. [21]

Observando los resultados de la tabla 4.2 se confirma que el comportamiento de la microestructura de las probetas testigos obtenidos en los ensayo también es de forma decreciente a medida que se aleja del cordón de soldadura.

El ciclo térmico de la soldadura genera sobre el material estados estacionarios definidos por la máxima temperatura alcanzada en la zona y la velocidad de enfriamiento, estos estados se ven representados por la zona afectada térmicamente y la zona de metal base no afectada. La temperatura tiene gran influencia en el incremento del tamaño de grano como es propuesto por Daniel Sférian en su libro Metalurgia de la Soldadura, cuando se calienta a elevadas temperaturas el tamaño de grano comienza a aumentar, dando lugar a una estructura mixta con granos grandes y pequeños, desde este momento al aumentar la temperatura los granos grandes

absorben a los más pequeños, por lo cual en la zonas más cercanas al cordón presentan tamaños de grano mayores.

En el soldeo por arco eléctrico si la operación implica varias pasadas, la influencia térmica de las superiores normaliza la estructura de las capas ya solidificadas, lo cual conduce a un afino de la estructura que se encuentra generalmente en las partes centrales de la zona fundida, en la zona de unión también es clara la orientación de la cristalización, aun cuando resulta destruida a menudo por el tratamiento térmico provocado por el depósito de las capas sucesivas y finalmente en la zona afectada por el calor se presenta una estructura con un máximo crecimiento de grano (Ver fig. 4.22) que luego se afina en la zona de unión al menos en la parte central por el efecto térmico de las pasadas sucesivas.

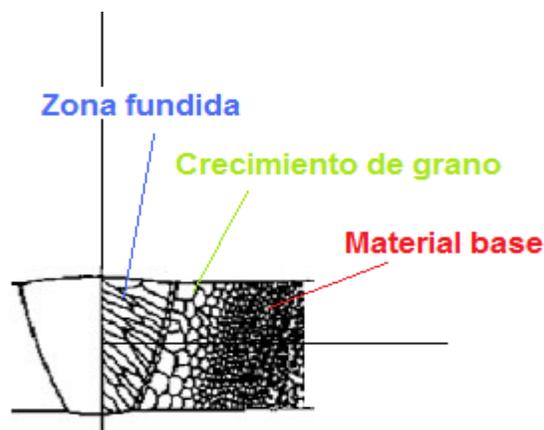


Fig. 4.22. Influencia del ciclo térmico de soldeo en el tamaño del grano del metal base. Fuente [17].

El análisis microestructural que se le realizó a las probetas testigo demuestra claramente como el tamaño de grano aumenta en la zona afectada térmicamente (más cercana al cordón), y disminuye de tamaño a medida que se aleja del cordón.

Comparando las Fig. 4.7, 4.11, 4.15 y 4.19 se observa como el tamaño del grano en la zona afectada por el calor va creciendo de tamaño a medida que se aumentan los números de pases en el cordón.

Las pasadas sucesivas actúan también, en la cierta medida, sobre las estructura de las zonas de transformación del metal base, en una sucesión de capas alternadas de zonas afectadas y zonas parcialmente normalizadas. Las estructuras se encuentran distribuidas en un volumen muy reducido, están entremezcladas y son muy complejas debido a la superposición de varios tratamientos térmicos. La superposición de pasadas modifica también la estructura de la zona de sobrecalentamiento, presentándose así los cambios de dureza en los diferentes puntos de estas zonas. En la figura 4.23, se muestra de acuerdo con lo planteado por Daniel Séférián en su libro Metalurgia de la soldadura, la influencia de las pasadas sucesivas sobre la variación de la dureza para aceros de bajo carbono, como es el estudio en esta investigación.

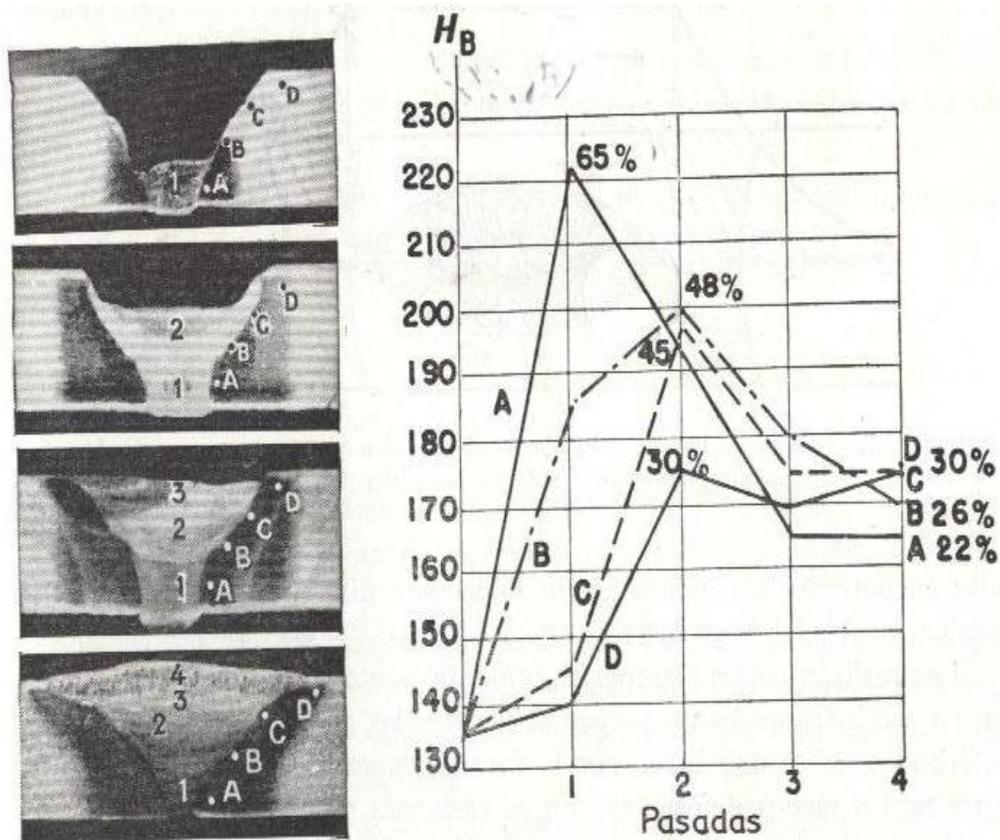


Figura 4.23. Influencia de las pasadas sucesivas sobre la variación de la dureza. Fuente [17].

Donde el punto D representa una zona homóloga con la zona estudiada. Observando la curva representativa del comportamiento de la dureza del punto D se observa que esta va en aumento conforme aumenta el número de pases en el cordón. Esto se produce debido al aumento de calor en esta zona producto de las múltiples pasadas y velocidades de enfriamiento mucho mayores, que llevan a temples más energéticos en esta zona, obteniendo valores de dureza mayores en esta zona conforme aumenta el número de pases en el cordón.

En la gráfica 4.5 corrobora lo antes expuesto mostrando la comparación de los valores de microdureza a medida que se incrementa el número de pases presentes en el cordón de soldadura, donde a medida que aumenta el número de pases aumenta la dureza del material.

La dilución es un parámetro que permite cuantificar el porcentaje de fusión. La dilución se muestra como una función de la cantidad de metal base fundido y la superficie del metal base adherido, por lo cual se establece que las propiedades de la superficie del material son fuertemente influenciadas por la dilución, ya que la composición química del material en esa zona cambia por la fusión del material base con el material del electrodo.

El porcentaje de dilución se ve afectado directamente por la cantidad de calor aportada a la soldadura (Estudio realizado por José Luddey Marulanda, Alberto Zapata y Dairo Mesa Grajales en la Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia), mientras más calor se genere en el proceso de soldadura mayor será la fusión entre el material base y electrodo por lo cual se produce un mayor porcentaje de dilución.

Con el análisis macroscópico realizado se pudo obtener el porcentaje de dilución para 2, 4, 6 y 8 pases (ver Tabla.4.20), donde se observa el incremento del porcentaje de dilución respecto al aumento del número de pases en el cordón de

soldadura, con lo cual se corrobora el aumento del calor producido durante el proceso de soldadura con respecto al aumento del número de pases en el cordón.

La Tabla 4.3 y gráfica 4.6 muestra como el comportamiento de las probetas tratadas térmicamente posterior al proceso de soldadura tienden a mantenerse estable a medida que se aleja del condón de soldadura al igual que cuando va aumentando el número de pases que posee el cordón, con lo que se comprueba que el tratamiento térmico realizado alivia las tensiones presentes en el material permitiendo que la dureza se estandarice a lo largo de la zona estudiada en la probeta. Estos resultados se corroboran con el estudio de la microestructura de las probetas tratadas térmicamente como se observa en la Fig. 4.9, 4.13, 4.17, 4.21, donde se muestra como el tamaño de grano se homogeniza a lo largo de la zona estudiada.

El comportamiento de la microdureza de las probetas con dos pases, mostrada en la gráfica 4.1, la probeta no tratada alcanza su máxima dureza a 2 mm del cordón con un valor de 147,660 Hv, con una disminución de 10% alcanza su mínimo valor en 8 mm, con 132,849 Hv, mientras la probeta tratada obtiene su valor máximo de 140,083 Hv en el punto inicial y alcanza su mínimo valor con una reducción de 2 % a 8 mm de 137,383 Hv.

En la gráfica 4.2 presenta el comportamiento de la probeta con 4 pases en el cordón el máximo valor de dureza en la probeta no tratada se da a 2 mm del cordón con valor de 147,660 Hv, mientras que la probeta tratada tiene un valor de 141.633 Hv. La probeta tratada oscila su valor inicial hasta 8 mm donde alcanzó su valor máximo de 143,933 HV.

En la grafica 4.3, se observa que para probetas con 6 pases sin tratamiento térmico posee una dureza máxima de 176,300 Hv a 2 mm del cordón, que a medida que se aleja del cordón alcanza su mínima dureza a 8 mm de 133,767 Hv, la tendencia de las probetas tratadas para estas condiciones de soldeo es distinta a la probeta anterior, debido que la tratada a 2mm inicia con una dureza de 144,400 Hv y

en seguidamente asciende hasta alcanzar una dureza máxima de 153,00 Hv a 4 mm para luego descender a una dureza mínima de 140,400 Hv.

En la grafica 4.4, se muestra la tendencia de las probetas con 8 pases, tanto tratada como no tratada térmicamente, se observa que ambas probetas alcanza la misma dureza a una distancia aproximada de 3.6 mm con 160 Hv, previamente las probetas de 8 pases sin tratar inician a 2 mm con una dureza máxima de 195,650 Hv, la cual disminuye a medida que se aleja del cordón a una dureza de 156.650 Hv en 8 mm siendo esta su mínima dureza, punto en el cual la probeta tratada alcanza su máxima dureza con 163,050 Hv.

La zona afecta por el calor aumenta conforme aumenta el calor inducido durante proceso de soldadura como se muestra en la figura 4.24, donde se aprecia el efecto que causa el aumento del número de pases en el cordón en la zona afectada por el calor. Producto de las distorsiones térmicas se generan esfuerzos denominados esfuerzos residuales macro estructurales.

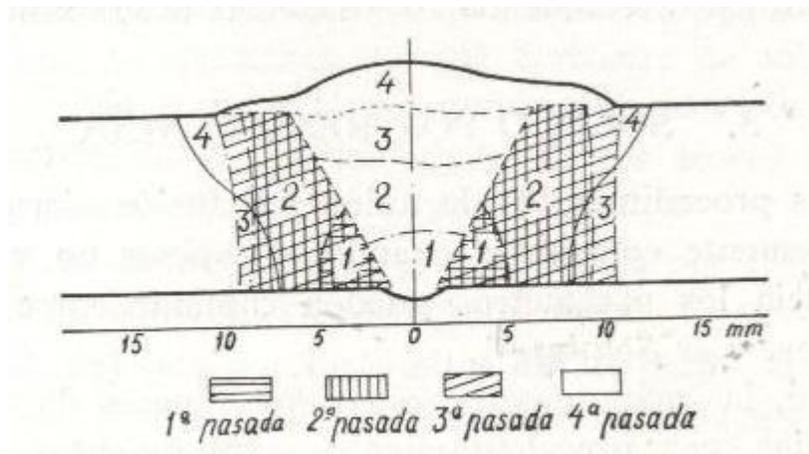


Figura 4.24 Efecto del ciclo térmico de las pasadas sucesivas de soldeo en las transformaciones del metal base. Fuente [17].

El aumento sucesivo de pases en el cordón genera un mayor aporte calórico a la zona soldada y al material base durante el proceso de soldadura, trayendo como consecuencia que el efecto térmico que se produce por el proceso de soldadura sea aun mayor, debido a que las dilataciones que sufre el material por el calentamiento y las posteriores contracciones por las rápidas velocidades de enfriamiento son mayores conforme aumenta el calor inducido en el material, gracias a lo cual se presenta en el mayores valores de esfuerzo residual.

En la gráfica 4.8 se observa el comportamiento lineal de los esfuerzos residuales obtenidos con la aplicación de la correlación planteada por E.J. Pavlina y C.J. Van Tyne entre el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo ultimo con la dureza de los aceros.

El comportamiento de los esfuerzos residuales a medida que se alejan del cordón de soldadura es decreciente pasando de esfuerzos residuales a tracción a esfuerzos residuales a compresión, la tendencia obtenida se corrobora con la teoría de Masubushi K (1980), en su analogía de las tres (3) barras donde plantea que producto del ciclo térmico que ocurre en el cordón del soldadura se generan esfuerzos residuales a tracción en las cercanías del cordón y en los puntos más alejados se generan esfuerzos a compresión, y con el estudio realizado por Carlos F Ajila C sobre el estudio y control de distorsión en estructuras de acero soldadas.

Analizando el comportamiento de los esfuerzos residuales para probetas con dos (2) pases en el cordón de soldadura (ver gráfica 4.8), se observa que a 2 mm del cordón existe un esfuerzo residual de tracción de 21,214 MPa a 3,2 mm se observa el punto a partir del cual se presentan esfuerzos a compresión tendiendo a mantenerse estable en un mismo valor entre -10 MPa y -12 Mpa.

El comportamiento de la gráfica que presenta a las probetas soldadas con 4 cordones (ver gráfica 4.8), a 2 mm del cordón presentan un esfuerzo a tracción de 37,146 MPa, a 4,6 mm del cordón se presenta el punto a partir del cual pasan a ser

esfuerzos a compresión que no tiene a estabilizarse (como ocurre para dos (2) pases en el cordón) aumentando hasta alcanzar un punto de inflexión a -52, 080 MPa a 6 mm del cordón a partir del cual empieza a disminuir. Este comportamiento inestable que se observa en la zona de compresión tiende a presentarse por las alteraciones en el ciclo térmico del proceso de soldadura productor del doble bisel realizado.

Para 6 pases (ver gráfica 4.8) en el cordón de soldadura a 2 mm del cordón se observa un esfuerzo a tracción de 89,320 MPa, a 3,4 mm los esfuerzos residuales comienzan a ser de compresión y a 4 mm presenta un valor de -23,24 MPa y a partir de este punto tiende a estabilizarse en un valor entre -2,519 MPa y -18,573 MPa.

Analizando la tendencia de la curva para 8 pases de soldadura (ver gráfica 4.8) se observa como a 2 mm se presenta un valor de 93,520 MPa, a 7,2 mm comienza a presentarse en la probeta la zona de compresión alcanzando un valor de -17,546 MPa a 8 mm del cordón.

Comparando el comportamiento de los diferentes pases estudiados presentes en las gráficas 4.8, se observa claramente que el mayor valor de esfuerzo de tracción se presenta para 8 pases en el cordón de soldadura.

Tanto la configuración de doble bisel como las condiciones ambientales afectan la uniformidad del enfriamiento del cordón y las zonas adyacentes a la soldadura, razón por la cual únicamente para las probetas soldadas con 4 pases en su cordón presenta un comportamiento inestable en la zona de compresión, lo cual es consecuencia de que hayan sido soldadas días diferentes (Condiciones ambientales diferentes).

Promediando los esfuerzos residuales presentes para cada número de pase estudiado obtenemos las gráfica 4.9, donde observamos que a medida que aumenta el número de pases aumenta el valor del esfuerzo residual, dichos resultados se corroboran con lo establecido por Carlos F Ajila C, en su estudio y control de

distorsiones en estructuras de acero soldadas(2008), donde establece que soldaduras hechas con una sola pasada tienen menores niveles de tensiones residuales que la misma unión realizada en múltiples pasadas.

El valor de los esfuerzos residuales obtenidos por el uso de galgas extensométricas se observa en la gráfica 4.10, donde el perfil del comportamiento de los esfuerzos se convalida con los resultados obtenidos mediante la correlación del esfuerzo de fluencia y el esfuerzo último con la dureza de los aceros, ya que presentan la misma tendencia aumentando el valor del esfuerzo residual con el aumento del número de pases en el cordón de soldadura.

Ambos métodos utilizados para el cálculo de los esfuerzos residuales presentan la misma tendencia a aumentar con un mayor número de pases en el cordón de soldadura, sin embargo los valores de esfuerzos obtenidos por el uso de galgas extensométricas son mayores a los obtenidos por la correlación del esfuerzo de fluencia y el esfuerzo último con la dureza de los aceros.

La diferencia entre los esfuerzos obtenidos por el ensayo de tracción con galgas extensométricas y el de dureza, se esperaba ocurriera justo de esta manera presentado mayores valores los esfuerzos obtenidos por galgas.

Las diferencias en los valores se debe principalmente a que el uso de galgas extensométricas miden netamente la deformación longitudinal que sufre la probeta al ser sometida a tracción, mientras que con el ensayo de microdureza el indentador al entrar en contacto con la superficie de la probeta mide deformaciones en todas las direcciones alrededor del mismo, como lo explica M. Mata, M. Anglada y J. Alcalá en su estudio realizado de ecuaciones de dureza para la caracterización de metales mediante indentación puntiaguda, por lo cual es fuerza que se consigue por medio del ensayo de dureza es un esfuerzo global dentro del cual se generan esfuerzos que se contrarrestan entre si y al ser proyectado al plano longitudinal resultan de menor valor mientras que las galgas extensométricas no sufren de este fenómeno ya que

miden una deformación única en la dirección longitudinal que da como resultado un único esfuerzo en esa dirección.

Otro factor que se debe considerar en la diferencia de valores entre los dos ensayos es la gran sensibilidad que poseen las galgas extensométricas, si muy bien este factor es gracias a lo cual son muy buenas para la realización de este tipo de estudios y muy precisas en los resultados de que obtienen de ellas, también provoca que las mediciones se puedan ver afectadas por factores como interferencia en el cableado o sensibilidad a la temperatura del ambiente.

CAPÍTULO 1

El problema

1.1 Introducción.

La soldadura eléctrica por arco, es el procedimiento por el que se realiza la unión entre dos partes metálicas, aprovechando el calor desarrollado por el arco eléctrico que se libera entre un electrodo y el material por soldar. Los esfuerzos mecánicos son considerados factores de gran influencia en el deterioro de las soldaduras. Por tal razón investigadores e ingenieros se ha dedicado a estudiarlos, con el fin de conocer sus características y la forma de disminuirlos o eliminarlos.

1.2 Planteamiento del Problema:

Los procesos de soldadura son muy comúnmente utilizados a niveles industriales, el factor principal que hace el proceso de soldadura un método de gran utilidad es por su grado de simplicidad y, por tanto, su bajo precio. A pesar de la gran variedad de procesos de soldadura disponibles, la soldadura manual de arco eléctrico no ha sido desplazada del mercado.

En un proceso de soldadura existen diferentes parámetros que deben ser controlados para obtener una soldadura adecuada para su aplicación, el número de pasadas es uno de ellos y en una unión soldada es un parámetro de gran influencia ya que este depende del tipo y espesor de material que se vaya a soldar.

La utilización de los procesos de soldadura puede traer como resultado el surgimiento de esfuerzos mecánicos debido a la expansión y contracción del material, que pueden llegar a tener valores elevados y no permisibles. Frecuentemente, estos esfuerzos son de tal magnitud que es preciso atenuarlas para prevenir la excesiva distorsión o agrietamiento de la pieza.

Los esfuerzos mecánicos son considerados factores de gran influencia en el deterioro de las soldaduras. Por tal razón investigadores e ingenieros se ha dedicado a estudiarlos, con el fin de conocer sus características y la forma de disminuirlos o eliminarlos. De ahí nace la importancia de realizar un estudio que determine la influencia del número de pasadas en una soldadura de arco eléctrico en la magnitud de los esfuerzos mecánicos para un acero al carbono, con la finalidad de obtener el comportamiento de los esfuerzos en dichas uniones en función del número de pasadas que posee la soldadura.

1.3 Objetivos.

1.3.1. Objetivo General del Trabajo:

Determinar la influencia del número de pasadas en una soldadura de arco eléctrico, en la magnitud de los esfuerzos mecánicos para un acero A-36.

1.3.2 Objetivos Específicos:

1. Obtener las propiedades mecánicas iniciales del material de trabajo.
2. Determinar los esfuerzos mecánicos para soldaduras a tope con diferente número de pasadas mediante la diferencia de los esfuerzos de tracción obtenidos en el ensayo entre las probetas sometidas a recocido después de ser soldadas y las que no.
3. Comparar los valores de esfuerzos mecánicos obtenidos en relación al número de pasadas de la soldadura.

4. Analizar y discutir sobre el comportamiento de los valores de esfuerzos mecánicos obtenidos para cada número de pasadas.

1.4 Justificación.

Los esfuerzos mecánicos habitualmente son identificados como uno de los factores que influyen en el deterioro de las construcciones soldadas. Desde hace algún tiempo los ingenieros e investigadores se han dado a la tarea de estudiarlas para determinar sus características, así como las formas de atenuarlas o eliminarlas de tal manera que se ha llegado a lograr el objetivo con tratamientos térmicos y mecánicos; ambos bien conocidos.

Las industrias en general se basan en la obtención de diseños de elementos mecánicos a elevados niveles de seguridad y bajos costos de manufactura, lo cual se evita el sobre diseño que es la meta de cada diseñador, siempre y cuando siga la propensión de no afectar la fiabilidad de los elementos a manufacturar.

Las soldaduras como un ejemplar uso para uniones en los diseños mecánicos, deberían de tener factores de confiabilidad que permitan diseñar de manera muy segura debido que normalmente los elementos mecánicos operan a grandes cargas, sin embargo hay factores que se omiten al momento del diseño, que como consecuencia presentan un gran historial de fallas producto de un mal soldeo en las uniones que acarrearán esfuerzos en el material a soldar siendo así uno de los principales motivos de fallas.

La importancia de este trabajo radica en la determinación de los esfuerzos mecánicos producidos por soldadura de arco eléctrico en el material a estudiar, esfuerzos que eventualmente para nuestros estudios son generados por la soldadura, exactamente en la zona crítica que es afectada por cada operación de soldadura, es decir por múltiples pasadas a operar en cada unión.

1.5 Limitaciones.

- Disponibilidad de los equipos necesarios para las pruebas y ensayos mecánicos a realizar para la determinación de los esfuerzos mecánicos.
- Los ensayos y pruebas necesarios dependen directamente de la disponibilidad de ayuda técnica para la investigación.

1.6 Delimitaciones.

- El cálculo de los esfuerzos mecánicos solo se enfoca para un acero ASTM A36. Con un número de muestras igual a diez (10) por cada pasada, de las cuales cinco (5) se someterán a un proceso de recocido después de ser soldadas y cinco (5) no.
- Se tomará un número de pasadas máximo, igual a cuatro (4) para cada soldadura
- El tipo de soldadura a estudiar será únicamente soldadura manual de arco eléctrico.
- El cordón de soldadura será el correspondiente a una soldadura a tope.
- Se tomará en cuenta únicamente el efecto térmico de la soldadura en los esfuerzos mecánicos.
- El cálculo de los esfuerzos mecánicos será un esfuerzo global en la soldadura, que se obtendrá mediante un ensayo de tracción.

1.7 Antecedentes preliminares:

- **Carlos Fabián Ajila Camacho** en GUAYAQUIL – ECUADOR (2008) realizó el siguiente trabajo de grado “**Estudio y Control de Distorsión en Estructuras de Acero Soldadas**”. En este trabajo se presentó de forma detallada como se generan las distorsiones en los diferentes elementos soldados que se encuentran en todo tipo de construcciones industriales que hoy en día demandan la utilización de estructuras metálicas. La soldadura con arco eléctrico produce expansiones y contracciones térmicas en los metales,

que a su vez provocan esfuerzos internos en la soldadura; dichos esfuerzos producen las distorsiones en los elementos soldados. En este trabajo se analizaron los métodos para el control de la distorsión en elementos soldados y se compararon los valores de distorsión usando las ecuaciones empíricas propuestas con las obtenidas directamente de piezas soldadas. En el capítulo dos se detallan los fundamentos teóricos de los esfuerzos térmicos que se producen en la soldadura, así como las técnicas de medición y las técnicas de alivio de estos esfuerzos.

- **W. Bullón C. , J. Acosta S. , R. Franco R. , Q. Valverde G.** 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 Pontificia Católica del Perú en el año 2007, con la finalidad de obtener una aproximación a los esfuerzos y deformaciones residuales, con el propósito de emplear los resultados para prever problemas de fabricación y aplicación de piezas obtenidas mediante este proceso, abarca su primera hipótesis 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. Como consecuencia de ésta y de las demás consideraciones, se obtiene un modelo simple y suficientemente aproximado para el propósito definido.
- **Busato O. Giancarlo y Busato O. Pierluigi (2004)** Estudiaron la influencia del número de pasadas de soldadura en un tubería de acero ASTM A106 Gr-B. El proceso de soldadura se realizó según las normas API, mientras que la

realización de los ensayos fue siguiendo la norma ASTM. El proceso de soldadura se hizo con probetas sin precalentamiento y con precalentamiento y tomando en cuenta que se vario los pases de soldadura de tres (3), cuatro (4) y cinco (5) pasadas. Se realizaron ensayos de doblado y tracción así como de dureza y microestructura para observar como la soldadura influye en el comportamiento del material. Se observó que el material precalentado presento una mejor microestructura homogeneizada con respecto al material sin precalentar y también la ductilidad del material precalentado es mayor al material sin precalentamiento.

- **José E. Horioka Osaka y Jorge Alencastre Miranda (2002).** Realizaron el siguiente trabajo de grado “**Estudios de los esfuerzos en uniones soldadas por el método de los elementos infinitos**”. En el Grupo de métodos computacionales de la Facultad de ciencias e ingeniería en la Sección ingeniería Mecánica de la Pontificia Universidad Católica del Perú. El trabajo 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). Los tipos de uniones simuladas e esta investigación son las recomendadas por los AWS. A demás se utilizaron las propiedades correspondientes a un acero estructural ASTM A36. En este trabajo se considero que los parámetros geométricos que afectan principalmente a una unión soldada son la sobre monta y las socavaciones, estos dos factores pueden variar significativamente el valor de los esfuerzos en comparación con el resultado del cálculo analítico.

CAPÍTULO 2

Marco teórico

2. 1 Definición de soldadura.

La soldadura es un proceso de fabricación en donde se realiza la unión de dos materiales, generalmente metales o termoplásticos, usualmente logrado a través de la fusión, en la cual las piezas son soldadas fundiendo ambas y agregando un material de relleno fundido metal o plástico, el cual tiene un punto de fusión menor al de la pieza a soldar, para conseguir un baño de material fundido que, al enfriarse, se convierte en una unión fija. A veces la presión es usada conjuntamente con el calor, o por sí misma, para producir la soldadura.

Muchas fuentes de energía diferentes pueden ser usadas para la soldadura, incluyendo una llama de gas, un arco eléctrico, un láser, un rayo de electrones, procesos de fricción o ultrasonido. La energía necesaria para formar la unión entre dos piezas de metal generalmente proviene de un arco eléctrico. La energía para soldaduras de fusión o termoplásticos generalmente proviene del contacto directo con una herramienta o un gas caliente.

Mientras que con frecuencia es un proceso industrial, la soldadura puede ser hecha en muchos ambientes diferentes, incluyendo al aire libre, debajo del agua y en

el espacio. Sin importar la localización, sin embargo, la soldadura sigue siendo peligrosa, y se deben tomar precauciones para evitar quemaduras, descarga eléctrica, humos venenosos, y la sobreexposición a la luz ultravioleta.[12]

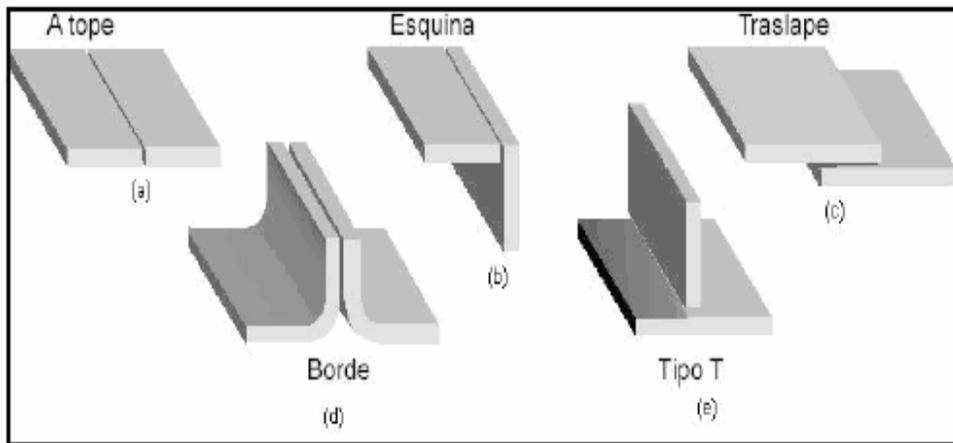


Figura 2.1.- Tipos de uniones por soldadura. Fuente [12].

- a) Unión a tope. En este tipo de unión, las partes se encuentran en el mismo plano y se unen en sus bordes.
- b) Unión de esquina. Las partes en una unión de esquina forman un ángulo recto y se unen en la esquina del ángulo.
- c) Unión traslape. Esta unión consiste en dos partes que se superponen.
- d) 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.
- e) Unión en T. En la unión en T, una parte es perpendicular a la otra en una forma parecida a la letra T.

2.2 Tipo de soldadura.

2.2.1 La soldadura de arco metálico con gas (GMAW).

También conocida como soldadura de gas de metal inerte o soldadura MIG, es un proceso semiautomático o automático que usa una alimentación continua de alambre como electrodo y una mezcla de gas inerte o semi-inerte para proteger la soldadura contra la contaminación. Como con la SMAW, la habilidad razonable del operador puede ser alcanzada con entrenamiento modesto. Puesto que el electrodo es continuo, las velocidades de soldado son mayores para la GMAW que para la SMAW. También, el tamaño más pequeño del arco, comparado a los procesos de soldadura de arco metálico protegido, hace más fácil hacer las soldaduras fuera de posición (ej, empalmes en lo alto, como sería soldando por debajo de una estructura).

El equipo requerido para realizar el proceso de GMAW es más complejo y costoso que el requerido para la SMAW, y requiere un procedimiento más complejo de disposición. Por lo tanto, la GMAW es menos portable y versátil, y debido al uso de un gas de blindaje separado, no es particularmente adecuado para el trabajo al aire libre. Sin embargo, debido a la velocidad media más alta en la que las soldaduras pueden ser terminadas, la GMAW es adecuada para la soldadura de producción. El proceso puede ser aplicado a una amplia variedad de metales, tanto ferrosos como no ferrosos. Un proceso relacionado, la soldadura de arco de núcleo fundente (FCAW), usa un equipo similar pero utiliza un alambre que consiste en un electrodo de acero rodeando un material de relleno en polvo. [2]

2.2.2 soldadura manual con electrodo revestido (SMAW, Shielded Metal Arc Welding).

También es conocida como soldadura manual de arco metálico (MMA) o soldadura de electrodo. Este proceso usa una fuente de alimentación para soldadura

para crear y mantener un arco eléctrico entre un electrodo y el material base para derretir los metales en el punto de la soldadura. La corriente eléctrica se usa para crear un arco entre el material base y la varilla de electrodo consumible, que es de acero y está cubierto con un fundente que protege el área de la soldadura contra la oxidación y la contaminación por medio de la producción del gas CO_2 durante el proceso de la soldadura.

El proceso es versátil y puede realizarse con un equipo relativamente barato, haciéndolo adecuado para trabajos de taller y trabajo de campo. Un operador puede hacerse razonablemente competente con una modesta cantidad de entrenamiento y puede alcanzar la maestría con experiencia. Los tiempos de soldadura son algo lentos, puesto que los electrodos consumibles deben ser sustituidos con frecuencia y porque la escoria, el residuo del fundente, debe ser retirada después de soldar. Además, el proceso es generalmente limitado a materiales de soldadura ferrosos, aunque electrodos especializados han hecho posible la soldadura del hierro fundido, níquel, aluminio, cobre, y de otros metales.[2]

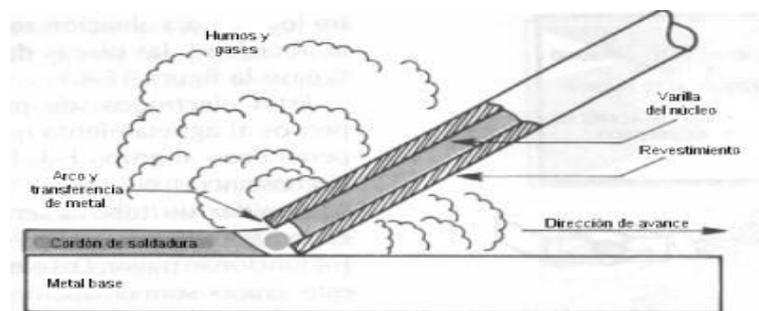


Figura 2.2. Esquema de soldadura manual con electrodo sumergido. Fuente [2].

2.2.3 La soldadura de arco de gas de tungsteno (GTAW)

También conocida como la soldadura de gas inerte de tungsteno (TIG) (también a veces designada erróneamente como soldadura heliarc), es un proceso manual de

soldadura que usa un electrodo de tungsteno no consumible, una mezcla de gas inerte o semi-inerte, y un material de relleno separado. Especialmente útil para soldar materiales finos, este método es caracterizado por un arco estable y una soldadura de alta calidad, pero requiere una significativa habilidad del operador y solamente puede ser lograda en velocidades relativamente bajas.

La GTAW puede ser usada en casi todos los metales soldables, aunque es aplicada más a menudo a metales de acero inoxidable y livianos. Con frecuencia es usada cuando son extremadamente importantes las soldaduras de calidad. Un proceso relacionado, la soldadura de arco de plasma, también usa un electrodo de tungsteno pero utiliza un gas de plasma para hacer el arco. El arco es más concentrado que el arco de la GTAW, haciendo el control transversal más crítico y así generalmente restringiendo la técnica a un proceso mecanizado. Debido a su corriente estable, el método puede ser usado en una gama más amplia de materiales gruesos que el proceso GTAW, y además, es mucho más rápido. Puede ser aplicado a los mismos materiales que la GTAW excepto al magnesio, y la soldadura automatizada del acero inoxidable es una aplicación importante del proceso. Una variación del proceso es el corte por plasma, un eficiente proceso de corte de acero. [13]

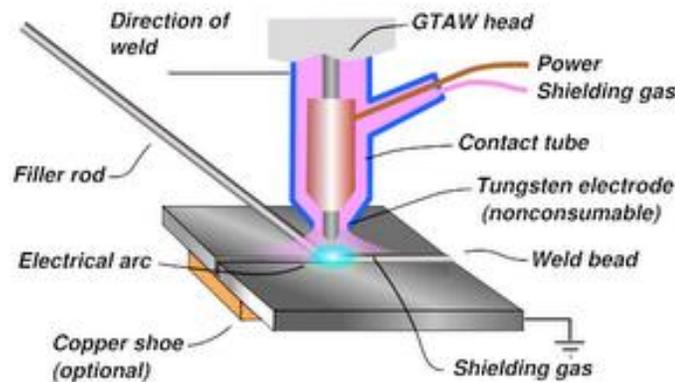


Figura 2.3 Esquema de soldadura de arco de gas de tungsteno. Fuente [13].

2.2.4 La soldadura de arco sumergido (SAW).

Es un método de soldadura de alta productividad en el cual el arco se pulsa bajo una capa de cubierta de flujo. Esto aumenta la calidad del arco, puesto que los contaminantes en la atmósfera son bloqueados por el flujo. La escoria que forma la soldadura generalmente sale por sí misma, y combinada con el uso de una alimentación de alambre continua, la velocidad de deposición de la soldadura es alta. Las condiciones de trabajo están muy mejoradas sobre otros procesos de soldadura de arco, puesto que el flujo oculta el arco y casi no se produce ningún humo. El proceso es usado comúnmente en la industria, especialmente para productos grandes y en la fabricación de los recipientes de presión soldados.²¹ Otros procesos de soldadura de arco incluyen la soldadura de hidrógeno atómico, la soldadura de arco de carbono, la soldadura de electroescoria, la soldadura por electrogas, y la soldadura de arco de perno.[10]



Figura 2.4 Esquema de soldadura de arco sumergido. Fuente [10].

2.2.5 Soldadura por resistencia.

Implica la generación de calor pasando corriente a través de la resistencia causada por el contacto entre dos o más superficies de metal. Se forman pequeños charcos de metal fundido en el área de soldadura a medida que la elevada corriente

(1.000 a 100.000 A) pasa a través del metal. En general, los métodos de la soldadura por resistencia son eficientes y causan poca contaminación, pero sus aplicaciones son algo limitadas y el costo del equipo puede ser alto.[13]

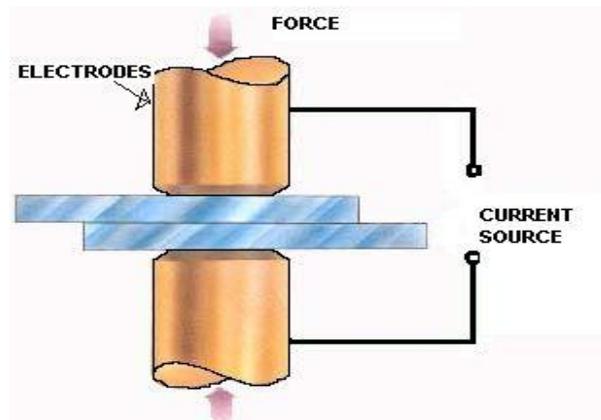


Figura 2.5 Esquema de soldadura por resistencia. Fuente [13].

2.2.6 La soldadura por puntos.

Es un popular método de soldadura por resistencia usado para juntar hojas de metal solapadas de hasta 3 mm de grueso. Dos electrodos son usados simultáneamente para sujetar las hojas de metal juntas y para pasar corriente a través de las hojas. Las ventajas del método incluyen el uso eficiente de la energía, limitada deformación de la pieza de trabajo, altas velocidades de producción, fácil automatización, y el no requerimiento de materiales de relleno. La fuerza de la soldadura es perceptiblemente más baja que con otros métodos de soldadura, haciendo el proceso solamente conveniente para ciertas aplicaciones. Es usada extensivamente en la industria de automóviles -- Los carros ordinarios puede tener varios miles de puntos soldados hechos por robots industriales. Un proceso especializado, llamado soldadura de choque, puede ser usada para los puntos de soldadura del acero inoxidable.

Como la soldadura de punto, la soldadura de costura confía en dos electrodos para aplicar la presión y la corriente para juntar hojas de metal. Sin embargo, en vez de electrodos de punto, los electrodos con forma de rueda, ruedan a lo largo y a menudo alimentan la pieza de trabajo, haciendo posible las soldaduras continuas largas. En el pasado, este proceso fue usado en la fabricación de latas de bebidas, pero ahora sus usos son más limitados. Otros métodos de soldadura por resistencia incluyen la soldadura de destello, la soldadura de proyección, y la soldadura de volcado.[19]



Figura 2.6. Soldador de punto. Fuente [19].

2.2.7 Soldadura por rayo de energía.

Llamados soldadura por rayo láser y soldadura con rayo de electrones, son procesos relativamente nuevos que han llegado a ser absolutamente populares en aplicaciones de alta producción. Los dos procesos son muy similares, diferenciándose más notablemente en su fuente de energía. La soldadura de rayo láser emplea un rayo láser altamente enfocado, mientras que la soldadura de rayo de electrones es hecha en un vacío y usa un haz de electrones. Ambas tienen una muy alta densidad de energía, haciendo posible la penetración de soldadura profunda y minimizando el tamaño del

área de la soldadura. Ambos procesos son extremadamente rápidos, y son fáciles de automatizar, haciéndolos altamente productivos. Las desventajas primarias son sus muy altos costos de equipo (aunque éstos están disminuyendo) y una susceptibilidad al agrietamiento. Los desarrollos en esta área incluyen la soldadura de láser híbrido, que usa los principios de la soldadura de rayo láser y de la soldadura de arco para incluso mejores propiedades de soldadura.

2.2.8 Soldadura de estado sólido.

Como el primer proceso de soldadura, la soldadura de fragua, algunos métodos modernos de soldadura no implican derretimiento de los materiales que son juntados. Uno de los más populares, la soldadura ultrasónica, es usado para conectar hojas o alambres finos hechos de metal o termoplásticos, haciéndolos vibrar en alta frecuencia y bajo alta presión. El equipo y los métodos implicados son similares a los de la soldadura por resistencia, pero en vez de corriente eléctrica, la vibración proporciona la fuente de energía. Soldar metales con este proceso no implica el derretimiento de los materiales; en su lugar, la soldadura se forma introduciendo vibraciones mecánicas horizontalmente bajo presión. Cuando se están soldando plásticos, los materiales deben tener similares temperaturas de fusión, y las vibraciones son introducidas verticalmente. La soldadura ultrasónica se usa comúnmente para hacer conexiones eléctricas de aluminio o cobre, y también es un muy común proceso de soldadura de polímeros.

Otro proceso común, la soldadura explosiva, implica juntar materiales empujándolos juntos bajo una presión extremadamente alta. La energía del impacto plastifica los materiales, formando una soldadura, aunque solamente una limitada cantidad de calor sea generada. El proceso es usado comúnmente para materiales disímiles de soldadura, tales como la soldadura del aluminio con acero en cascos de naves o placas compuestas. Otros procesos de soldadura de estado sólido incluyen la

soldadura de coextrusión, la soldadura en frío, la soldadura de difusión, la soldadura por fricción, la soldadura por alta frecuencia, la soldadura por presión caliente, la soldadura por inducción, y la soldadura de rodillo.[13]

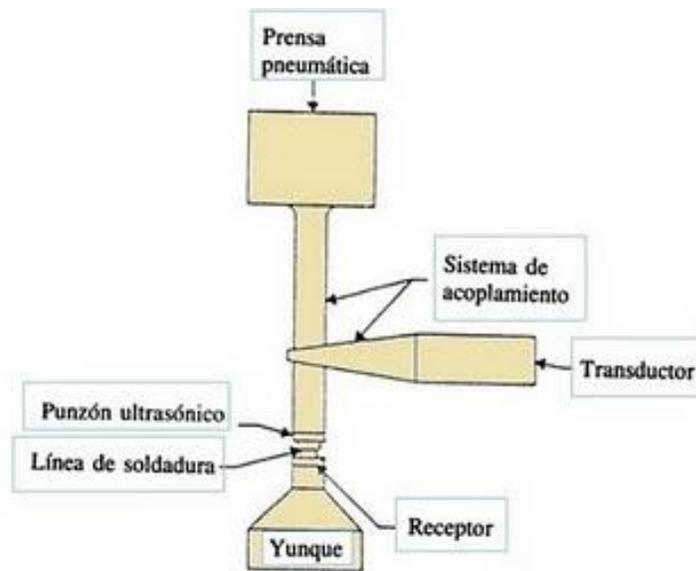


Figura 2.7 Esquema de soldadura ultrasónica. Fuente [13].

2. 3 Fuentes de energía en soldadura.

Para proveer la energía eléctrica necesaria para los procesos de la soldadura de arco, pueden ser usadas un número diferentes de fuentes de alimentación. La clasificación más común son las fuentes de alimentación de corriente constante y las fuentes de alimentación de voltaje constante. En la soldadura de arco, la longitud del arco está directamente relacionada con el voltaje, y la cantidad de entrada de calor está relacionada con la corriente. Las fuentes de alimentación de corriente constante son usadas con más frecuencia para los procesos manuales de soldadura tales como la soldadura de arco de gas tungsteno y soldadura de arco metálico blindado, porque ellas mantienen una corriente constante incluso mientras el voltaje varía. Esto es importante en la soldadura manual, ya que puede ser difícil sostener el electrodo

perfectamente estable, y como resultado, la longitud del arco y el voltaje tienden a fluctuar. Las fuentes de alimentación de voltaje constante mantienen el voltaje constante y varían la corriente, y como resultado, son usadas más a menudo para los procesos de soldadura automatizados tales como la soldadura de arco metálico con gas, soldadura por arco de núcleo fundente, y la soldadura de arco sumergido. En estos procesos, la longitud del arco es mantenida constante, puesto que cualquier fluctuación en la distancia entre material base es rápidamente rectificado por un cambio grande en la corriente. Por ejemplo, si el alambre y el material base se acercan demasiado, la corriente aumentará rápidamente, lo que a su vez causa que aumente el calor y la extremidad del alambre se funda, volviéndolo a su distancia de separación original.

El tipo de corriente usado en la soldadura de arco también juega un papel importante. Los electrodos de proceso consumibles como los de la soldadura de arco de metal blindado y la soldadura de arco metálico con gas generalmente usan corriente directa, pero el electrodo puede ser cargado positiva o negativamente. En la soldadura, el ánodo cargado positivamente tendrá una concentración mayor de calor, y como resultado, cambiar la polaridad del electrodo tiene un impacto en las propiedades de la soldadura. Si el electrodo es cargado negativamente, el metal base estará más caliente, incrementando la penetración y la velocidad de la soldadura. Alternativamente, un electrodo positivamente cargado resulta en soldaduras más superficiales. Los procesos de electrodo no consumibles, tales como la soldadura de arco de gas tungsteno, pueden usar cualquier tipo de corriente directa, así como también corriente alterna. Sin embargo, con la corriente directa, debido a que el electrodo solo crea el arco y no proporciona el material de relleno, un electrodo positivamente cargado causa soldaduras superficiales, mientras que un electrodo negativamente cargado hace soldaduras más profundas. La corriente alterna se mueve rápidamente entre estos dos, dando por resultado las soldaduras de mediana penetración. Una desventaja de la CA, el hecho de que el arco debe ser reencendido

después de cada paso por cero, se ha tratado con la invención de unidades de energía especiales que producen un patrón cuadrado de onda en vez del patrón normal de la onda de seno, haciendo posibles pasos a cero rápidos y minimizando los efectos del problema.[13]

2. 4 Soldabilidad.

La calidad de una soldadura también es dependiente de la combinación de los materiales usados para el material base y el material de relleno. No todos los metales son adecuados para la soldadura, y no todos los metales de relleno trabajan bien con materiales bases aceptables. [9]

2.4.1 Soldabilidad en aceros.

Es inversamente proporcional a una propiedad conocida como la templabilidad del acero, que mide la probabilidad de formar la martensita durante el tratamiento de soldadura o calor. La templabilidad del acero depende de su composición química, con mayores cantidades de carbono y de otros elementos de aleación resultando en mayor templabilidad y por lo tanto una soldabilidad menor. Para poder juzgar las aleaciones compuestas de muchos materiales distintos, se usa una medida conocida como el contenido equivalente de carbono para comparar las soldabilidades relativas de diferentes aleaciones comparando sus propiedades a un acero al carbono simple. El efecto sobre la soldabilidad de elementos como el cromo y el vanadio, mientras que no es tan grande como la del carbono, es por ejemplo más significativa que la del cobre y el níquel. A medida que se eleva el contenido equivalente de carbono, la soldabilidad de la aleación decrece. La desventaja de usar simple carbono y los aceros de baja aleación es su menor resistencia - hay una compensación entre la resistencia del material y la soldabilidad. Los aceros de alta resistencia y baja aleación fueron desarrollados especialmente para los usos en la

soldadura durante los años 1970, y estos materiales, generalmente fáciles de soldar tienen buena resistencia, haciéndolos ideales para muchas aplicaciones de soldadura.

Debido a su alto contenido de cromo, los aceros inoxidables tienden a comportarse de una manera diferente a otros aceros con respecto a la soldabilidad. Los grados austeníticos de los aceros inoxidables tienden a ser más soldables, pero son especialmente susceptibles a la distorsión debido a su alto coeficiente de expansión térmica. Algunas aleaciones de este tipo son propensas a agrietarse y también a tener una reducida resistencia a la corrosión. Si no está controlada la cantidad de ferrita en la soldadura es posible el agrietamiento caliente. Para aliviar el problema, se usa un electrodo que deposita un metal de soldadura que contiene una cantidad pequeña de ferrita. Otros tipos de aceros inoxidables, tales como los aceros inoxidables ferríticos y martensíticos, no son fácilmente soldables, y a menudo deben ser precalentados y soldados con electrodos especiales [9]

2.5 Aplicación de norma discontinuidades y defectos en soldaduras.

Toda soldadura tiene una zona crítica que es la raíz de la soldadura, de manera que aquí se adjuntan unas figuras con raíces de soldaduras a tope y filete.

- Discontinuidad - Falta de continuidad; falta de cohesión (de unión); interrupción en la estructura física normal del material o producto.
- Defecto - Discontinuidad cuyo tamaño, forma, orientación, ubicación o propiedades son inadmisibles para alguna norma específica.

En particular, al realizar un ensayo no destructivo (END) se cataloga como defecto a toda discontinuidad o grupo de discontinuidades cuyas indicaciones no se encuentran dentro de los criterios de aceptación especificados por la norma aplicable.

- Indicación - Respuesta o evidencia de una discontinuidad resultante de la aplicación de un END.

- Evaluación de Indicaciones - Proceso en el cual se decide la severidad del estado de la parte o pieza, luego de que la indicación ha sido interpretada. De la interpretación surgirá que la indicación es irrelevante o es una discontinuidad, y en este último caso surgirá que es un defecto o no. Dicha evaluación lleva a decidir, entonces, si la parte o pieza debe ser rechazada, reparada o aceptada para su uso.

- Indicaciones Irrelevantes - Las condiciones que las causan están presentes por diseño, por accidente, o por otras características de la pieza que no tienen relación con el defecto que está siendo investigado, por lo tanto se desprecian. Por ejemplo: a) indicaciones producidas por campos de fuga (campos magnéticos que abandonan o entran a la superficie de la pieza en una discontinuidad en las propiedades magnéticas o en un cambio de sección de un circuito magnético) en MT. b) indicaciones producidas por una raya en la película radiográfica en RT.

- Método de Ensayo - Utilización de un principio físico en un END, como ser:

RT - Radiografía (Radiographic testing)

UT - Ultrasonido (Ultrasonic testing)

MT - Partículas magnetizables (Magnetic testing)

PT - Líquidos penetrantes (Penetrant liquids testing)

VT - Evaluación visual (Visual testing)

LT - Ensayo de estanqueidad (Leak testing)

ET - Corrientes parásitas (Eddy's current testing)

AE - Emisión acústica (Acoustic emission)

- Procedimiento en END - Es el seguimiento metódico de las reglas que describen cómo la técnica específica será aplicada.

- Técnica en END - Es la manera específica de utilización de un método en particular en END. Cada técnica es especificada por al menos una variable extra que lo distinga de otras técnicas dentro del mismo método. (Por ejemplo - Método: RT - Técnica: Rayos X / Rayos Gamma)

- Indicaciones alargadas (linear indications) – En general se clasifican como indicaciones alargadas a todas aquellas indicaciones cuya longitud L es mayor a 3 veces su ancho A : ($L > 3A$).

- Indicaciones redondeadas (rounded indications) – En general se clasifican como indicaciones redondeadas a todas aquellas indicaciones cuya longitud L es menor o igual a 3 veces su ancho A : ($L \leq 3A$).

- Indicaciones alineadas (radiografía) – Tres o más indicaciones alineadas aproximadamente paralelas al eje de la soldadura, espaciadas lo suficientemente cerca entre ellas como para ser considerada discontinuidad única e intermitente.

Las Discontinuidades más frecuentes que se encuentran en las soldaduras, o que están muy relacionadas con ellas, forman parte de los siguientes veinte tipos:

- 1) Porosidad: Discontinuidad del tipo de cavidad formada por gas atrapado durante la solidificación del metal de soldadura. Se divide a su vez en cuatro tipos:

- a) Porosidad uniformemente dispersa

Es porosidad uniformemente distribuida a lo largo de la soldadura; causada por la aplicación de una técnica de soldadura incorrecta o por materiales defectuosos. Si la soldadura se enfría lo suficientemente lento para permitir que la mayor parte del gas pase a la superficie antes de la solidificación, habrá unos pocos poros en la soldadura.

b) Porosidad agrupada

Es un agrupamiento localizado de poros. Generalmente resulta por un inicio o fin inadecuado del arco de soldadura.

c) Porosidad alineada

Frecuentemente ocurre a lo largo de la interfase metal de soldadura / metal base, la interfase entre cordones de soldadura, o cerca de la raíz de soldadura, y es causada por la contaminación que provoca el gas por su evolución en esos sitios.

d) Porosidad vermicular o tipo gusanos

Es un poro de gas alargado. Este tipo de porosidad de soldadura se extiende desde la raíz hasta la superficie de la soldadura. Cuando uno o más poros son vistos en la superficie de la soldadura, un cuidadoso descarte puede también revelar porosidad subsuperficial. De todas formas, muchas de las porosidades vermiculares encontradas en soldaduras no se extienden hasta la superficie.

2) Inclusiones

a) Inclusiones de escoria

Son sólidos no metálicos atrapados en el metal de soldadura o entre el metal de soldadura y el metal base. Pueden encontrarse en soldaduras hechas por cualquier

proceso de arco. En general, estas inclusiones resultan por fallas en la técnica de soldadura, en el diseño de la junta tal que no permita un acceso adecuado, o en una limpieza inadecuada entre los cordones de la soldadura.

Normalmente, la escoria disuelta fluirá hacia la parte superior de la soldadura, pero muescas agudas en la interfase de metal base y de soldadura, o entre los cordones de soldadura, frecuentemente provocan que la escoria quede atrapada bajo el metal de soldadura. A veces se observan inclusiones de escoria alargadas alineadas en la raíz de la soldadura, denominadas “carrileras” (“wagon tracks”).

b) Inclusiones de Tungsteno

Son partículas de Tungsteno atrapadas en el metal de soldadura y son exclusivas del proceso GTAW (TIG). En este proceso, un electrodo de Tungsteno no consumible es usado para crear el arco entre la pieza y el electrodo. Si el electrodo es sumergido en el metal, o si la corriente es fijada en un valor muy alto, se depositarán gotitas de Tungsteno, o se romperá la punta del electrodo y quedará atrapado en la soldadura.

Dichas inclusiones aparecen como manchas claras en la radiografía, pues el Tungsteno es más denso que el acero y absorbe más radiación; se adjunta una vista de una placa radiográfica con inclusiones de tungsteno.

Casi todas las demás discontinuidades, incluyendo las inclusiones de escoria, se muestran como áreas oscuras en las radiografías porque son menos densas que el acero.

3) Fusión incompleta

Discontinuidad bidimensional causada por la falta de unión entre los cordones de soldadura y el metal base, o entre los cordones de la soldadura.

Es el resultado de técnica de soldadura, preparación del metal base, o diseño de la junta inapropiados.

Entre las deficiencias que causan la fusión incompleta se destacan el insuficiente aporte de calor de soldadura, falta de acceso a todas las superficies de fusión, o ambas.

El óxido fuertemente adherido interferirá con una completa fusión, siempre que haya un correcto acceso a las superficies de fusión y un adecuado aporte de calor a la soldadura.

4) Penetración incompleta o falta de penetración.

Ocurre cuando el metal de soldadura no se extiende a través de todo el espesor de la junta. El área no fundida ni penetrada es una discontinuidad descrita como “penetración incompleta”.

Esta puede resultar de un insuficiente aporte de calor de soldadura, diseño de la junta inapropiado (por ejemplo demasiado espesor para ser penetrado por el arco, o chanfle insuficiente), o control lateral inapropiado del arco de soldadura. Algunos procesos tienen una mayor capacidad de penetración que otros. Las soldaduras en cañerías son especialmente vulnerables a este tipo de discontinuidad, dado que el lado interior es usualmente inaccesible.

Los diseñadores frecuentemente emplean una planchuela de respaldo para auxiliar a los soldadores en tales casos; en ANCAP –División Industrialización se prohíben estos respaldos en cañerías.

Para juntas soldadas de ambos lados, se puede especificar que se remueva el metal de soldadura y el metal base de la soldadura de raíz antes de soldar el otro lado,

para asegurarse que allí no hay penetración incompleta. Este procedimiento se denomina en inglés “back gouging”.

La penetración incompleta también causa una fusión incompleta, y por consiguiente en muchas circunstancias ambos conceptos se mezclan.

5) Fisuras

Ocurren en el metal base y en el metal de aporte, cuando las tensiones localizadas exceden la resistencia última del material. La mayor parte de las normas utilizadas en ANCAP consideran que las fisuras son, independientemente de su longitud, defectos y por lo tanto una vez detectadas deben removerse, eliminarse.

Las fisuras pueden clasificarse en:

- a) Fisuras en caliente: se desarrollan durante la solidificación y su propagación es intergranular (entre granos).
- b) Fisuras en frío: se desarrollan luego de la solidificación, son asociadas comúnmente con fragilización por hidrógeno. Se propagan entre y a través de los granos (inter y transgranular).

Según su forma, las fisuras también se pueden clasificar en:

- a) Fisuras longitudinales: son paralelas al eje de la soldadura. En soldaduras de arco sumergido, son comúnmente asociadas con altas velocidades y a veces están relacionadas con problemas de porosidad, que no se muestran en la superficie. Fisuras longitudinales en pequeñas soldaduras entre grandes secciones, son frecuentemente el resultado de un alto grado de enfriamiento y de grandes restricciones.

b) Fisuras transversales: generalmente son el resultado de esfuerzos debido a contracciones longitudinales actuando en metales de soldadura de baja ductilidad.

c) Cráteres: ocurren cuando el arco es terminado incorrectamente. Generalmente tienen forma de estrella. Son superficiales, se forman en caliente y usualmente forman redes con forma de estrella.

d) De garganta: son fisuras longitudinales ubicadas en la cara de la soldadura. Generalmente, pero no siempre, son fisuras en caliente.

e) De borde: son generalmente fisuras en frío. Se inician y propagan desde el borde de la soldadura, donde se concentran los esfuerzos de contracción. Se inician perpendicularmente a la superficie del metal base. Estas fisuras son generalmente el resultado de contracciones térmicas actuando en la zona afectada térmicamente (ZAT).

f) De raíz: son longitudinales, en la raíz de la soldadura o en la superficie de la misma. Pueden ser fisuras en caliente o en frío.

g) Fisuras bajo el cordón y fisuras en la ZAT: son generalmente fisuras en frío que se forman en la ZAT del metal base. Son generalmente cortas, pero pueden unirse para formar una fisura continua. Las que se dan bajo el cordón, pueden convertirse en un serio problema cuando están presentes: hidrógeno, microestructura poco dúctil y altos esfuerzos residuales. Ambas pueden ser fisuras en caliente o en frío. Son encontrados a intervalos regulares bajo la soldadura y también por el contorno de la ZAT donde los esfuerzos residuales son máximos.

6) Socavadura / mordedura: Asociadas generalmente con técnicas inapropiadas y/o corrientes excesivas de soldadura. La socavadura es una muesca o canaleta o hendidura ubicada en los bordes de la soldadura; es un concentrador de tensiones y además disminuye el espesor de las planchas o caños, todo lo cual es perjudicial. Pueden darse en la raíz o en la cara de la soldadura.

Cuando la socavadura es controlada, su longitud está dentro de los límites especificados y no constituye una muesca profunda, no es considerada un defecto de soldadura.

En la siguiente lámina se observan varias discontinuidades, entre las cuales aparecen socavaduras y concavidades, que es la discontinuidad que sigue; los dos primeros croquis de esta lámina son dos de los tipos de fisuras que vimos inmediatamente antes de la socavadura.

7) Concavidad (“Underfill”)

Se produce cuando el metal de soldadura en la superficie de la cara externa, o en la superficie de la raíz interna, posee un nivel que está por debajo de la superficie adyacente del metal base.

Cuando el soldador tiene acceso por ambos lados de la soldadura, o cuando se da en la cara externa, esta discontinuidad es fácilmente evitable mediante el relleno completo de la unión; por el contrario cuando la concavidad es interna (en la raíz) donde el soldador no tiene acceso (por ejemplo en soldadura de cañerías), si se tiene que eliminar debe removerse, descarnarse, por completo la soldadura en esa zona.

8) Garganta insuficiente (“Insufficient throat”)

Puede ser debido a una depresión en la cara de la soldadura de filete, disminuyendo la garganta, cuya dimensión debe cumplir la especificación dada por el proyectista para el tamaño del filete.

Las fallas del soldador pueden ser: a) no obtener fusión del metal base en la raíz de la soldadura, o b) no depositar suficiente metal de relleno en el área de garganta (en la cara del filete).

En los siguientes croquis se observan las gargantas efectivas de dos soldaduras filete con problemas de diversa índole.

9) Catetos demasiado cortos (“Insufficient legs”)

Es un tamaño menor que el adecuado para su uso, en los catetos de la soldadura de filete. Es de índole similar a la discontinuidad anterior.

10) Solape (“Overlap”) (Metal de soldadura apoyado sobre el metal base sin fundirlo)

Es la porción que sobresale del metal de soldadura más allá del límite de la soldadura o de su raíz. Se produce un falso borde de la soldadura, estando el metal de soldadura apoyado sobre el metal base sin haberlo fundido (como que se derramó el metal fundido sobre el metal base). Puede resultar por un deficiente control del proceso de soldadura, errónea selección de los materiales, o preparación del metal base inapropiados.

Si hay óxidos fuertemente adheridos al metal base, provocarán seguramente esta discontinuidad.

Este metal de soldadura, que ha sido derramado sobre el metal base, es una discontinuidad superficial que forma un concentrador de tensiones similar a una fisura y, por consiguiente, casi siempre es considerada inadmisibles (defecto).

Esta discontinuidad se puede ver en la misma lámina mostrada anteriormente, y en este dibujo de solape en soldadura filete.

11) Sobremona excesiva (“Weld reinforcement”)

La sobremona es un concentrador de tensiones y, además, un exceso de ésta aumenta las tensiones residuales, presentes en cualquier soldadura, debido al aporte sobrante. Por estos motivos las normas limitan el valor de R, que en general no debe exceder de 1/8” (3mm).

12) “Laminaciones” (“Laminations”)

Son discontinuidades planas y alargadas en el metal base, encontrándose normalmente en la parte media del espesor de los materiales forjados (como lo son las planchas de acero utilizadas para construcción de recipientes o tanques, que se producen por laminado (rolado), el cual es un proceso de forja).

Las “laminaciones” pueden ser totalmente internas y en este caso serán detectadas sólo mediante UT. Si por el contrario se extienden hasta un borde de la plancha pueden ser detectadas mediante MT o PT.

Usualmente las normas establecen que no se permitan realizar soldaduras sobre bordes de planchas donde haya afloramiento de “laminaciones”, porque éstas podrían comportarse como fisuras que se propagarán por la soldadura.

13) Fisuras laminares (“Lamellar tears”)

Son fracturas en forma de terraza en el metal base, con orientación básicamente paralela a la superficie forjada. Son causadas por altos esfuerzos en la dirección del espesor que resultan del proceso de soldadura.

Se pueden extender largamente, iniciándose en regiones donde el metal base tiene inclusiones no metálicas coplanares y/o en áreas del metal base sujetas a altos esfuerzos por la soldadura.

La fractura usualmente se propaga desde un plano laminar a otro por corte a lo largo de líneas que son casi normales a la superficie laminada.

14) Golpes de arco / apertura de arco / arranque de arco / chisporroteo (en el material base fuera de la soldadura) (“Arc strike”)

Imperfección localizada en la superficie del metal base, caracterizada por una ligera adición o falta de metal, resultante de la apertura accidental del arco eléctrico. Normalmente se depositará sobre el metal base una serie de pequeñas gotas de acero que pueden originar microfisuras; para evitar la aparición de microfisuras esas pequeñas gotas deben ser eliminadas mediante amolado de la superficie afectada.

15) Desalineación (“High – Low”)

Esta discontinuidad se da cuando en las uniones soldadas a tope las superficies que deberían ser paralelas se presentan desalineadas; también puede darse cuando se sueldan dos caños que se han presentado excéntricamente, o poseen ovalizaciones. Las normas limitan esta desalineación, normalmente en función del espesor de las partes a soldar.

Es frecuente que en la raíz de la soldadura esta desalineación origine un borde sin fundir.

16) Salpicaduras (“Spatter”)

Son los glóbulos de metal de aporte transferidos durante la soldadura y adheridos a la superficie del metal base, o a la zona fundida ya solidificada. Es

inevitable producir cierto grado de salpicaduras, pero deben limitarse eliminándose, aunque más no sea por estética, de la superficie soldada. Las salpicaduras pueden ser origen de microfisuras (como los arranques de arco sobre el metal base), y simultáneamente son un punto de inicio de la oxidación en superficies pintadas ya que tarde o temprano estos glóbulos podrán desprenderse del metal base, llevando consigo la pintura superficial allí localizada.

17) Penetración excesiva (“Excessive penetration”)

En una soldadura simple desde un solo lado (típicamente soldaduras de cañerías), esta discontinuidad representa un exceso de metal aportado en la raíz de la soldadura que da lugar a descolgaduras de metal fundido.

18) Rechupes (de cráter)

Es la falta de metal de soldadura resultante de la contracción de la zona fundida, localizada en la cara de la soldadura.

19) Porosidad alargada en la raíz (“Hollow - bead porosity (HB)”)

Es definida como una porosidad alargada alineada a lo largo de la línea central de la soldadura que ocurre a lo largo del cordón de raíz de la soldadura.

20) Quemón (“Burn - Through (BT)”)

Es definida como una porción del cordón de raíz donde una excesiva penetración ha causado que el metal de soldadura sea soplado hacia el interior, o puede que se descuelgue un excesivo metal fundido. Suele presentarse como una depresión no alargada, en forma de cráter, en la raíz. Vista de una placa radiográfica con un par de quemones (BT).

Origen de las tensiones residuales en la soldadura y sus consecuencias.

Las tensiones residuales habitualmente son identificadas como uno de los factores que influyen en el deterioro de las construcciones soldadas. Desde hace algún tiempo los ingenieros e investigadores se han dado a la tarea de estudiarlas para determinar sus características, así como las formas de atenuarlas o eliminarlas. Para dar una idea del mecanismo de formación de las tensiones residuales en la soldadura se requiere determinados conceptos básicos:

La Soldadura: implica la aplicación de calor altamente localizado en metales que responden a la ley física de expansión contracción, capaces de afectar su estructura y en condiciones de movimiento restringido, de esta manera se puede afirmar que durante el calentamiento que la soldadura impone a una pequeña parte de las piezas, el aumento de volumen de esta resulta impedido por el calentamiento desigual del metal base y por el grado de embridamiento que tenga la misma, por lo que el crecimiento de volumen libre será función directa del gradiente de temperatura "DT" y del coeficiente "a" de dilatación del material calentado, coincidiendo con lo planteado por Masubuchi K, Glizmanenko, Guliaev y otros.

Otro concepto a explicar es que la tensión térmica de compresión resultante corresponderá a aquella que produce una reducción de volumen equivalente a la acción de impedimento de movimiento. Cuando la máxima temperatura alcanzada, no exceda de cierto valor, dicha tensión se encontrará en el campo elástico y su valor será igual al múltiplo de la deformación específica (DL/Lo) por el modulo de elasticidad del material.

En el caso de una unión soldada, en la zona de influencia térmica (ZIT), donde se supera el valor de temperatura del campo elástico, la tensión de compresión tiende a superar la de fluencia a esa temperatura, pero en ningún momento lo logra. El proceso inverso ocurre durante el enfriamiento en condiciones de movimiento

restringido, las zonas que se vieron durante la deformación plástica en caliente, resultan cortas para ocupar los nuevos espacios alcanzados y aparecen entonces, tensiones térmicas de tracción. Al alcanzarse la temperatura ambiente habrán quedado tensiones térmicas permanentes de tracción cuyo valor es del orden del límite de fluencia del material. [1]

2.6 Detección de las tensiones residuales.

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

En la actualidad estas técnicas para medir las tensiones residuales, se dividen en los grupos siguientes:

- 1) Relajación de tensiones (*stress-relaxation*).
- 2) Difracción de rayos-x.
- 3) Utilización de propiedades sensibles a los esfuerzos.
- 4) 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 defórmómetros 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.

Sin embargo, estas técnicas por rayos-x tienen varias desventajas. Primero, son procesos mas bien lentos. En cada punto de medición debe hacerse esta 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, el de dureza y el ensayo de tracción.

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 mas 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 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.

En el presente trabajo se propone la utilización del grupo de técnica de relajación de tensiones (*stress-relaxation*) utilizando galgas extensométricas, que más adelante se explica.

Una vez que son medidas estas tensiones residuales es necesario referir los métodos comúnmente utilizados para eliminarlas y no ser víctimas de sus consecuencias nocivas. [11]

2.7 Esfuerzo mecánico.

Los esfuerzos internos son magnitudes físicas con unidades de fuerza sobre área utilizadas en el cálculo de piezas prismáticas como vigas o pilares y también en el cálculo de placas y láminas.

Los esfuerzos internos sobre una sección plana se definen como un conjunto de fuerzas y momentos estáticamente equivalentes a la distribución de tensiones internas sobre el área de esa sección. [14]

2.8 Ensayo de Tracción.

El ensayo a tracción es la forma básica de obtener 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. [14]

Un esquema de la máquina de ensayo de tracción se muestra en la siguiente figura.

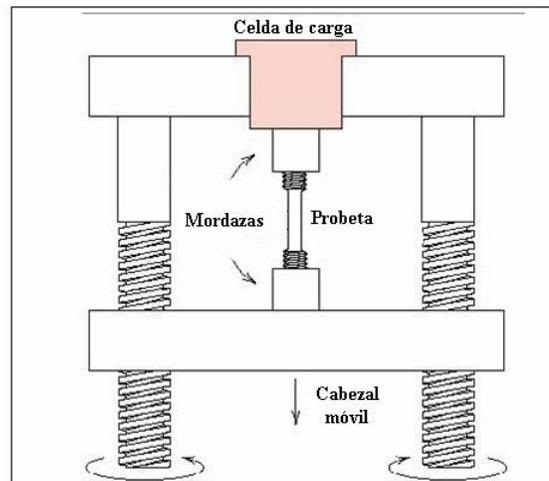


Figura 2.8 - Máquina de ensayo de tracción. Fuente [14].

2.9 Métodos para el alivio de las tensiones residuales en la soldadura.

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

- A) Por vía térmica
- B) Por vía mecánica

2.9.1 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.

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 sollicitaciones del servicio.

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.

2.9.2. Alivio de tensiones por vía mecánica.

Este método es realizable cuando la pieza posee una suficiente reserva de ductilidad, es decir, exhibe capacidad de estirarse plásticamente. Dicho de otra forma durante la descarga, en metales que se comportan de una manera puramente elástica, siempre si han tenido una deformación plástica.

Ocurre una redistribución de las tensiones residuales al aplicar y remover tensiones externas como muestra la figura 2.9 para una chapa soldada a tope.

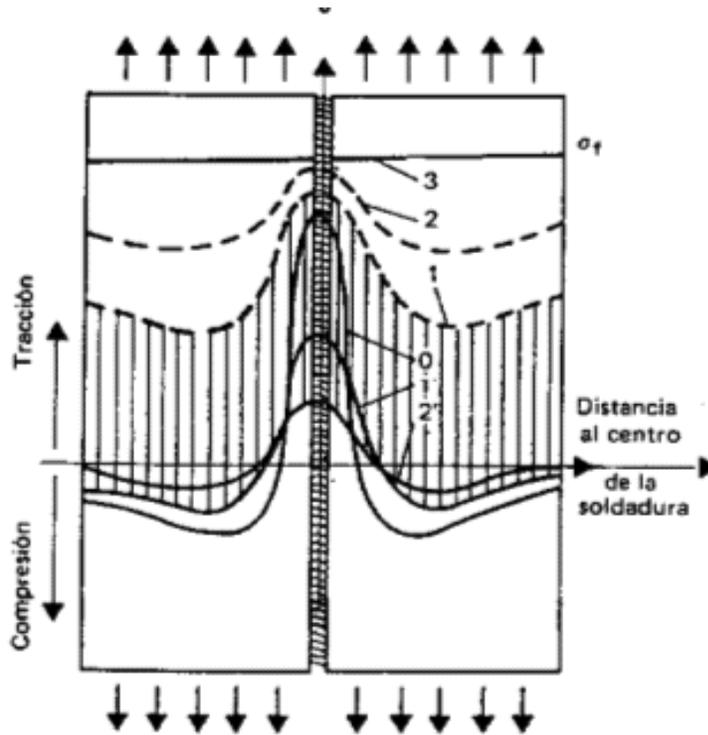


Figura 2.9. Relación entre la corriente de soldadura y las tensiones residuales. Fuente [19].

Curva 0: tensiones residuales después de soldar.

Curva 1: distribución de tensiones residuales al aplicar cargas que provocan tensiones de valor s_1 .

Curva 2: ídem para $s_2 > s_1$.

Curva 3: ídem para $s_3 = s_F$.

Curva 1: distribución de tensiones aplicando s_2 y luego liberando esta.

Curva 2: ídem para s2.

Es apreciable la disminución del nivel de tensiones residuales que se logra por este método. También queda de manifiesto que en la prueba hidráulica que se practica en la recepción de recipientes sometidos a presión interior tiene, indudablemente el efecto de un alivio de tensiones por vía mecánica.

Este método de alivio de tensiones es aplicable a conjuntos de dimensiones reducidos quedando limitado el tamaño de las piezas a tratar por la capacidad dimensional y de fuerza, disponible en los dispositivos de estiramiento.[19]

2.9.3 Martillado de los cordones de soldadura.

Este método consiste en golpear cada cordón con una maza pesada y golpes lentos, el empleo de una maza liviana y golpes rápidos endurece la superficie del metal, ya que no se logran deformaciones profundas, sino que fragiliza la cascara del metal sin aliviar la tensión. En esencia, desde que la soldadura se halla en estado de tracción, si el metal es desplazado plásticamente en dirección del espesor fluirá en el plano perpendicular con lo que se producirá un efectivo alivio de las tensiones longitudinales y transversales.

A pesar de su sencillez y efectividad no resulta un método de producción recomendable por la imposibilidad de cuantificar sus resultados y de asegurar la uniformidad y repetibilidad de los mismos siendo por lo tanto de muy dificultoso control.

2.9.4 Aplicación de vibraciones.

Este método consiste en hacer vibrar la pieza mediante un vibrador de velocidad variable, provista de un amplificador electrónico.

Haciendo variar la velocidad puede alcanzarse la frecuencia de resonancia la que se mantiene un periodo de tiempo relacionado con el peso del elemento a tratar, el cual, usualmente varía entre 10 y 30 minutos.

La reducción es en función del número de ciclos de tensiones impuestos, la mejor reducción ocurre en el 1er ciclo, algunas nuevas reducciones tienen lugar en algunos cientos de ciclos y una relativa pequeña reducción ocurre con un largo número de ciclos, debido a que ocurren cambios no metalúrgicos y se forman grietas de fatiga.

La efectividad del método de alivio de tensiones por vibración puede ser diferente en vibraciones en metales suaves que en metales endurecidos.

En determinadas circunstancias puede que no se logre la eliminación total de las tensiones por este método, pero si de forma parcial por lo que representaría una alternativa conveniente.

El alivio de tensiones residuales por medio de vibraciones no modifica la estructura metalográfica de la soldadura ni de la ZIT, por lo que no deberán esperarse mejoramientos de las propiedades mecánicas de estas con esta técnica.

En muchas ocasiones no se puede aplicar esta técnica por no cumplir las exigencias para su aplicación. Las estructuras pueden ser complicadas e irregulares y complican la aplicación del método, piezas pequeñas y de poco volumen se prestan para el uso de este método. Con el incremento de la complejidad de las estructuras la aplicación del alivio de tensiones por vibración se dificulta o imposibilitan. [11]

2.9.5 Alivio por explosión.

El uso de sustancias explosivas para el tratamiento de cordones de soldadura por explosión es uno de los métodos de mayor perspectiva para el mejoramiento de

las propiedades de las uniones soldadas, debido a la gran capacidad energética, la posibilidad de obtener gran potencia, la sencillez y lo económico de la operación.

El campo de aplicación de los tratamientos con carga explosiva para el alivio de las tensiones residuales no solo esta limitado a los materiales ferrosos, sino que como se plantean en otros trabajos , pueden aplicarse en las aleaciones de aluminio, aumentando las posibilidades de utilización del método. Los modelos utilizados fueron diversos por su grado de aleación y por su espesor demostrando sus posibilidades y en todos los casos mejoraron las propiedades mecánicas de la unión a un bajo costo y una alta productividad. [11]

2.10 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.[20]

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

- 1.- Temple
- 2.- Revenido.
- 3.- Normalizado.
- 4.- Recocido.

2.10.1 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, (rojo vivo) 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 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.

2.10.2 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.

2.10.3 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:

2.10.3.1 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.

2.10.3.2 Recocido de reducción de acritud o de recristalización.

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.

2.10.3.3 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.

2.10.4 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). [20]

2.11 Definición de Dureza La Dureza.

Es la capacidad de una sustancia sólida para resistir deformación o abrasión de su superficie. Está relacionada con la solidez, la durabilidad y la resistencia de sustancias sólidas, y, en sentido amplio, éste término suele extenderse para incluir todas estas propiedades. Se aplican varias interpretaciones al término en función de su uso. En Mineralogía, la dureza se define como la resistencia al rayado de la superficie lisa de un mineral. Una superficie blanda se raya con más facilidad que una dura; de esta forma un mineral duro, como el diamante, rayará uno blando, como el grafito, mientras que la situación inversa nunca se producirá. En Metalurgia e Ingeniería, la dureza se determina presionando una bolita o un cono de material duro

(impactadores) sobre la superficie estudiada y midiendo el tamaño de la indentación resultante. Los metales duros se indentan menos que los blandos. Este método para establecer la dureza de una superficie metálica se conoce como prueba de Brinell, en honor al ingeniero sueco Johann Brinell, que inventó la máquina de Brinell para medidas de dureza de metales y aleaciones.

2.11.1 Tipos de Dureza.

- **Dureza Brinell:** Emplea como punta una bola de acero templado o carburo de W. Para materiales duros, es poco exacta pero fácil de aplicar. Poco precisa con chapas de menos de 6mm de espesor. Estima resistencia a tracción.
- **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.
- **Rockwell superficial:** Existe una variante del ensayo, llamada Rockwell superficial, para la caracterización de piezas muy delgadas, como cuchillas de afeitado o capas de materiales que han recibido algún tratamiento de endurecimiento superficial.
- **Dureza vickers:** En este caso se emplea como cuerpo de penetración una pirámide cuadrangular de diamante. La huella vista desde arriba es un cuadrado. Este procedimiento es apropiado para aceros nitrurados y cementados en su capa externa, así como para piezas de paredes delgadas de acero o metales no féreos. La dureza Vickers (HV) se calcula partiendo de la fuerza en Newton y de la diagonal en mm² de la huella de la pirámide según la Ecuacion.2

$$HB = 1,8544 \frac{P}{d}$$

Ec.2

P: carga aplicada en N

d: Diagonal media de la huella en mm. (Ver Ecuación 2.1)

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad \text{Ec. 2.1}$$

Este ensayo, al igual que el Brinell, se basa en el principio de calcular el valor de dureza relacionando la fuerza de aplicación sobre la superficie de la impresión en el material. Lo hemos simplificado utilizando en este caso el valor de la longitud de la diagonal. Los valores de las cargas más usados van desde 1 a 120 kgs.

2.11.2.-Correlación entre el esfuerzo de fluencia y esfuerzo último con la dureza de los aceros.

Éste es un método para el cálculo del esfuerzo de fluencia y esfuerzo último en aceros al carbono. A través de ensayos experimentales, obtención y análisis de datos de durezas y esfuerzos para una gran variedad de aceros al carbono, se aprecia un comportamiento cuasi-lineal, que refleja la correlación existente entre estas dos propiedades de los aceros (figuras 2.10 y 2.11).

La relación matemática entre estas dos propiedades se obtiene mediante el método de linealización de curvas por el método de los mínimos cuadrados, para el rango de esfuerzos mostrados en las figuras 2.12 y 2.13, la ecuación resultante es la ecuación 2.2, la cual, tiene un coeficiente de los mínimos cuadrados R^2 de 0,9212 con una desviación estándar de 102 MPa, lo cual demuestra que sobre los valores de dureza estudiados, el esfuerzo de fluencia tiene un comportamiento lineal con respecto a la dureza del acero. Ésta ecuación es válida para todos los tipos de aceros estudiados que estén en un rango de dureza Vickers entre 129 - 632 Hv. [4]

$$YS = -90,7 + 2,876Hv \quad \text{Ec.2.2}$$

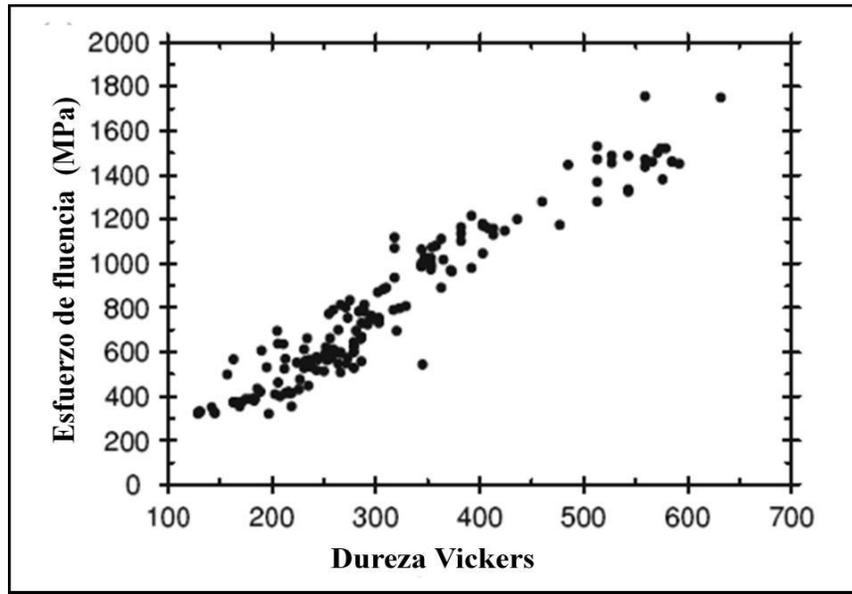


Figura 2.10. Esfuerzo de fluencia para diferentes aceros en función de la dureza Vickers [4]

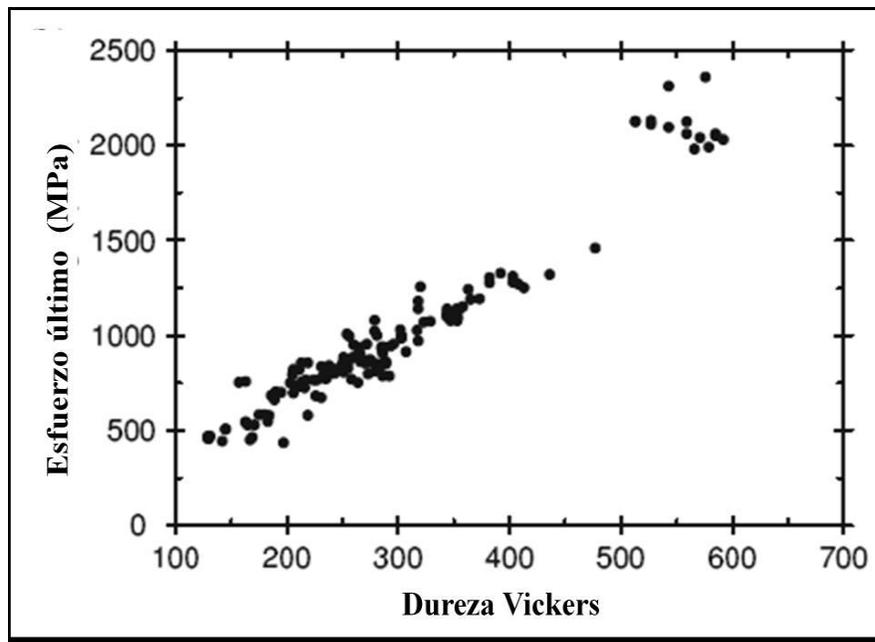


Figura 2.11. Esfuerzo último para diferentes aceros en función de la dureza Vickers [4]

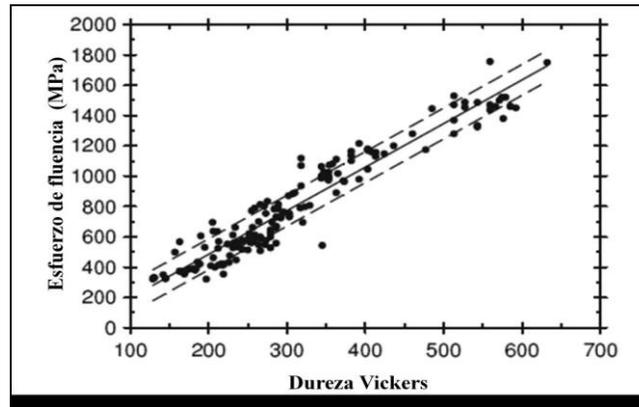


Figura 2.12. Linealización de los puntos de estudios del esfuerzo de fluencia. [4]

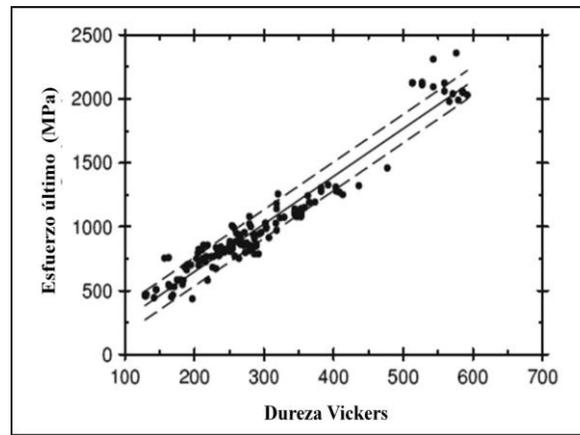


Figura 2.13. Linealización de los puntos de estudios del esfuerzo último. [4]

2.12 Extensometría

Es una técnica experimental para la medición de esfuerzos y deformaciones basándose en el cambio de la resistencia eléctrica de un material al ser sometido a tensiones. Debido a la reciente introducción del método de elementos finitos, esta técnica es menos utilizada. Esta técnica no debería dejar de ser utilizada ya que mide de una manera más exacta, por lo que generalmente se usa en la fase final del diseño de un producto.

Es extremadamente útil en la medida de esfuerzos vibracionales y detección de resonancias a alta frecuencia (la respuesta en frecuencia de una banda/galga extensométrica es de unos 100kHz)

El extensómetro es un instrumento empleado cuando se trabaja con deformaciones mecánicas en una muestra causadas por fuerzas de tracción, compresión, flexión o torsión, para medir cambios en dimensiones lineales (desplazamientos relativos entre dos o más puntos) en las probetas. Con frecuencia está basado en la tecnología de indicadores (galgas) de Deformación; este se fija por sus propios medios a las probetas. Este hecho disminuye la distorsión de las mediciones, al excluir las deformaciones causadas en los agarres, inversor, placas de la máquina, etc.

Las galgas poseen sensor basado en el efecto piezorresistivo. Un esfuerzo que deforma a la galga producirá una variación en su resistencia eléctrica.

Las galgas extensométricas son sensores de deformaciones basados en la variación de la resistencia eléctrica con la deformación (Ver Figura 2.14), en un hilo conductor calibrado, o en resistencias construidas a base de pistas de semiconductor. Se emplean también, combinadas con muelles o piezas deformables para detectar de forma indirecta esfuerzos. En definitiva suelen usarse más que como sensores de deformación como sensores de medida indirecta de esfuerzos [6]

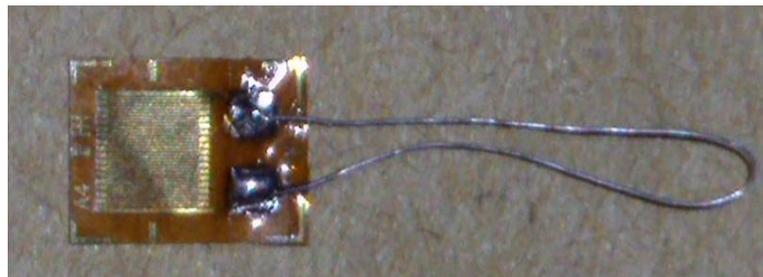


Figura 2.14. Galga extensometrica.

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.

También reciben el nombre de strain gauges, son una serie de transductores de deformación basados en la variación de la resistencia eléctrica de un hilo conductor al ser sometido a una deformación.

Entre sus ventajas podemos destacar su gran sensibilidad y precisión en las medidas, la posibilidad de concentrar la medida en un entorno reducido de un punto de la estructura, la automatización de las medidas y su bajo costo por punto de medida. Su desventaja radica en la sensibilidad a cambios de humedad.

El cálculo de esfuerzos residuales por la extesometría con galgas viene definido por la ecuación 2.3, con la que se obtiene el valor de la deformación el cual con la ayuda de la ley de hooke (Ver ecuación 2.4) permite conseguir el esfuerzo de fluencia en ese punto. El cálculo del esfuerzo residual se hace aplicando la ecuación 2.5. [6]

$$\varepsilon = \frac{4 V_O}{K_g x V_E} \quad Ec.2.3$$

$$\sigma = \varepsilon * E \quad Ec.2.4$$

$$\sigma_{Res} = \sigma_{testigo} - \sigma_{no\ testigo} \quad Ec.2.5$$

2.13 Ensayo metalográfico.

La metalografía es la disciplina que estudia microscópicamente las características estructurales de un metal o de una aleación. Sin duda, el microscopio es la herramienta más importante del metalurgista tanto desde el punto de vista científico como desde el técnico. Es posible determinar el tamaño de grano, forma y distribución de varias fases e inclusiones que tienen gran efecto sobre las propiedades mecánicas del metal.

La microestructura revelará el tratamiento mecánico y térmico del metal y, bajo un conjunto de condiciones dadas, podrá predecirse su comportamiento esperado.

El tamaño de grano tiene un notable efecto en las propiedades mecánicas del metal. Los efectos del crecimiento de grano provocados por el tratamiento térmico son fácilmente predecibles. La temperatura, los elementos aleantes y el tiempo de impregnación térmica afectan el tamaño del grano.

En metales, por lo general, es preferible un tamaño de grano pequeño que uno grande. Los metales de grano pequeño tienen mayor resistencia a la tracción, mayor dureza y se distorsionan menos durante el temple, así como también son menos susceptibles al agrietamiento.

El grano fino es mejor para herramientas y dados. Sin embargo, en los aceros el grano grueso incrementa la endurecibilidad, la cual es deseable a menudo para la carburización y también para el acero que se someterá a largos procesos de trabajo en frío.

Existen diversos métodos para determinar el tamaño de grano, como se ven en un microscopio. El método que se explica aquí es el que utiliza con frecuencia los

fabricantes. El tamaño de grano se determina por medio de la cuenta de los granos en cada pulgada cuadrada bajo un aumento de 100X. La figura 2.15 es una carta que representa el tamaño real de los granos tal como aparece cuando se aumenta su tamaño 100X.

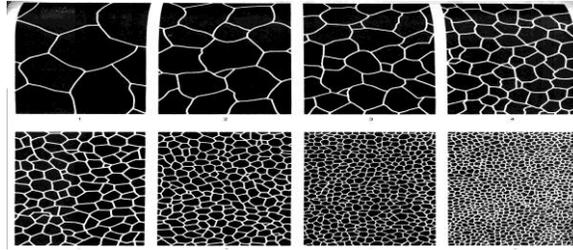


Figura 2.15 Plantilla de tamaños de grano. Fuente [5].

El porcentaje aproximado de carbón puede estimarse por medio de porcentaje de perlita (zonas oscuras) en los aceros al carbono recocidos. Para este propósito, se utilizan un microscopio metalúrgico y técnicas asociadas de foto microscopia. El microscopio metalúrgico de luz reflejada es similar a aquellos utilizados para otros propósitos, excepto que contiene un sistema de iluminación dentro del sistema de lentes para proveer iluminación vertical. [5]

2.13.1 Preparación de la muestra.

La muestra debe seleccionarse de la zona de la pieza que necesita eximirse y en la orientación apropiada. Es decir, si el flujo de grano o la distorsión es importante, puede ser que una sección transversal de la parte no muestre granos alargados; únicamente una tajada paralela a la dirección de laminado revelaría adecuadamente los granos alargados debido al laminado. Algunas veces se requiere más de una muestra. Usualmente, una soldadura se examina por medio de una sección transversal. Las muestras pequeños o de forma incomoda deben montarse de alguna manera para facilitar el pulido intermedio y final. Alambres, varillas pequeños

muestras de hoja metálica, secciones delgadas, etc. Deben montarse en un material adecuado o sujetarse rígidamente en una monta mecánica.

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

2.13.2 Pulido de la muestra.

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

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

- Pulido intermedio.

La muestra se pule sobre una serie de hojas de esmeril o lija con abrasivos más finos, sucesivamente. Por lo general, las operaciones de pulido intermedio con lijas de esmeril se hacen en seco; sin embargo, en ciertos casos, como el de preparación de materiales suaves, se puede usar un abrasivo de carburo de silicio.

- Pulido fino

El tiempo utilizado y el éxito del pulido fino dependen en mucho del cuidado puesto durante los pasos de pulido previo. La última aproximación a una superficie plana libre de ralladuras se obtiene mediante una rueda giratoria húmeda cubierta con un paño especial cargado con partículas abrasivas cuidadosamente seleccionadas en su tamaño. Existe gran posibilidad de abrasivos para efectuar el último pulido. En

tanto que muchos harán un trabajo satisfactorio parece haber preferencia por la forma gama del óxido de aluminio para pulir materiales ferrosos y de los basados en cobre, y óxido de serio para pulir aluminio, magnesio y sus aleaciones. Otros abrasivos para pulido final que se emplean a menudo son la pasta de diamante, óxido de cromo y óxido de magnesio.

2.12.3 Ataque químico de la muestra.

El propósito del ataque químico es hacer visibles las características estructurales del metal o aleación. El proceso debe ser tal que queden claramente diferenciadas las partes de la micro estructura. Esto se logra mediante un reactivo apropiado que somete a la superficie pulida a una acción química. Los reactivos que se utilizan consisten en ácidos orgánicos o inorgánicos y el álcalis disueltos en alcohol, agua u otros solventes. En la tabla que se muestra a continuación se observan los reactivos más comunes.

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

La acción del ataque se detiene al colocar la muestra bajo una corriente de agua. Límpiase la muestra con alcohol y utilice una secadora de pelo para terminar de secarla. Cuídese de no frotar la muestra pulida y atacada con alguna tela o con los dedos, porque esto altera la condición superficial del metal. [5]

CAPÍTULO 3

Marco metodológico

3.1 Introducción.

En este capítulo se muestra la información necesaria para este tipo de investigación y el procedimiento a seguir para el desarrollo del estudio. También hace referencia al conjunto de procedimientos basados en principios lógicos, utilizados para alcanzar una gama de objetivos que rigen la investigación

3.2 Nivel de investigación.

Se define ésta, como una investigación de nivel explorativo y explicativo, la cual tiene como finalidad ser el fundamento de futuras investigaciones, además se aplican técnicas experimentales basadas en teorías para conocer la estructura y los factores que intervienen en la dinámica de los fenómenos entre los esfuerzos mecánico y el número de pasadas en las soldadura a tope por arco eléctrico protegido en acero A36.

3.3 Diseño de la investigación.

La investigación que presentamos pretende demostrar la relación en la magnitud de los esfuerzos mecánicos productos por el número de pasadas, aplicado a uniones soldadas a tope a través del cumplimiento de los objetivos establecidos.

3.4 Población y muestra

El acero ASTM - A36 representa la población estudiada para la investigación, mientras que la muestra se encuentra conformada por un total de cuarenta probetas (40) probetas, las cuales se encuentran identificadas como grupo A, B, C y D, cada grupo constituido por diez (10) probetas.

Por cada grupo se toman cinco (5) probetas para un total de (20) que se les realiza el tratamiento térmico de recocido después de ser soldadas para disminuir las tensiones presentes en ellas, y se denominan probetas no testigo; mientras que las otras veinte (20) se denominan testigos ya que no se someten a ningún tratamiento térmico y poseen tensiones debido a el proceso de soldadura.

3.5 Determinación Experimental de los Esfuerzos Mecánicos.

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

3.5.1 Selección del material para las probetas.

El material elegido para la realización de las probetas es el acero A36 cuyas propiedades mecánicas y composición químicas (Ver tabla 3.1) son las siguientes:

Propiedades mecánicas

- Límite de fluencia 250 MPa.
- Límite de rotura 400 MPa.

- Módulo de elasticidad 200 GPa.
- 23 % de elongación de 50 mm de longitud calibrada (ASTM).

Tabla 3.1.- Composición química Acero ASTM- A36.

Componente	C	Cu	Fe	Mn	P	S
%	0,260	0,200	99	0,750	Max 0,040	Max 0,050

[Fuente certificado de calidad otorgado por el proveedor FERRUM C.A.]

3.5.2 Primer tratamiento térmico.

El primer tratamiento térmico es un recocido, se realiza con el propósito de lograr que las láminas tengan la máxima resistencia mecánica sin aumentar apreciablemente la dureza permitiendo un mejor mecanizado y aliviar los esfuerzos producto de la laminación del acero.

En el proceso de recocido se calienta la lámina hasta llevarla a la región austenítica a una temperatura de 850 °C (Ver Fig 3.1), por un tiempo igual a 1 minuto por milímetro de espesor de la lámina, al culminar los 8 minutos se enfrían las láminas dentro del horno



Figura 3.1.- Horno para recocido a 850 °C.

3.5.3 Cordón de soldadura

Se realiza soldaduras a tope, de arco eléctrico. Según lo establecido en la norma AWS con doble bisel en V, que es el recomendado para espesores de 8 mm (Ver fig.3.2).

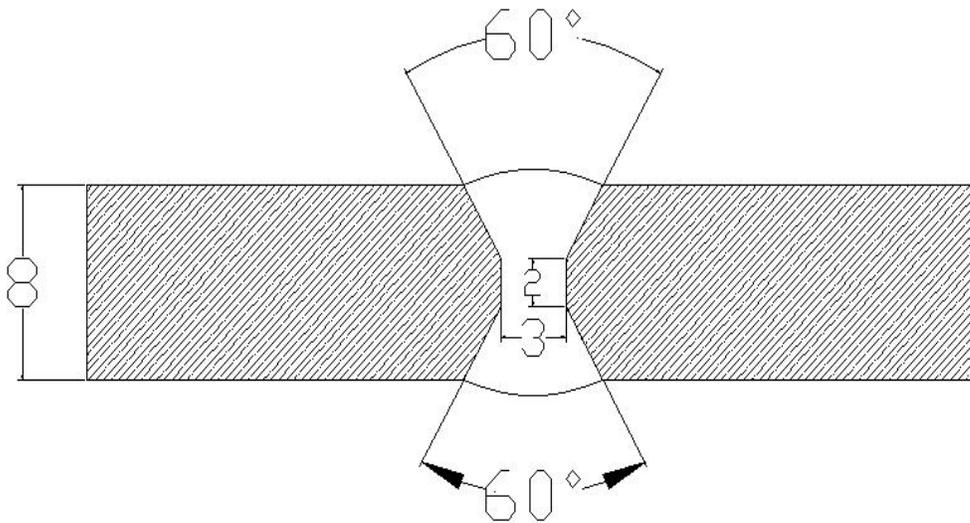


Figura 3.2.- Diseño del cordón de soldadura distancias en mm

El ancho del cordón de soldadura será de 10 mm aproximadamente y el alto de 8 mm, con una separación de 3 mm y doble bisel de 60° (Ver Fig. 3.3).

Se soldán las láminas bajo las mismas condiciones de soldeo en lo que tiene que ver a intensidad de corriente, voltaje y tipo de electrodo, los parámetros se seleccionan según lo recomendado en la norma AWS.

Las láminas se identifican en 4 grupos de estudio A, B, C y D, según el parámetro variable. Los parámetros que se utiliza para la construcción de la soldadura se muestran en la tabla3.2.

Tabla 3.2. -Parámetros para la construcción de la soldadura según el grupo

Grupo	Electrodo	Intensidad de corriente (A)	Voltaje (V)	Velocidad de avance (mm/min)	Número de pases
A	E6013 3/32"	85	19	1,5	1
B	E6013 3/32"	85	19	2	2
C	E6013 3/32"	85	19	3	3
D	E6013 3/32"	85	19	3,5	4

**Figura 3.3-** Foto de la tira de la lámina soldada.

3.5.4 Mecanizado de la probeta

Las probetas se mecaniza según lo recomendado por la norma ASTM E-8 sobre probetas para ensayo de tracción, la cual indica las dimensiones requeridas (Ver fig. 3.4). El proceso que se utiliza para el mecanizado es el de corte por agua, el cual brinda una alta precisión en las dimensiones que debe tener la probeta y a su vez, ayuda a que no aparezcan nuevas tensiones que puedan influir en los resultados.

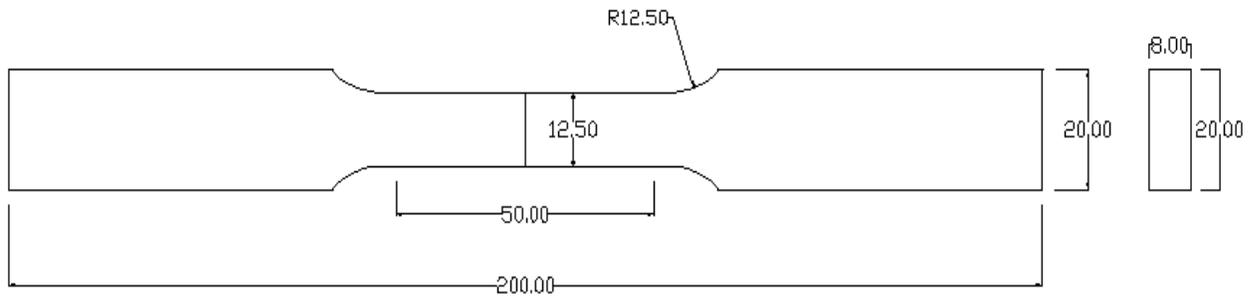


Figura 3.4 Dimensiones de las probetas en mm.

3.5.5 Segundo tratamiento térmico

Se realiza un tratamiento térmico post-soldadura, ya que se trabaja con una temperatura por debajo de la temperatura crítica del material de la probetas, se realiza un recocido sub crítico para aliviar esfuerzos.

La temperatura del tratamiento térmico y tiempo de permanencia en el horno a esa temperatura se toma siguiendo las recomendaciones de la norma ASME sección VIII 2007.

El tratamiento térmico para un acero A36 se realiza a una temperatura recomendada de 595 °C, se mantiene en el horno esa temperatura en un tiempo de 1 hora/pulg de espesor de la probeta. Al transcurrir el tiempo de dieciocho minutos (18) se apaga el horno para luego dejarlo en el mismo hasta que se enfríe.

Se realiza el tratamiento a veinte (20) de las cuarenta (40) probetas, cinco (5) por cada grupo de estudio para aliviar a las probetas de los esfuerzos que se producen por el proceso de soldadura y estas serán las probetas no testigos. El resto de las probetas se nombraran probetas testigos, los cuales poseen esfuerzos acumulados por soldaduras y por el mecanizado, debido al modo de realización de las probetas en general, las tensiones por mecanizado serán despreciables.

3.5.6 Preparación de la probeta para ensayo de microdureza vickers.

La superficie de la probeta donde se realiza el ensayo de microdureza se prepara de la siguiente manera: Un desbaste grueso de la superficie, desbaste fino y finalmente pulitura con lo que se logra limpiar la superficie de óxido, impurezas, grietas o ralladuras que afectan la medición de la dureza.

Se prepara la superficie comenzando con un desbaste con una lija de grano grueso N° 120, seguido por una lija N° 220, 320 y 600 respectivamente. Posterior al desbaste grueso y desbaste fino se procede a pulir la superficie con la ayuda de una pasta abrasiva colocada sobre un paño de algodón, con lo que finalmente se logra tener una superficie adecuada para el ensayo de microdureza.

3.5.7 Medición de microdureza vickers.

Se mide la dureza en diferentes zonas de la probeta con el fin de determinar su variación a lo largo de la superficie. Se toman veinte y tres (23) puntos por probetas con una separación mínima de 2 mm entre punto y punto partiendo de la zona afectada por el calor y distribuidos tal como muestra la figura 3.5.

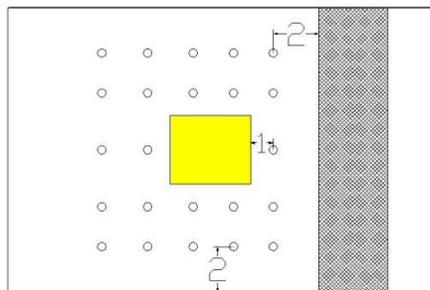


Fig. 3.5 Distribución de puntos para ensayo de dureza, distancias en mm.

Con los valores medidos se estudia el comportamiento de la dureza del material a medida que se va alejando del cordón de soldadura para cada número de pases de soldadura estudiados. Dichas mediciones se realizan con un micro

durómetro marca Buehler disponible en el laboratorio de calidad de la empresa **DANA EJES Y CARDANES C.A.**

Se marca los puntos donde se quiere medir la dureza en las cuarenta y un (41) probetas y se procede a comenzar a realizar las mediciones.

Se realiza mediciones de micro dureza vickers a una probeta sin soldar de acero A36 para conocer la dureza inicial del material lo cual sirve como referencia del material base. A continuación se mide la dureza superficial de las cuarenta (40) probetas restantes en los veinte y cuatro (23) puntos ya determinados. Tomando 23 puntos por probeta se obtienen doscientos veinte y tres (230) indentaciones por cada grupo de probeta.

3.5.8 Obtención de los esfuerzos por el ensayo de microdureza vickers

Después de determinar la dureza de los diferentes puntos de cada una de las probetas testigos y las no testigos, mediante la Ecuación 3.1 y Ecuación 3.2 respectivamente, válida para materiales con dureza entre (129 – 632) Hv, se obtiene los esfuerzos de fluencia para cada una de las probetas.

$$SYPT = -90,7 + 2,876HvPT \quad \text{Ec.3.1. [3]}$$

$$SYPNT = -90,7 + 2,876HvPNT \quad \text{Ec.3.2. [3]}$$

Donde:

HvPT: Representa el valor de la dureza Vickers para las probetas testigo

HvPNT: Es el valor de la dureza Vickers para las probetas no testigo

SYPT, es el límite de fluencia del acero A36 para las probetas a la cual se les realizó el tratamiento térmico (probetas testigos. Unidades en MPa).

$SYPNT$, es el límite de fluencia en el punto de medición del material soldado (MPa)

La relación existente entre la dureza y los esfuerzos residuales viene dada por la Ecuación 3.4, donde los esfuerzos residuales se definen como la diferencia entre los esfuerzos de fluencia de las probetas testigo y las no testigos.

$$\sigma_{res} = SYPT - SYPNT \quad \text{Ec.3.3 [3]}$$

$$\sigma_{res} = -90,7 + 2,876HvPT + 90,7 - 2,876HvPNT \quad \text{Ec.3.4 [3]}$$

3.5.9 Preparación para galgas.

La preparación de la superficie para el ensayo con galgas extensométricas es la misma que para el ensayo de micro dureza. Se debe dejar la superficie libre de impurezas, rayas u óxido pero sin ser pulida. Una vez obtenida la superficie deseada se demarca sobre la probeta con la ayuda de lápiz la localización y orientación de la galga, tal como se muestra en la Figura.3.6, separando la galga 2 mm del cordón de soldadura.



Figura 3.6. Ubicación de la galga.

Después de haber ubicado y marcado la zona donde se coloca la galga se limpia la superficie con alcohol o acetona con un algodón en un solo sentido, se repite esta operación hasta que el algodón quede limpio.

Para la preparación de la galga esta se coloca sobre una superficie previamente limpiada con alcohol o acetona, con la cara brillante hacia arriba. Se aplica cinta adhesiva sobre la galga y se despegue de la superficie lentamente con una

inclinación de 30° empezando por el lado contrario a los terminales de la galga, como se muestra en la Figura.3.7



Figura 3.7. Colocación de cinta adhesiva.

Con la ayuda de la cinta adhesiva se coloca la galga en la posición ya marcada en la superficie de la probeta, después de tener ubicada la galga en la posición deseada se levanta lentamente la cinta adhesiva y se coloca resina epóxica, mejor conocida como pega loca bajo la superficie de la galga y se presiona la galga contra la superficie de la probeta utilizando el dedo gordo, desde un extremo a otro de la galga y mantener presionado por un minuto para que pegue correctamente y evitando las burbujas de aire entre la galga y la probeta, tal como se muestra en la Figura.3.8

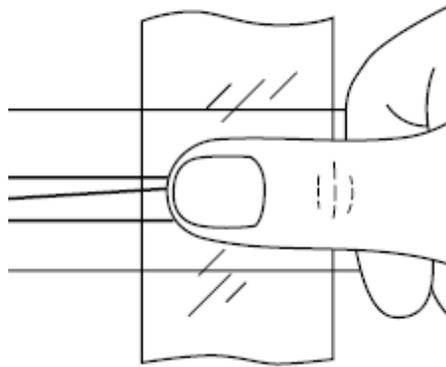


Figura 3.8. Pegado de la galga.

Esperar 2 minutos antes de retirar la cinta adhesiva de forma tangente la galga empezando por el lado contrario a los terminales de la misma, y revisar que todos los

extremos de la galga se encuentren correctamente adheridos a la superficie de la probeta. Se aseguran los cables de las galgas con la ayuda de silicón para evitar el contacto entre ellos o con la superficie de la probeta y facilitar el manejo de los mismos durante el ensayo.

3.5.10 Ensayo de tracción con galgas extensométricas

El ensayo de tracción con galgas extensométricas permite obtener el valor del esfuerzo residual para una deformación igual para cada una de las probetas estudiadas. Para la realización del ensayo es necesario contar con ciertos materiales y equipos electrónicos que permiten obtener y procesar la información que se deriva del ensayo de tracción con galgas extensométricas.

Los equipos necesarios son destornilladores, cautín, cables, circuito eléctrico (puente de wheatstone), multímetro de alta precisión, pistola de silicón y una computadora portátil donde se almacena la data proveniente del multímetro.

El ensayo se realiza en la máquina de tracción marca Tinios olsen, con una carga máxima de 20 t, y una velocidad de 2 mm/min, disponible en el laboratorio de la calidad de **DANA TUBO AUTOS C.A.**

Se toma una deformación igual a 50% del límite elástico del material para realizar las mediciones del ensayo, para obtener este valor se coloca en la máquina una probeta sin soldar que permita obtener la curva completa de comportamiento del material a tracción, un vez obtenida la curva se lee la deformación equivalente al 50% del límite elástico con este valor se procede a realizar los ensayos restante para calcular los esfuerzos residuales.

Una vez obtenido el punto de estudio se procede montar en la máquina la probeta con la galga ya adherida y cables conector a la misma, se ajustan las mordazas de tal manera que no haya deslizamiento con las probetas y se realiza la conexión de circuito (Puente de wheatstone) a la galga, fuente de poder y multímetro.

Tomando un voltaje de excitación de 6 V y para una carga de 0 Kg, se toma el valor del voltaje y se calibra el circuito para llevarlo al cero mecánico en base al cual se tomaran las mediciones de los voltajes.

Se empieza el ensayo y se le aplica carga a la probeta al llegar la deformación al 50 % del límite elástico se detiene la máquina, y se toma el valor del voltaje para ese punto, se repite sucesivamente este mismo procedimiento con todas las probetas testigo y no testigo

Con la variación de voltaje que se obtiene durante el ensayo para las probetas testigo y no testigo y mediante la ecuación 3.5, se obtiene las deformaciones para cada probeta

$$\varepsilon = \frac{4 V_O}{K_g \times V_E} \quad \text{Ec. 3.5}$$

Donde:

V_o , es el voltaje obtenido en el ensayo

K_g , es el factor de galga (Suministrado por el fabricante de la galga)

V_E , es el voltaje de excitación inducido al circuito

3.5.11 Obtención de los esfuerzos por galgas extensométricas.

Para obtener los esfuerzos de fluencia de los puntos estudiados por la galga en cada una de las probetas, no basamos en la Ley de Hooke y con la Ecuación 3.6, obtenemos el valor.

$$\sigma = \varepsilon * E \quad \text{Ec. 3.6}$$

3.5.12 Medición de los esfuerzos Residual.

Con los valores de esfuerzo de fluencia obtenidos de la Ecuación 3.6, se obtiene el valor de los esfuerzos residuales como la diferencias de los esfuerzos de fluencia de las probetas testigos menos la no testigo. (Ecuación 3.7)

$$\sigma_{Res} = \sigma_{testigo} - \sigma_{no\ testigo} \quad Ec.3.7$$

3.6 Análisis metalográfico

Se realiza un análisis metalográfico para la determinación de la microestructura del material, el análisis se lleva a cabo en la instalación del laboratorio de calidad de la empresa **DANA EJES Y CARADANES C.A.**

Para el ensayo se selecciona una probeta por cada grupo para realizar un corte metalográfico bajo condiciones de evitar el sobrecalentamiento de la muestra mediante refrigerantes para luego realizar un embutido metalográfico facilitando el manejo de la muestra por sus pequeñas dimensiones. Al obtener las muestras embutidas en cilindros de resinas plásticas se realiza la etapa de pulido metalográfico, en su primera fase de desbaste grueso se usa una lija de tamaño de grano 240 donde se desbasta la superficie de manera uniforme y así sucesivamente pasando del tamaño 240 a una lija de 320 hasta llegar al papel de lija de menor tamaño de grano como es la de 600. Una vez obteniendo el último pulido con el papel de lija se realiza la segunda fase de pulido de desbaste fino; donde se pule la muestra con paños macizos en un tambor giratorio y con la aplicación de alúmina como abrasivo queda pulida la muestra.

A continuación se le realiza un ataque químico con NITAL a un 5 % de concentración a cada una de las muestras preparadas con el fin de revelar la estructura de la muestra, luego se limpia la muestra con alcohol y con agua para luego secar la muestras con un secador para finalizar.

Al obtener la muestra preparada según especificación de la norma ASTM E112, se realiza la observación en un microscopio metalográfico a una resolución de 100X. Donde se observa la estructura superficial de las muestras. (Ver figura 3.9)



Figura 3.9 Microscopio metalográfico.

3.7 Análisis macroscópico

Se realiza un análisis macroscópico para observar la calidad de la soldadura y específicamente la dilución del metal base fundido incorporado por la soldadura.

Para la realización del estudio, se tomará las mismas muestras del estudio de la microscopía para el análisis y mediante un microscopio estereó se observan las muestras a un aumento de 20X. (Ver Figura.3.10).

Se calcula el porcentaje de dilución en una muestra por grupo con el uso de la ecuación.

$$\% \text{ Dilución} = \frac{\text{Área de dilución}}{\text{Área total del cordón de soldadura}} \quad \text{Ec. 3.8}$$



Figura 3.10 Microscopio estereó

Conclusiones

Se determinaron las propiedades mecánicas iniciales mediante un ensayo a tracción del material de trabajo el cual es un acero A36 cuyo esfuerzo de fluencia dio 245 MPa, esfuerzo de tracción 434,140 MPa, porcentaje de elongación 41,6 % y su microdureza Vickers 160 Hv.

Se obtuvieron valores de esfuerzos por el método de tracción con el uso de galgas extensométricas los cuales fueron para dos (2) pases 14,285 MPa, cuatro (4) pases 19,047 MPa, seis (6) pases 42,857 MPa y ocho (8) pases 90,476, mientras que la correlación del esfuerzo de fluencia y el esfuerzo último con la dureza de los aceros se obtuvo para dos (2) pases 3,168 MPa, cuatro (4) 3,931 MPa, seis (6) pases 11,247 MPa y ocho (8) pases 37,733 MPa, donde claramente se observa como para mayor número de pases mayor esfuerzo mecánico residual.

La diferencia entre los valores de esfuerzos obtenidos con el uso de galgas extensométricas y el ensayo de dureza se debe a que el esfuerzo que se consigue por medio del ensayo de dureza es un esfuerzo global dentro del cual se generan esfuerzos que se contrarrestan entre sí y al ser proyectado al plano longitudinal resultan de menor valor mientras que las galgas extensométricas no sufren de

este fenómeno ya que miden una deformación única en la dirección longitudinal que da como resultado un único esfuerzo en esa dirección.

Con la aplicación de la correlación del esfuerzo de fluencia y el esfuerzo último con la dureza de los aceros, se puede determinar el comportamiento de los esfuerzos mecánicos residuales para cada número los cuales siguen la tendencia descrita por Masubushi K en su analogía de las 3 barras, presentando en los puntos cercanos al cordón esfuerzos de tracción y en los más alejados esfuerzos de compresión.

Con la obtención de los esfuerzos residuales con relación al número de pasadas desde dos (2) a ocho (8) pases, por los dos métodos aplicados en esta investigación, se concluye que la influencia del número de pasadas en los esfuerzos mecánicos de un acero A36 soldado a tope por soldadura manual de arco eléctrico viene dada por la siguiente relación, a mayor número de pasadas en el cordón mayor esfuerzo mecánico residual, como se observo en la grafica 4.11 por ambos métodos de obtención.

El número de pases presentes en un cordón de soldadura, representa un parámetro de gran importancia en el diseño de una unión soldada. Al variar el número de pases en cordón de soldadura el material recibe mayor cantidad de calor conforme aumente el número de pases, lo cual ocasiona que se generen esfuerzos residuales distintos para cada número de pase estudiado.

ANEXOS

GRICON 33

NORMA

AWS/ ASME: SFA - 5.1
COVENIN: No. 1477 - 2001
POSICIONES: Todas
CORRIENTE: Alterna o Continua, Polo Negativo (-)

CLASIFICACIÓN

E 6013
E 41413

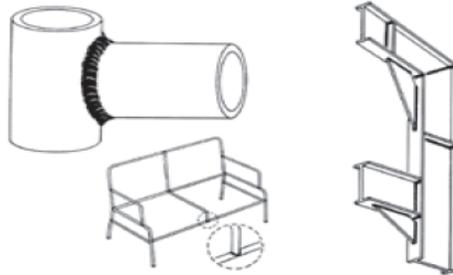
DESCRIPCIÓN: Electrodo de revestimiento rutilico que presenta arco estable de muy fácil encendido y reencendido. Penetración mediana con cordones convexos de muy buena apariencia, con muy baja salpicadura y escoria autodesprendible.

APLICACIONES: Electrodo de amplia aplicación en soldadura de aceros de bajo carbono no aleados, de uso corriente en carpintería metálica: fabricación de muebles, ductos de ventilación, rejas, puertas. Ensamblaje de carrocerías, construcción de vagones, tanques. Soldadura de estructuras livianas en perfiles angulares y rectangulares, cerchas para techos, construcciones navales y reparación de equipos agrícolas.

OPERACIÓN: Permite la ejecución de soldadura en todas las posiciones, destacándose su desempeño en posición vertical descendente. Se recomienda utilizar los amperajes indicados para cada diámetro, en posiciones plana y horizontal usar amperajes medios, en posición vertical ascendente disminúyase el amperaje y en vertical descendente pueden usarse amperajes altos. Límpiase bien la escoria entre pases.

VALORES TÍPICOS:

Composición química: C: 0,10% Mn: (0,50 - 0,80) % Si: 0,30 %
Resistencia a la tracción: (510 - 560) N/mm² (72,86 - 81,45) ksi
Límite elástico: (420 - 480) N/mm² (58,60 - 66,98) ksi
Alargamiento (L = 5d): (23 - 27) %
Resistencia al impacto: No requerida por AWS



Diámetro (mm)	Diámetro (pulg)	Longitud (mm)	Intensidad (amp)	Peso Paq. (kg)
2,50	3/32	350	60-90	10
3,25	1/8	350	90-130	10
4,00	5/32	350	120-170	10
5,00	3/16	350	170-240	10

Tratamiento post-soldadura requerimientos para aleaciones de acero de bajo carbono				
Tiempo mínimo de aplicación de la temperatura normal para espesores nominales.				
Material	Temperatura normal mínima	Por debajo de 50 mm.	Entre 50 mm y 150 mm.	Por encima de 150 mm.
P-No. 1 Gr. Nos 1,2,3	1100(595°C)	1 Hr/Pulg (25mm), 15 min. mínimo	2 Hrs 15 min por cada pulgada adicional	2 Hrs 15 min por cada pulgada adicional
Gr. No. 4	na	ninguna	ninguna	ninguna

Notas:

- 1) Cuando es impráctico el tratamiento post-soldadura especificado en esta tabla, es aceptable llevar el tratamiento térmico a bajas temperaturas por largos periodos de tiempo en concordancia con la tabla UCS-56.1.
- 2) El tratamiento post-soldadura es obligatorio para los siguientes casos:
 - a) Para juntas soldadas cerca de 38mm de espesor nominal.
 - b) Para juntas soldadas entre 32 mm y 38 mm que se le han aplicado un pre-calentamiento a una temperatura mínima de 95 °C durante la soldadura.
 - c) Para juntas de todos los espesores si es requerido por UW-2 no es obligatorio bajo condiciones especificadas a continuación:
 - 1) Para soldaduras de bisel cerca de 13 mm de espesor y soldaduras de filete con una garganta no más de 13 mm, que unen las conexiones de boquillas, que tienen un acabado interior con un diámetro no superior a 50 mm, en estos casos no se forman el cordón y se requiere un aumento de espesor, además de precalentar a una temperatura mínima 95 °C debe ser aplicado cuando el contenido de carbono de la placa sea superior a 0,22%.
 - 2) Para el revestimiento resistente a la corrosión de soldadura de metal o de superposición de las soldaduras aplicar según UCL-34, siempre con un precalentamiento a una temperatura mínima de 95 °C se mantiene durante la aplicación de la primera capa cuando el espesor de la parte superior excede los 32mm.

Brinell Diámetro Huella	Brinell Dureza HB	Rockwell Dureza Ha	Rockwell Dureza HRb	Rockwell Dureza HRc	Vickers Dureza HV	Shore	Resistencia a la tracción Kg/mm ²
2.35	682	64.0	-	65	885	91.0	232.9
2.40	652	83.0	-	63	820	87.2	221.5
2.45	627	81.5	-	61	765	84.8	213.5
2.50	600	80.5	-	59	633	76.5	188.7
2.55	578	79.5	-	59	717	81.5	204.0
2.60	555	79.0	120	57	675	78.5	195.1
2.65	534	78.0	119	54	598	73.5	181.3
2.70	514	77.0	119	52	567	71.0	174.9
2.75	495	76.5	117	51	540	68.5	168.0
2.80	477	75.5	117	49	515	66.7	162.2
2.85	461	74.4	116	48	494	65.0	157.0
2.90	444	73.5	115	46	472	63.0	150.6
2.95	429	73.0	115	45	454	61.0	145.6
3.00	415	72.5	114	44	437	59.0	140.0
3.05	401	71.5	113	42	420	57.2	136.0
3.10	388	71.0	112	41	404	65.8	132.0
3.15	375	70.5	112	40	389	54.0	127.5
3.20	363	70.0	110	39	375	52.2	123.4
3.25	352	69.5	110	38	363	50.5	120.0
3.30	341	68.5	109	36	350	49.2	115.9
3.35	331	68.0	109	35	339	48.0	112.4
3.40	321	67.5	108	34	327	46.7	109.1
3.45	311	67.0	108	33	316	45.2	105.6
3.50	302	66.5	107	32	305	44.5	102.7
3.55	293	66.0	106	31	296	43.2	99.6
3.60	285	65.5	105	30	287	42.0	96.9
3.65	277	65.0	104	29	279	41.0	94.2
3.70	269	64.5	104	28	270	40.0	91.5
3.75	262	64.0	103	27	263	39.2	89.1
3.80	255	63.0	102	25	256	38.5	86.7
3.85	248	62.5	102	24	248	37.5	84.3
3.90	241	62.0	100	23	241	36.5	81.9
3.95	235	61.5	100	22	235	35.7	79.9
4.00	229	61.0	99	21	229	35.0	77.9
4.05	223	60.5	98	20	223	34.0	75.8

4.10	217	-	97	18	217	33.0	73.8
4.15	212	-	96	17	212	32.5	72.1
4.20	207	-	96	16	207	32.0	70.4
4.25	202	-	95	15	202	31.2	68.7
4.30	197	-	94	14	197	30.2	67.0
4.35	192	-	93	13	192	29.5	65.3
4.40	187	-	92	11	187	29.0	63.6
4.45	183	-	91	10	183	28.5	62.2
4.50	179	-	90	9	179	28.0	60.9
4.55	174	-	89	7	174	27.5	59.2
4.60	170	-	88	6	170	26.5	57.8
4.65	166	-	87	4	166	25.5	56.3
4.70	163	-	86	3	163	25.0	55.4
4.75	159	-	85	1	159	24.5	54.0
4.80	156	-	84	0	156	24.0	53.0
4.85	153	-	82	-	153	23.0	52.0
4.90	149	-	81	--	149	23.0	50.7
4.95	146	-	80	--	146	22.0	49.6
5.00	143	-	79	-	143	22.0	48.6
5.05	140	-	78	-	140	21.0	47.6
5.10	137	-	77	-	137	21.0	46.6
5.15	134	-	76	-	134	21.0	45.6
5.20	131	-	74	-	131	20.0	44.5
5.25	128	-	73	-	128	20.0	43.5
5.30	126	-	72	-	126	-	42.8
5.35	124	-	71	-	124	-	42.2
5.40	121	-	70	-	121	-	41.2
5.45	118	-	69	-	118	-	40.1
4.50	116	-	68	-	116	-	39.4
5.55	114	-	67	-	114	-	38.8
5.60	112	-	66	-	112	-	38.0
5.65	109	-	65	-	109	-	37.1
5.70	107	-	64	-	107	-	36.4
5.75	105	-	62	-	105	-	35.7
5.80	103	-	61	-	103	-	35.0



TUBO AUTO C.A

INGENIERIA DE CALIDAD

FECHA: 04/10/10

REPORTE DE ENSAYOS MECANICOS

AUDITOR: C. PEREZ / M. ESCALONA

DATOS DEL PRODUCTO

SERVICIO: X

	DIAMETRO (ϕ)	DIAMETRO (mm)	ESPEOR (mm)	COLADA	Nº DE RACK	Nº O.F.	APLICACIÓN	GRADO
DESCRIPCIÓN:	N/A	N/A	8.00	N/A	N/A	N/A	ENSAYOS A TERCERO	A-36

ENSAYO DE TRACCION.

	ANCHO (mm)	ESPEOR (mm)	AREA (mm ²)
MUESTRA # 1	12.34	7.991	98.61
MUESTRA # 2			

	AREA (mm ²)	FLUENCIA			TRACCION			ELONGACION	
		CARGA (Kgs)	Kgs/mm ²	MPA	CARGA (Kgs)	Kgs/mm ²	MPA	LONG. FINAL (mm)	%
MUESTRA # 1	98.61	2461	2496	245	4430	4492	4344	71.92	41.6
MUESTRA # 2					CARGA OBTENIDA PARA EL PUNTO ELASTICO				
PROMEDIO									

DUREZA (HRB)

	MUESTRA #1	MUESTRA #2
LECTURA #1	60	
LECTURA #2	58	
LECTURA #3	62	
PROMEDIO	60.00	

ESPECIFICACIONES

OTROS ENSAYOS

FLUENCIA (FSI)	N/A	
TRACCION (FSI)	N/A	
ELONGACION (%)	N/A	
DUREZA (HRB)	N/A	

OBSERVACIONES

DISPOSICION:

APROBADO

RECHAZADO

AUDITOR METALURGICO

CODIGO DE ENSAYO: M- 3325

F-TBI-0083 REV 3

(Tabla QW-422) ASME 2007-99.PDF

espec. N°	Tipo o grado	UNS N°	tension de tracion minima ksi (Mpa)	P N°	Grup o N°	SN°	Grupo N°	forma del producto
SA 36		K02600	58 (400)	1	1			Placa o forma
SA 53	Gr A	K02504	48 (330)	1	1			cañeria
SA 53	Gr B	K03005	60 (415)	1	1			cañeria
SA 105		K03504	70 (415)	1	2			forjado
SA 106	A	K02501	48 (330)	1	1			cañeria
SA 106	B	K03006	60 (415)	1	1			cañeria
SA 106	C	K03501	70 (485)	1	2			cañeria
SA 182	F304 L	S20400	75 (515)	8				forjado
API 5L	X42		60 (415)			1	1	cañeria
API 5L	X60		75 (515)			1	2	cañeria

Recomendaciones

Para estudios futuros se recomiendan tomar en cuenta cualquier variación de las propiedades del material base, como el ambiente de trabajo que afecta al proceso de soldeo, de tal forma de disminuir cualquier resultado erróneo y así obtener la tendencia de los esfuerzos residuales en las uniones soldadas a tope en los aceros ASTM A36.

Se recomienda para estudios posteriores, que a la hora de realizar cualquier tipo de ensayo se tengan conocimientos previos de las normas internacionales establecidas, de tal forma de cumplirlas estrictamente para establecer adecuadamente una buena metodología de trabajo para lograr exactitud y precisión en los resultados deseados.

Para los estudios futuros sobre el cálculo de la magnitud de los esfuerzos residuales en los aceros ASTM A36, se recomienda la verificación de las propiedades del material para establecer condiciones iniciales concretas y así prevenir la acumulación de esfuerzos originados por la fabricación del material en estudio.

Para la realización del proceso de soldadura se aconseja que sea efectuada por un soldador calificado por la AWS.

Para realizar cualquier prueba de dureza se deben tener en cuenta algunas normas generales que garantizan la exactitud del experimento, se recomienda preparar la superficie en estudio adecuadamente y aplicar numerosas indentaciones para obtener un perfil de dureza en todo el material para posteriormente obtener los esfuerzos residuales más cercano a la realidad.

Para corroborar los esfuerzos residuales se recomienda realizar diferentes ensayos que permitan calcular los esfuerzos residuales de tal manera de poder comparar y validar los resultados.

En el uso del puente de Wheatstone para la captura de la data de voltaje utilizando galgas extensométricas, se recomienda que los elementos que lo componen sean de alta precisión para así disminuir posibles errores, ya que el tipo de medida que se obtiene es muy bajo y cualquier tipo de ruido o perturbación puede arrojar datos erróneos durante el ensayo.

Referencias

- [1] Ajila C. (2008) “Estudio y Control de Distorsión en Estructuras de Acero Soldadas”, Guayaquil – Ecuador.
- [2] Alipso, Soldadura de arco, consulta 17 de enero de de 2010 <http://www.alipso.com/monografias/soldarco/index_image003.jpg>.
- [3] Busato G. y Busato P. (2004), “la influencia del número de pasadas de soldadura en un tubería de acero ASTM A106 Gr- B”, biblioteca rental Carlos Pérez Silva.
- [4] E.J. Pavlina and C.J. Van Tyne (2008), Correlation of Yield Strength and Tensile Strength with Hardness for Steels, ASM International.
- [5] F. J. Gil y J.M Manero Planella, Edición Junio de 2005, Metalografía pág. 13-19
- [6] Francisco Gonzales Diaz- Rubio (Octubre de 2004), “Bandas extensométricas”
- [7] Frolov, V. V. (1988) *Teoría de los procesos de soldadura*, Editorial Escuela Superior, Moscú, pp. 425-430

- [8] Horioka J. y Miranda J. (2002), “Estudios de los esfuerzos en uniones soldadas por el método de los elementos infinitos”, biblioteca rental Carlos Pérez Silva.
- [9] Jose Laddey M, Alberto Zapata y Dairo Mesa G (2007), “Recuperación y soldabilidad de fundición de hierro, Universidad tecnológica de Pereira, Colombia
- [10] Dr Weld 2010, Soldadura por arco, consulta: 02 de noviembre de 2010 <<http://www.drweld.com/submergedarc.html>>
- [11] Sabukan 2010, Tensiones residuales, consulta: 02 de noviembre de 2010 <<http://www.sabukan.com/buscar/tensiones-residuales-en-la-soldadura-metodos-para.html>>
- [12] Montaña, F. (2004). Tecnología Mecánica II. Bolivia: Universidad Mayor de San Simón, pagina: 235
- [13] Pontificia Universidad Católica del Perú, Soldadura de punto, consulta: 1 de febrero de 2010, <<http://blog.pucp.edu.pe/media/15/20071220-spotweld.jpg>>
- [14] Pontificia Universidad Católica del Perú, Propiedades de materiales, consulta: 1 de febrero de 2010, <<http://www2.ing.puc.cl/~icm2312/apuntes/materials3.html>>
- [15] **Revista** Académica de la. FI-UADY, 2008: *Reducciones de esfuerzos*, Consulta: 02 diciembre 2009, <http://www.ingenieria.Uady.mx/revista/.../reduccion_esfuerzos.pdf>

- [16] Sacrib, 2009 : Ensayo de tracción en aceros, consulta: 09 de febrero 2010, <<http://www.scribd.com/doc/16658462/Aceros-Ensayo-Tracc> >
- [17] Sférian Daniel, Editorial TECNOS, S.A , Metalurgia de la soldadura, pág. 66-83
- [18] W. Bullón C. J. Acosta S, R. Franco R. , Q. Valverde G. “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 en el año 2007
- [19] Fain: Soldadura, consulta: 02 de Noviembre 2010, <http://fain.uncoma.edu.ar/materias/Metalurgica_de_la_soldadura/Archivos%20de%20Metsold/tensiones_residuales_y_distorsion.pdf >
- [20] Cesca: Tratamientos térmicos, Consulta: 2 de noviembre de 2010, <http://www.tdr.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-1020104-093259//03Japb03de06.pdf >
- [21] Claudia P. Serna G., “Monitoreo del comportamiento de la Microdureza en uniones soldadas de aceros estructurales”, realizada en la Universidad de Antioquia Medellín - Colombia en el año 2004

UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
COORDINACION DE PROYECTOS DE GRADO

SINOPSIS DEL PROYECTO DE GRADO

TITULO DEL TRABAJO: INFLUENCIA DEL NÚMERO DE PASADAS EN UNA SOLDADURA DE ARCO ELÉCTRICO EN LA MAGNITUD DE LOS ESFUERZOS MECÁNICOS.

FECHA DE INICIO DEL TRABAJO: II/2009. **FECHA DE EX. FINAL:** II/2010.
FECHA DE ENTREGA DE EJEMPLARES DEFINITIVOS A DIRECCIÓN DE ESCUELA: Mecánica.

SINOPSIS:

El presente trabajo de investigación tiene como finalidad el estudio de la influencia del número de pasadas en una soldadura de arco eléctrico en la magnitud de los esfuerzos mecánicos. Inicialmente se somete a un proceso de recocido a la mitad de la población de probetas después de haber sido soldadas con los diferentes números de pases a estudiar, posterior al tratamiento térmico se realiza un ensayo de microdureza a toda la población estudiada. Con la correlación entre la dureza Vickers y el esfuerzo de fluencia se obtiene los primero valores de esfuerzo residual para cada número de pase estudiado. El ensayo de tracción con galgas extensométricas se realiza igualmente a toda la población de probetas. Se le aplica una carga semejante a todas las probetas en estudio que estén comprendidas dentro del rango del límite elástico del material para encontrar la deformación y mediante la ecuación de la Ley de Hooke encontrar las tensiones aplicadas. Posteriormente se calcula la diferencia entre dichas tensiones donde se obtienen los esfuerzos residuales, y así comparar los resultados obtenidos con los adquiridos por medio de la dureza Vickers del material. Con dichos resultados se obtiene gráficas que muestran similitud en la tendencia del comportamiento de los esfuerzos residuales a medida que aumenta el número de pases en el cordón de soldadura para los dos métodos utilizados las cuales nos llevan a concluir que a mayor número de pasadas en el cordón mayor esfuerzo residual.

**CEDULA DE
IDENTIDAD**

18.707.430

18.554.502

**ESTUDIANTES
NOMBRE**

Exime Ana

Mora O. Felix D.

FIRMA

PROFESOR GUIA: Edwin Peña.

JURADO: David Ojeda.

JURADO: Oswaldo Urbano.
