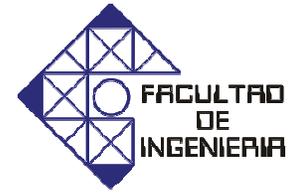




UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



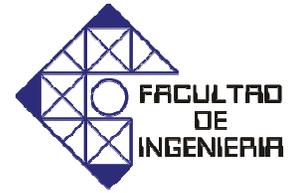
Influencia de la velocidad de enfriamiento en los esfuerzos residuales en soldaduras a tope en acero AISI 1018 sometidas a fatiga mecánica

Masip O. Jean P.
Takuma I. Rocio A.

Naguanagua, 27 de Mayo de 2011



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Influencia de la velocidad de enfriamiento en los esfuerzos residuales en soldaduras a tope en acero AISI 1018 sometidas a fatiga mecánica

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

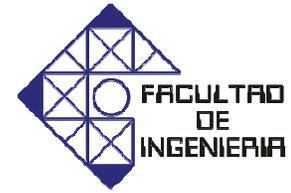
Tutor académico:
Edwin Peña. *Ing.*

Autores:
Masip O. Jean P.
Takuma I. Rocio A.

Naguanagua, 27 de Mayo de 2011



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Influencia de la velocidad de enfriamiento en los esfuerzos residuales en soldaduras a tope en acero AISI 1018 sometidas a fatiga mecánica

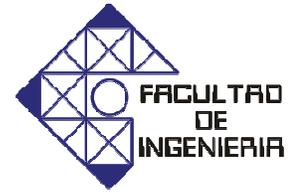
Trabajo especial de grado presentado ante la Ilustre Universidad de Carabobo para optar al título de Ingeniero Mecánico

Masip O. Jean P.
Takuma I. Rocio A.

Naguanagua, 27 de Julio de 2011



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 de la velocidad de enfriamiento en los esfuerzos residuales en soldaduras a tope en acero AISI 1018 sometidas a fatiga mecánica”***, presentada por los bachilleres: **Rocio A. Takuma Ichikawa**, y **Jean P. Masip Ordoñez**, portadores de la Cédula de Identidad N°: **82.076.587**, y **16.692.389**, respectivamente; hacemos constar que hemos revisado y aprobado el mencionado trabajo.

Prof. *Edwin Peña*
Presidente del jurado

Prof. Luis Sidorovas
Miembro del jurado

Prof. Argel Porrello
Miembro del jurado

En Naguanagua a los 27 días del mes de Mayo de 2011.

Agradecimientos

A DIOS por todos los favores recibidos, por ser quién ha estado a nuestro lado en todo momento, dándonos las fuerzas necesarias para continuar luchando día tras día, por iluminarnos en el camino del aprendizaje y enseñarnos a no dar punto final ni en el buen éxito primero, ni en el primer contratiempo.

A nuestra Alma Mater, la Universidad de Carabobo, que a través de sus profesores nos brindó la oportunidad de formar nuestros conocimientos, específicamente en la escuela de Ingeniería Mecánica.

A nuestros padres y hermanos por todo su amor, por todos los esfuerzos y sacrificios hechos por nosotros. Ellos han sido y son, sin lugar a dudas, fuente de energía continua para seguir avanzando.

Al Profesor Edwin Peña, tutor de esta investigación, por darnos la oportunidad de aprender a su lado, por sus consejos, su constante apoyo, sus útiles sugerencias durante todo el período del trabajo y elaboración de esta tesis.

Al Ing. Alberto Longo por toda la colaboración, la paciencia y el apoyo prestado al abrimos las puertas de la empresa privada, durante el desarrollo de la fase experimental del presente trabajo de investigación.

A nuestra familia por su apoyo incondicional, sus consejos y las muestras de amor y de cariño recibidas de forma permanente durante todo este tiempo.

A aquellos compañeros de estudios y amigos que nos han apoyado y animado de manera incondicional.

Resumen

El presente trabajo de investigación tiene como finalidad el estudio de la influencia de la velocidad de enfriamiento en los esfuerzos residuales en soldaduras a tope del acero AISI 1018 en probetas de sección transversal circular sometidas a condiciones de fatiga mecánica. Actualmente existe cierta incertidumbre de cómo es el comportamiento de las uniones soldadas cuando están sometidas a cargas dinámicas, desconociéndose cómo afecta la velocidad de enfriamiento de la soldadura en sus propiedades mecánicas, generando de esta manera desconfianza e incertidumbre en cada una de sus aplicaciones en la industria. Las probetas para ensayos de fatiga se clasificaron en cinco grupos, las del material en condiciones originales, las soldadas con regeneración por recocido, las soldadas y enfriadas a aire tranquilo, las soldadas y enfriadas a velocidad de aire de 3,1 m/s y las soldadas y enfriadas a una velocidad de aire de 4,8 m/s, para luego ser sometidas a los ensayos de fatiga, posteriormente se procede a graficar los resultados obtenidos de los ensayos para así poder comparar cada grupo de probetas. Las gráficas obtenidas muestran el esfuerzo S que causa la falla en comparación con el número de ciclos N a los que se produce la falla, el análisis de dichas gráficas permite concluir que la velocidad de enfriamiento disminuye notablemente la resistencia a la fatiga a medida que aumenta el número de ciclos, debido al incremento de los esfuerzos residuales generados por el enfriamiento forzado.

Índice general

Índice general

Índice de figuras

Índice de tablas

CAPÍTULO 1 Introducción

- 1.2 Planteamiento del problema, 1
- 1.3 Objetivos, 3
 - 1.3.1 *Objetivo General*, 3
 - 1.3.2 *Objetivos Específicos*, 4
- 1.4 Justificación, 4
- 1.5 Alcance, 5
- 1.6 Limitaciones, 6
- 1.7 Antecedentes, 6

CAPÍTULO 2 Marco Teórico

- 2.1 Acero, 9
 - 2.1.1 Acero AISI 1018, 10
- 2.2 Proceso de soldadura, 12
 - 2.2.1 *Soldadura de arco con electrodo revestido (SMAW)*, 12
 - 2.2.2 *Características y aplicaciones de la soldadura por arco manual*, 13
- 2.3 Esfuerzos residuales, 14

- 2.3.1 Tensiones residuales en soldaduras, 16
- 2.3.2 Tratado de Masubushi K sobre esfuerzos residuales, 19
- 2.4 Tratamientos térmicos, 24
- 2.5 Cargas por fatigas, 26
- 2.6 Mecanismo de las fallas por fatiga, 27
- 2.8 Diagrama S-N, 29
- 2.9 Definición de dureza, 30
 - 2.9.1 Tipos de dureza, 31
 - 2.9.2 Correlación entre el esfuerzo de fluencia y esfuerzo último con la dureza en los aceros al carbono, 32

CAPÍTULO 3 Marco metodológico

- 3.1 Metodología de la investigación, 33
- 3.2 Diseño de la investigación, 34
- 3.3 Población y muestra, 34
- 3.4 Estimación experimental de los esfuerzos residuales, 35
 - 3.4.1 *Selección del material para las probetas, 35*
 - 3.4.2 *Adquisición del material, 36*
 - 3.4.3 *Determinación de las propiedades mecánicas, 37*
 - 3.4.4 *Realización de las probetas, 37*
 - 3.4.5 *Tratamiento térmico de las probetas del grupo B, 39*
 - 3.4.6 *Preparación de la probeta para ensayo de microdureza Vickers, 40*
 - 3.4.7 *Medición de microdureza Vickers, 41*
 - 3.4.8 *Obtención de los esfuerzos residuales mediante el método de Masubushi a partir de ensayos de dureza Vickers, 42*
- 3.5 *Determinación de la influencia de la velocidad de enfriamiento, 42*
 - 3.5.1 *Ensayo de fatiga, 42*
- 3.6. *Realización de las curvas S-N, 46*
- 3.7 *Validación y procesamiento de datos, 47*

CAPÍTULO 4 Resultados Experimentales

49

- 4.1. Propiedades iniciales del material, 49
- 4.2 Cálculo de la dureza mediante el ensayo de microdureza Superficial, 50
- 4.3 Cálculo experimental del límite de fluencia, 51
- 4.4 Cálculo de esfuerzos residuales superficiales mediante el método de Masubushi, 52

4.5 Determinación de la fuerza aplicada a cada ensayo, 53

CAPÍTULO 5	Discusión de resultados	67
	Conclusiones	71
	Recomendaciones	73
	Referencias	75

Índice de Figuras

Figura 2.1 <i>Barras de acero AISI 1018</i>	10
Figura 2.2 <i>Soldadura SMAW</i>	13
Figura 2.3 <i>Historia de las tensiones y temperaturas para la barra central en el sistema de las tres barras</i>	20
Figura 2.4 <i>Estados transitorios y finales durante la soldadura</i>	23
Figura 2.5 <i>Ejemplo de un diagrama S-N</i>	30
Figura 3.1 <i>Figura de la probeta</i>	38
Figura 3.2 <i>Foto de probeta soldada antes del mecanizado final</i>	38
Figura 3.3 <i>Foto de probeta soldada y totalmente mecanizada</i>	39
Figura 3.4 <i>Diagrama Hierro-Carbono del acero</i>	39
Figura 3.5 <i>Horno para recocido</i>	40
Figura 3.5 <i>Foto de probeta sometida a tratamiento térmico</i>	38
Figura 3.6 <i>Indicador de fuerza</i>	43
Figura 3.7 <i>Mordaza desenroscada de la máquina de fatiga</i>	44
Figura 3.8 <i>Sistema aplicador de fuerza.</i>	44
Figura 3.9 <i>Probeta ajustada en la máquina de fatiga.</i>	45
Figura 3.10 <i>Rejilla de seguridad cerrada.</i>	45
Figura 3.11 <i>Tablero de control de la máquina de fatiga</i>	46
Figura 4.1 <i>Curva Esfuerzo-Deformación.</i>	50
Figura 4.2 <i>Curva Microdureza Vickers Vs distancia con respecto a la</i>	

<i>soldadura</i>	51
Figura 4.3 Curva Esfuerzo Residual vs Distancia del cordón de soldadura	53
Figura 4.4 Curva S-N para probetas sin soldar.	62
Figura 4.5 Curva S-N para probetas soldadas y con regeneración por recocido.	63
Figura 4.6 Curva S-N para probetas soldadas y enfriadas a aire tranquilo.	63
Figura 4.7 Curva S-N para probetas soldadas y enfriadas a una velocidad de aire de 3,1 m/s	64
Figura 4.8 Curva S-N para probetas soldadas y enfriadas a una velocidad de aire de 4,8 m/s.	64
Figura 4.9 Curva S-N comparativa para cada grupo de probetas según su especificación.	65

Índice de Tablas

Tabla 3.1 <i>Composición química del acero AISI 1018.</i>	36
Tabla 3.4 <i>Distribución de las probetas para los ensayos.</i>	47
Tabla 4.1 <i>Propiedades mecánicas del acero AISI 1018.</i>	49
Tabla 4.2 <i>Datos promedios de Microdureza Vickers de la probeta soldadas.</i>	51
Tabla 4.3 <i>Esfuerzos de fluencia de cada grupo de probetas</i>	52
Tabla 4.4 <i>Esfuerzos residuales de cada grupo de probetas</i>	52
Tabla 4.5 <i>Fuerza aplicada a las probetas en el ensayo de fatiga.</i>	54
Tabla 4.6 <i>Valores de los ensayos de fatiga a probetas mecanizadas sin soldar.</i>	55
Tabla 4.7 <i>Valores de los ensayos de fatiga a probetas mecanizadas soldadas y con regeneración por recocido.</i>	56
Tabla 4.8 <i>Valores de los ensayos de fatiga a probetas mecanizadas soldadas y enfriadas a aire tranquilo.</i>	57
Tabla 4.9 <i>Valores de los ensayos de fatiga a probetas mecanizadas soldadas y enfriadas con una velocidad de 3,1 m/s.</i>	58
Tabla 4.10 <i>Valores de los ensayos de fatiga a probetas mecanizadas soldadas y enfriadas con una velocidad de 4,8 m/s.</i>	59
Tabla 4.11 <i>Valores promedios para probetas sin soldar</i>	60
Tabla 4.12 <i>Valores promedios de los ensayos de fatiga a probetas</i>	60

mecanizadas soldadas y con regeneración por recocido.

Tabla 4.13 *Valores promedios de los ensayos de fatiga a probetas mecanizadas soldadas y enfriadas a aire tranquilo.* 61

Tabla 4.14 *Valores de los ensayos de fatiga a probetas mecanizadas soldadas y enfriadas con una velocidad de 3,1 m/s.* 61

Tabla 4.15 *Valores de los ensayos de fatiga a probetas mecanizadas soldadas y enfriadas con una velocidad de 4,8 m/s.* 61

CAPÍTULO 1

EL PROBLEMA

1.1 Introducción

Hoy en día la conformación de piezas metálicas complejas es el resultado de la unión de piezas más simples, uno de los métodos de unión de piezas metálicas más usado es el de la soldadura, y más aún, la soldadura por arco eléctrico protegido (SMAW por sus siglas en inglés “*Shielded metal arc welding*”); sin embargo el proceso de soldadura comprende cierto fenómeno térmico que, a pesar de su corta duración, produce en el cordón y zonas adyacentes gradientes de temperatura, los cuales originan distorsiones y esfuerzos residuales, que comprometen el desempeño de la junta soldada.

El proceso de soldadura puede ser llevado a cabo en ambientes diferentes, incluyendo al aire libre, lo cual afecta la velocidad de enfriamiento de la misma y a su vez los esfuerzos residuales. De allí la necesidad de analizar la influencia de la velocidad de enfriamiento en los esfuerzos residuales.

1.2 Situación problemática

En el proceso de fabricación de piezas se enfrenta muchas veces con uniones entre dos o más partes para lograr culminar la pieza a realizar. Para llevar a cabo la unión usualmente se consigue a través de la coalescencias (fusión) del material de la pieza y agregando un material de relleno proveniente

del electrodo el cual posee una temperatura de fusión menor a la del material base, además es de importancia acotar que el proceso de soldadura es muy utilizado hoy en día ya que existe una gran cantidad de piezas con este tipo de juntas.

Luego de lograr la unión de las piezas, se presenta una nueva dificultad que no es más que esta junta pasaría a ser la zona crítica de la pieza debido a la aparición de esfuerzos residuales que quedan luego del proceso de soldadura y son generados por la expansión y contracción del material base, esto se origina por las pérdidas de calor desigual en todo el material de la pieza, originando compresión en las zonas donde el flujo de calor es mayor, y tracción en los sitios donde el flujo de calor es menor.

En la fabricación de las piezas mencionadas se busca que sean calificadas con alta calidad, confiabilidad, bajos costo de fabricación y bajo costo de mantenimiento, la falla por fatiga afecta directamente en la confiabilidad y costo de la pieza debido a su ocurrencia y su prevención.

La falla por fatiga siempre empieza en una grieta, esta zona de iniciación y la propagación de microgrietas sometidas a fatiga se ven afectados por distintos factores que influyen sobre el límite de la fatiga y entre ellos se tienen:

- Calidad superficial: Un mejor acabado superficial disminuye la presencia de concentradores de tensión.
- Dureza superficial: Tratamientos de endurecimiento superficial retardan la aparición de grietas mediante el mecanismo de deslizamiento de dislocaciones al dificultar el movimiento de estas últimas.
- También existen otros factores modificadores del límite de fatiga que deben ser tomados en cuenta, podemos mencionar: Tamaño; el tamaño es determinante, pues a mayor sección transversal, mayor es la concentración de esfuerzos y las posibles fallas internas en el materias. Temperatura, la temperatura incide enormemente en la variación del

límite de fatiga, pues al alterarse térmicamente las propiedades del material, este pasa a comportarse de forma diferente.

La grieta pudiera haber estado presente en el material desde su manufactura o haberse presentado a lo largo del tiempo, por causa de las deformaciones cíclicas cerca de las concentraciones de esfuerzos.

En la junta soldada aparecen factores que influyen sobre el límite de fatiga debido a la generación de esfuerzos residuales ya mencionados y la alteración térmica sufrida en el material al ser soldado que varía sus propiedades; esto hace que la soldadura sea un concentrador de esfuerzos.

Actualmente, en la industria es común observar piezas soldadas sometidas a cargas dinámicas, ya sea porque su proceso de fabricación así lo requiera o porque han sufrido alguna reparación como por ejemplo: ejes, puntas de ejes, puntas de tripoides, entre otros.

De acuerdo con lo anteriormente expuesto y debido a que se presume que no existen investigaciones pasadas que suministren información acerca de la influencia de la velocidad de enfriamiento a temperatura ambiente en los esfuerzos residuales en soldadura a tope en aceros AISI 1018 sometidas a condiciones de fatiga, surge la necesidad de llevar a cabo la presente investigación.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Evaluar la influencia de la velocidad de enfriamiento en los esfuerzos residuales en soldaduras a tope del acero AISI 1018 en probetas de sección transversal circular sometidas a condiciones de fatiga mecánica.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Organizar la información compilada sobre fatiga mecánica, las características del acero AISI 1018 y la soldadura SMAW.
- Determinar las propiedades mecánicas del acero AISI 1018.
- Aplicar ensayos de fatiga mecánica a probetas soldadas a tope circular con un proceso de soldadura con electrodo revestido (SMAW) enfriadas a distintas velocidades.
- Aplicar ensayos de fatiga mecánica a probetas soldadas a tope circular con un proceso de soldadura con electrodo revestido (SMAW) con tratamiento de recocido.
- Estimar la magnitud de los esfuerzos residuales en soldaduras a tope del AISI 1018 generados en condiciones de fatiga mecánica variando la velocidad de enfriamiento.
- Determinar la relación existente entre las probetas soldadas y enfriadas a distintas velocidades con las probetas soldadas y con regeneración por recocido.

1.4 Justificación

Hoy en día en el sector industrial se busca primordialmente la obtención de diseños de piezas de alta calidad, confiabilidad y de bajos costos, siendo lo ideal encontrar el punto de equilibrio entre dichos parámetros, sincerando el sobre diseño.

La falla por fatiga es causa de un costo importante en la economía, debido a la ocurrencia o prevención de las fallas por fatiga ya que esto se presencia en vehículos terrestres, vehículos sobre rieles, aeronave de todo tipo, puentes, grúas, equipos de plantas generadoras de energía, estructura de pozos petroleros submarinos y una amplia variedad de máquinas y equipos varios, como artefactos domésticos, juguetes, etc.

Este tipo de fallas no sólo produce grandes pérdidas monetarias si no también puede implicar vidas humanas debido a la estrecha relación existente entre las personas y dichas máquinas.

En su mayoría, las fallas en las máquinas se deben a cargas que varían con el tiempo y no a cargas estáticas. Estas fallas suelen ocurrir a niveles de esfuerzo muy por debajo del límite elástico de los materiales. Por lo tanto manejar sólo las teorías de falla estática puede llevar a diseños poco seguros cuando las cargas sean dinámicas. (Norton, 1999)

Es por ello que este estudio propone evaluar el efecto de la velocidad de enfriamiento en la magnitud de los esfuerzos mecánicos en soldaduras a tope en probetas de sección transversal circular sometidas a condiciones de fatiga mecánica, para así producir algún impacto sobre las corrientes del diseño con el fin de evitar la incertidumbre que se ve reflejada en el sobre diseño y en los altos costos de producción.

1.5 Alcance

- La investigación y los ensayos a realizar sólo serán para acero AISI 1018
- Únicamente se realizará el estudio para soldaduras de arco con electrodo revestido, en acero AISI 1018
- El tipo de junta a utilizar en el proceso de soldadura será el de junta a tope, siendo la probeta de sección transversal circular.
- Se estudiará la variación de la magnitud de los esfuerzos mecánicos en soldaduras de arco con electrodo revestido según la variación de la velocidad de enfriamiento de la soldadura.

- Se realizará el enfriamiento de la soldadura a aire tranquilo a temperatura ambiente y a aire a temperatura ambiente agitado mediante la utilización de un ventilador a distintas velocidades

1.6 Limitaciones

- La presente investigación en el tiempo sólo comprende un estimado de dos semestres.

1.7 Antecedentes

Tso-Liang Teng *et al*, (2002) Concluyeron que predecir acertadamente los esfuerzos residuales en soldaduras y desarrollar una secuencia acertada para un proceso de soldado son tareas pertinentes debido a que la aparición de esfuerzos residuales en una estructura soldada es inevitable. Este estudio analizó el comportamiento termomecánico y evaluó los esfuerzos residuales con diversas secuencias de soldadura en una pasada, múltiples pasadas, a tope y en secciones circulares. Todo esto fue llevado a cabo mediante la realización de un análisis térmico elástico-plástico usando el método de los elementos finitos. Además, esta investigación provee una secuencia de soldadura que mejora el proceso de fabricación de estructuras soldadas

Murakami y Miller, (2004) Determinaron que el daño por fatiga debe ser expresado en términos de la grieta. Este hecho fue revelado en varios puntos de prueba experimental. Primero, se hicieron observaciones a un acero de medio carbono que relacionó las zonas de iniciación y la propagación de pequeñas grietas sometidas a fatiga de bajo ciclaje, dichas observaciones de basan en el estudio de réplicas de superficies. Se demostró que la relación de

fatiga alto-esfuerzo, bajo-ciclaje de Coffin-Manson es sustancialmente igual que la ley del crecimiento de grietas. Segundo, se investigó el efecto de lo que ocurrió antes de la fatiga en la velocidad del crecimiento de una grieta pequeña, de manera sistemática usando probetas con un pequeño agujero hecho de varios diámetros, de 40, 100 y 200 μm . Se muestra que cualquier evento o factor ocurrido antes de la fatiga tiene una pequeña influencia sobre la velocidad del crecimiento de la grieta en un régimen de alto-esfuerzo. Tercero, se reveló que la pérdida de ductilidad luego del esfuerzo por ciclaje en pruebas de fatiga a alto esfuerzo es atribuible a la existencia de pequeñas grietas superficiales.

Branza *et al*, (2008) Llevaron a cabo el estudio de la soldadura de aceros fundidos resistentes a altas temperaturas, llevado a cabo mediante un proceso automatizado de soldadura por arco eléctrico (SMAW), con diversos materiales de aporte y precalentados a 400°C. Las probetas soldadas con un material de aporte más resistente que el acero fundido resistente a altas temperaturas, se agrietaron en la base del metal después de la décima pasada, mientras que probetas rellenas con una aleación blanda antes de soldar permanecieron libres de grietas.

El tiempo de vida por fatiga de un material soldado sin relleno es menor que la del material inicial a granel. Esto se debe al aumento de la amplitud del esfuerzo como resultado del muy conocido “sobre maquinado”. En el caso de un material soldado previamente relleno, el tiempo de vida por fatiga se reduce por causa del esfuerzo triaxial generado en la delgada y suave capa que previene que fluya plásticamente. Se concluyó que a pesar de que el relleno previene el agrietamiento eficientemente durante el proceso de soldadura, no es aceptable en cuanto al comportamiento a la fatiga, especialmente tiempo de vida.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

A continuación se presentan los aspectos teóricos necesarios para satisfacer el objetivo de la investigación, aspectos tales como las características del material, los ensayos mecánicos y el proceso de soldadura, entre otros.

2.1 Acero

Los aceros son aleaciones de hierro carbono, aptas para ser deformadas en frío y en caliente. Generalmente el porcentaje de carbono no excede e 1,76%.

El acero se obtiene sometiendo el arrabio a un proceso de descarburación y eliminación de impurezas llamado afino (oxidación del elemento carbono)

Atendiendo al porcentaje de carbono, los aceros se clasifican en:

- Aceros hipoeutectoides, si su porcentaje de carbono es inferior al punto S (eutectoide), o sea al 0,89%.
- Aceros hipereutectoides, si su porcentaje de carbono es superior al punto S.

Desde el punto de vista de su composición, los aceros se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- a) Aceros al carbono: formados principalmente por hierro y carbono.

- b) Aceros aleados: Contienen, además del carbono otros elementos en cantidades suficientes como para alterar sus propiedades (dureza, puntos críticos, tamaño del grano, templabilidad, resistencia a la corrosión).
- c) Con respecto a su composición, puede ser de baja o alta aleación y los elementos que puede contener el acero pueden ser tanto deseables como indeseables, en forma de impurezas. (Hibbeler, 2006)

2.1.1 Acero AISI 1018

Este acero de bajo - medio carbono tiene buena soldabilidad y ligeramente mejor maquinabilidad que los aceros con grados menores de carbono. Se presenta en condición de calibrado (acabado en frío). Debido a su alta tenacidad y baja resistencia mecánica es adecuado para componentes de maquinaria. Las barras de acero AISI 1018 se muestran en la figura 2.1.

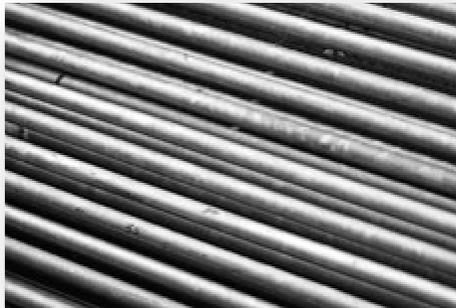


Figura 2.1.- Barras de Acero AISI 1018

Fuente: Sumiteccr. Mayo 2001

<http://www.sumiteccr.com/navegadores/esp/productos_esp.shtml>

Normas involucradas:

- ASTM A 108

Propiedades mecánicas:

- Dureza 126 HB (71 HRB)
- Esfuerzo de fluencia 370 MPa (53.700 PSI)
- Esfuerzo máximo 440 MPa (63.800 PSI)
- Elongación máxima 15% (en 50 mm)
- Reducción de área 40%
- Módulo de elasticidad 205 GPa (29.700 KSI)
- Maquinabilidad 76% (AISI 1212 = 100%)

Propiedades físicas:

- Densidad 7.87 g/cm³ (0,284 lb/in³)

Propiedades químicas:

- 0,15 – 0,20 % C
- 0,60 – 0,90 % Mn
- 0,04 % P máx
- 0,05 % S máx

Usos:

Se utiliza en operaciones de deformación plástica como remachado y extrusión. Se utiliza también en componentes de maquinaria debido a su facilidad para conformarlo y soldarlo. Piezas típicas son los pines, cuñas, remaches, rodillos, piñones, pasadores, tornillos y aplicaciones de lámina (Sumiteccr, 2001).

2.2 Proceso de Soldadura

La soldadura es un proceso de fabricación que consiste en la unión de dos materiales, (generalmente metales), normalmente logrado a través de la

fusión, en la cual las piezas son soldadas fundiendo las dos partes de unión y aportando 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 (el baño de soldadura) que, al enfriarse, se convierte en una unión fuerte. 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 (*Kalpakjian & Schmid, 2002*).

2.2.1 Soldadura de arco con electrodo revestido (SMAW)

Este es un proceso de soldadura en el cual se produce un arco eléctrico entre un electrodo revestido y la superficie de un metal base. Este arco produce el calor necesario para fundir el metal base y el de relleno (electrodo), los cuales coalescen. (ver figura 2.2)

El electrodo contiene en su parte central material que conduce la corriente eléctrica y proporciona el metal de relleno para la unión.

El material de revestimiento del electrodo protege al metal fundido de la atmósfera, además de servir como estabilizador del arco, proporcionar aleantes, etc (Norton, 1999).

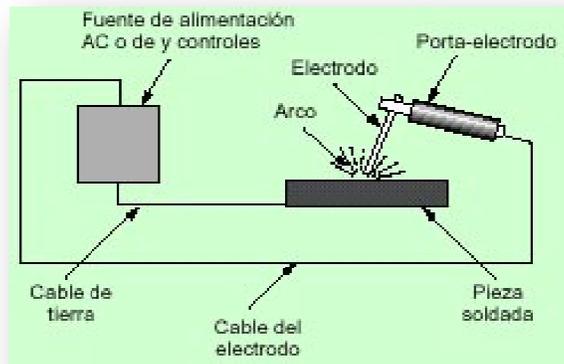


Figura 2.2.- Soldadura SMAW

Fuente: Substech. Julio 2009.

<<http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=welding>>

2.2.2 Características y aplicaciones de la soldadura por arco manual

- a. La soldadura de arco con electrodo revestido es un proceso usado ampliamente, particularmente en soldaduras de producción, mantenimiento, reparación o construcción.
- b. El equipo es simple, económico y portátil.
- c. Debido a que el material protector del arco están en el revestimiento, no se requiere emplear otros materiales.
- d. La posición de la soldadura no está limitada por este proceso, sino solo por el tipo y tamaño del electrodo.
- e. El proceso puede usarse para soldar la mayoría de los materiales usados comúnmente.
- f. Los metales de bajo punto de fusión como el plomo, estaño, zinc, etc. no se sueldan por este proceso, porque el calor que se produce suele ser muy alto.

- g. Los metales reactivos tales como titanio, circonio, tantalio, etc. no son soldados por este proceso, pues son sensibles al oxígeno y la protección que se obtiene no es la apropiada.
- h. La velocidad de depósito de soldadura es relativamente baja por este proceso, debido a que existe necesidad de cambiar los electrodos, los cuales sólo se producen en longitudes cuyo rango es de 230 a 460 mm.
- i. El proceso de soldadura de arco con electrodo revestido se aplica a cualquier espesor de material dentro de consideraciones prácticas y económicas. Para espesores menores a 3 mm, el metal fundido puede caer si no se toman las precauciones necesarias.
- j. No hay límite superior de espesor, pero por razones de competitividad, la mayoría de las aplicaciones se presentan en espesores de entre 3 y 38 mm.
- k. Localización de la soldadura.- Debido a que el equipo es muy simple, el proceso es muy versátil respecto a la localización y el ambiente. La soldadura se puede llevar a cabo a puerta cerrada, a cielo abierto, en un barco, puente, edificio, etc. En sitios remotos, una fuente de poder de diesel o gasolina puede usarse (*Kalpakjian & Schmid, 2002*).

2.3 Esfuerzos Residuales

Los esfuerzos residuales son aquellos esfuerzos “interconstuidos” en una pieza sin carga. La mayor parte de las piezas contendrán algunos esfuerzos residuales, provenientes de sus procesos de manufactura. Cualquier procedimiento como el conformado, o el tratamiento térmico, que crean deformaciones localizadas por arriba del punto de fluencia, dejarán tras sí esfuerzos cuando desaparezca la deformación. Un buen diseño necesita que el ingeniero trate de adecuar los esfuerzos residuales para, como mínimo, no

crear efectos negativos en la resistencia y de preferencia, para crear efectos positivos.

La falla por fatiga es un fenómeno de esfuerzo a tensión. Aunque el diseñador tiene poco o ningún control sobre la presencia o ausencia de un esfuerzo medio a compresión en el patrón de la carga a la cual se va a sujetar la pieza, existen técnicas que permiten la introducción en las piezas de esfuerzos residuales a compresión, antes de colocarlas en servicio. Si se hace adecuadamente, estos esfuerzos residuales a compresión pueden aportar mejorías significativas en la vida a la fatiga (Norton, 1999).

Hay varios métodos para introducir esfuerzos residuales a compresión:

- **Tratamientos térmicos:** El esfuerzo térmico ocurre siempre que una pieza sea calentada y enfriada, como en el conformado en caliente o en los tratamientos térmicos. Se subdividen a grandes rasgos en dos clases, endurecimiento en la masa, en el cual toda la pieza se calienta por encima de su temperatura de transición y a continuación se temple, y cementación, en el cual sólo se calienta una capa superficial relativamente delgada por encima de la temperatura de transición, y se temple o la pieza se calienta a una temperatura inferior pero en una atmósfera especial, que agrega elementos endurecedores a la superficie.
- **Tratamientos superficiales:** Los métodos más comunes para introducir esfuerzos superficiales a compresión son el granallado y el formado en frío. Ambos implican una fluencia a tensión de la capa superficial hasta cierta profundidad. La fluencia selectiva de una porción del material hace que se desarrollen esfuerzos residuales de signo opuesto en dicha porción, conforme la masa subyacente del material sin esforzar intenta obligar al material que ha cedido a que vuelva a su tamaño original.

- **Preesforzado mecánico:** Para aquellas piezas que durante su servicio están cargadas dinámicamente sólo en una dirección, como los muelles de soporte para los vehículos, el preesforzado es una forma útil de crear esfuerzos residuales. El preesforzado significa una sobrecarga deliberada de la pieza, en la misma dirección que su carga de servicio, antes de que sea colocada en servicio. La fluencia que ocurre durante el preesforzado crea esfuerzos residuales benéficos (Norton, 1999).

2.3.1 Tensiones residuales en soldaduras

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.

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 " ΔT " y del coeficiente " α " 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 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.

Según estudios realizados anteriormente la secuencia de soldadura tiene un efecto poco significativo en las tensiones residuales, pero si influyen en mayor magnitud en las distorsiones, no se puede ver por separado las deformaciones y tensiones como se muestra a continuación:

Las tensiones (σ), usualmente expresada en carga de fuerza por área se calculan:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.1)$$

Donde:

P= fuerza de tracción o compresión total, N

A= área de la sección transversal, m²

σ = Esfuerzo Normal, MPa

Las deformaciones (ξ) ocurren cuando se aplican cargas y la pieza varía su longitud inicial.



(2.2)

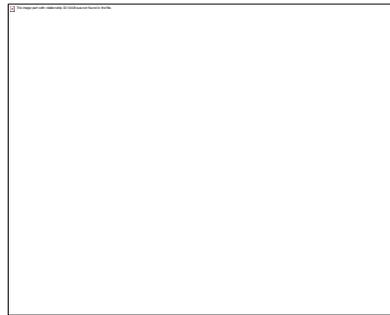
Donde:

: Deformación (mm/mm).

: Longitud final (mm).

: Longitud inicial (mm).

En los análisis de tensiones se acostumbra asumir que el material es puramente elástico y homogéneo (las propiedades del material son las mismas en todas las direcciones) de acuerdo con la Ley de Hooke por lo que las deformaciones y tensiones son proporcionales como se muestra a continuación:



(2.3)

Donde:

E = módulo de elasticidad longitudinal (en tensión) o módulo de Young
MPa

 = coeficiente de Poisson.

Se debe agregar que los parámetros que afectan las tensiones residuales son el calor aportado, geometría de la pieza, grado de embridamiento y el límite de elasticidad longitudinal del material (Hibbeler,2006).

El calor aportado es igual a la potencia de la fuente dividida por la velocidad de soldadura:

$$H = \frac{P}{V} \quad (2.4)$$

Donde:

, en J/seg.

V= mm/s

H= J/mm

2.3.2 Tratado de Masubushi K sobre esfuerzos residuales.

Masubushi K, a manera de explicar el fenómeno de los esfuerzos residuales aplica un sistema de tres (3) barras y explica la variación que produce la barra central como se muestra en la figura 2.3. La línea E' B' indica, que tensiones residuales iguales al límite de fluencia se producirá calentando la barra central a cualquier temperatura que exceda 315 °C.

Al calentar exclusivamente la barra central aparecen tensiones de compresión en la misma, pues su dilatación está restringida por dos barras laterales, tal como muestra la curva A-B, alcanzando el límite de fluencia del metal de la barra en el punto "B" (para este caso 170 °C).

Las tensiones de compresión en la barra decrecen siguiendo la variación del límite de fluencia del metal con las temperaturas crecientes, lo que se muestra en el tramo de curva B-C. Alcanzada la temperatura máxima de ≈600 °C correspondiente al punto "C" comienza el enfriamiento de la barra, las tensiones de compresión decaerán rápidamente y la tensión cambia de signo hasta alcanzar el punto "D" correspondiente a la tensión de fluencia, posteriores decrecimientos de la temperatura hacen que las tensiones de tracción sobre la barra se mantengan permanentemente iguales al valor del límite de fluencia a cada temperatura. De esta forma habrá quedado

sometida a una tensión residual de tracción igual al límite de fluencia del metal a temperatura ambiente. Para mantener la condición de equilibrio las tensiones en las barras laterales serán de compresión y su valor será la mitad que la tensión en la barra central.

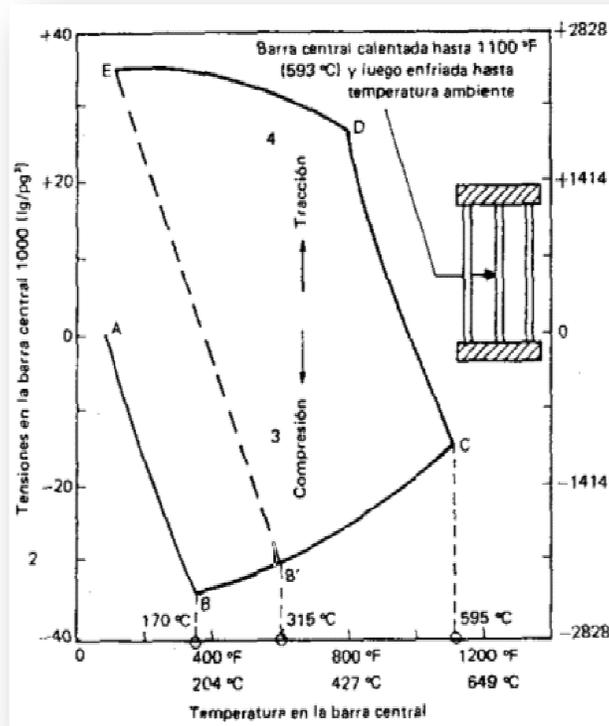


Figura 2.3.- Historia de las tensiones y temperaturas para la barra central en el sistema de las tres barras. (Metal Universe. Publicación de Metal Univers (Nº 38). España: Nova Àgora, S.L, 2. 2006).

Por lo que se concluye que cualquier proceso que aporte calor en forma localizada sobre una pieza de acero y de tal manera que a la temperatura final se produzcan deformaciones plásticas, dejará en dicha pieza tensiones residuales de valor generalmente igual o muy próximo al límite de fluencia del material a temperatura ambiente. Cuando se unen dos o más piezas mediante un cordón de soldadura ocurren fenómenos similares a

los explicados mediante el clásico sistema de las tres barras, donde coincide el cordón con la barra central y el metal base con las barras laterales.

A continuación se explica (sobre la base de lo planteado por Masubushi K.) el curso de acontecimientos térmicos y movimientos de expansión contracción cuando se efectúa un cordón de soldadura sobre una chapa lo cual se puede dividir en 4 secciones, como muestra la figura 2.4.

La sección A-A.

Ubicada delante de fuente de calor todavía no ha experimentado perturbación alguna como consecuencia del arco situado en "B", por lo tanto su temperatura será la inicial " T_0 " y la pieza se encuentra libre de tensiones residuales atribuibles a ese arco.

La sección B-B.

Ubicada en el centro del arco experimenta un súbito crecimiento de temperatura hasta alcanzar el valor máximo, se produce la elevación de temperatura de las zonas adyacentes.

Este aumento de temperatura provoca la dilatación de las masas y consecuentemente aparecen tensiones de compresión en las zonas adyacentes al metal fundido.

En las zonas más alejadas y frías, responsables de embridamiento de las zonas que se expanden aparecen tensiones de tracción para mantener el equilibrio de tensiones de la pieza. El metal fundido carece de resistencia mecánica, por lo que en el centro de la soldadura la tensión tendrá valor cero.

La sección C-C.

Estará enfriándose después de haber sido transitada por el arco en razón de la conductividad térmica del metal, tan pronto como pase el arco comenzará la evacuación del calor hacia el resto de la pieza con lo que descenderá la temperatura de la zona calentada por este.

En lo que respecta al estado de tensiones se observa que al enfriarse las zonas dilatadas en condición de embridamiento, surgen tensiones de tracción en la zona de soldadura y en la zona afectada por el calor.

En zonas alejadas aparecen tensiones de compresión para que se cumpla la condición de equilibrio.

La sección D-D.

Suficientemente alejada del arco como para que se haya producido el enfriamiento total, se encontrará nuevamente la temperatura inicial de la pieza, las tensiones tendrán su valor máximo final que corresponde al estado permanente definitivo de las tensiones residuales.

Es importante señalar, que durante los estados transitorios, como en la condición final, deberán satisfacerse las condiciones clásicas de equilibrio de las fuerzas y momentos totales actuantes, es decir, que la sumatoria de las fuerzas residuales es nula, lo que implica ausencia de traslación y rotación.

Las tensiones residuales surgen tanto en el plano perpendicular como en el longitudinal, siendo esta última de mayor magnitud, además a medida que nos alejamos de la línea de fusión de soldadura ambas disminuye.

Desconocer, esta influencia puede traer consecuencias fatales o daños incalculables en la utilización de un determinado mecanismo, pieza y en ocasiones plantas completas como por ejemplo se puede mencionar:

Lo ocurrido en la Electric Power Research Institute, Palo Alto, California donde realmente un uso inadecuado de la soldadura ocasionó graves consecuencias en una planta generadora de 500 MW .

Una gotera o escape en un tubo que contenía una alteración en el metal de la soldadura, se destruye en dos días ocasionando un gasto de \$1 millón de dólares, un escape en un cabezal de la caldera ocasionó un gasto de \$1 millón

de dólares, la catastrófica destrucción con la pérdida de la potencia costo poco más de \$100 millones de dólares.

Este ejemplo da una valoración de la importancia del conocimiento de las consecuencias nocivas de las tensiones residuales en la soldadura, pero se necesita de métodos de detección y medición de las mismas (Kohser & Black, 2002).

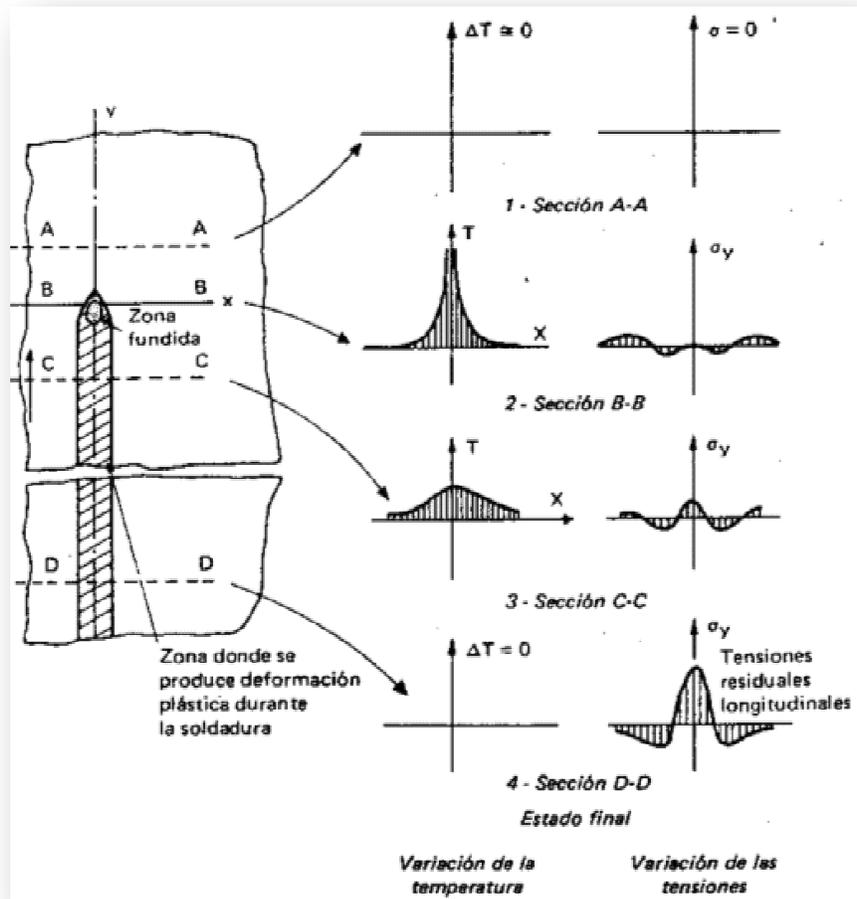


Figura 2.4.- Estados transitorios y finales durante la soldadura. (Metal Universe. Publicación de Metal Univers (Nº 38). España: Nova Àgora, S. 2006).

El método de Masubushi presenta la siguiente ecuación para la determinación de los esfuerzos residuales:

$$\sigma_{res} = S y_0 - S y_{sold} \quad (2.5)$$

En donde:

σ_{res} = Esfuerzo residual en el punto de medición (MPa).

$S y_{sold}$ = Límite de fluencia en el punto de medición del material soldado (MPa).

$S y_0$ = Límite de fluencia del acero ASTM A36 sin ser soldado (MPa).

2.4 Tratamientos térmicos

Los tratamientos térmicos son la operación de calentamiento y enfriamiento de un metal en su estado sólido para cambiar sus propiedades físicas. Con un tratamiento térmico adecuado se pueden reducir los esfuerzos internos, el tamaño del grano, incrementar la tenacidad o producir una superficie dura con un interior dúctil. Existe la posibilidad de combinar dos o más tratamientos térmicos para lograr optimizar la estructura del material para así eliminar sus esfuerzos internos o conseguir propiedades deseadas mecánicas.

Para conocer a que temperatura debe elevarse el metal para que se reciba un tratamiento térmico es recomendable contar con los diagramas de cambio de fases como el de hierro - carbono. En este tipo de diagramas se especifican las temperaturas en las que suceden los cambios de fase (cambios de estructura cristalina), dependiendo de los materiales diluidos.

Los tratamientos térmicos han adquirido gran importancia en la industria en general, ya que con las constantes innovaciones se van requiriendo metales con mayores resistencias tanto al desgaste como a la tensión. Entre los principales tipos de tratamientos térmicos, se encuentran los siguientes:

- **Templado:** Para endurecer un acero de medio o alto carbono, la pieza se calienta por encima de su temperatura crítica (unos 760°C), se deja durante algún tiempo que la temperatura se equilibre, y en seguida se enfría súbitamente hasta la temperatura ambiente mediante su inmersión en agua o aceite. El enfriamiento rápido genera una solución supersaturada de hierro y carbono que se conoce como martensita, que es extremadamente dura y mucho más resistente que el material blando original. Lo malo es que también es muy frágil.
- **Revenido:** Después del templado, la misma pieza se puede recalentar hasta una temperatura inferior (de 200-700°C), inmersa en calor y dejando que se enfríe lentamente. Esto hará que parte de la martensita se convierta en ferrita y cementita, que reduce un poco la resistencia, pero restableciendo poco la ductilidad. Es posible una gran flexibilidad en función de la adecuación de la combinación resultante de propiedades al variar el tiempo y la temperatura del proceso de revenido.
- **Recocido:** Los procesos de templado y revenido son reversibles mediante el recocido. La pieza se calienta por encima de su temperatura crítica (igual que en el caso del templado), sólo que ahora se deja que se enfríe lentamente hasta la temperatura ambiente. Esto restablece el estado de solución y las propiedades mecánicas de una aleación no endurecida. Se aplica recocido incluso cuando no haya habido endurecimiento anterior, a fin de eliminar cualquier esfuerzo y deformación residual introducido por fuerzas aplicadas al conformar la pieza. Así se pone a la pieza de vuelta a un estado “relajado” y blando, restableciendo su curva de esfuerzo-deformación original.
- **Normalizado:** La normalización es similar al recocido, pero implica tiempos de inmersión en calor a temperaturas elevadas más breves y una mayor rapidez de enfriamiento. El resultado es un acero más

resistente y duro que uno totalmente recocido, pero más cerca del estado recocido que de cualquier estado revenido (Norton, 1999).

2.5 Cargas por fatiga

Cualquier carga que varíe con el tiempo puede causar falla por fatiga. El carácter de estas cargas llega a variar de manera importante de una a otra aplicación. En maquinaria rotativa, las cargas tienden a ser de amplitud uniforme a lo largo del tiempo y a repetirse con alguna frecuencia. En equipo de servicio (vehículos de todo tipo), las cargas tienden a ser, a lo largo del tiempo, bastante variables en amplitud y frecuencia e incluso pueden ser de naturaleza aleatoria. En ausencia de corrosión la forma de onda de la función carga-tiempo no parece tener ningún efecto significativo en la falla por fatiga, por lo que suele ilustrar esquemáticamente la función como una onda senoidal o en diente de sierra. Además, la presencia o ausencia de períodos de reposo en el historial de la carga no tiene significación cuando el entorno no es corrosivo (Norton, 1999).

Para determinar la carga a aplicar en los ensayos de fatiga se parte de la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{C * M}{I} \quad (2.6)$$

Siendo:

Para una barra de sección circular:

$$I = \frac{\pi * D^4}{64} \quad (2.7)$$

σ : Esfuerzo a flexión

C: Distancia desde el eje de carga hasta el eje de la probeta. (C=D/2)

M: Momento flector

I: Momento polar de inercia

D: Diámetro de la probeta

Sustituyendo y redondeando se obtiene:

$$M = \frac{\sigma * I}{C} = \frac{\sigma \left(\frac{\pi D^4}{64} \right)}{\frac{D}{2}} = \frac{\pi * \sigma * D^3}{32} \rightarrow F * I = \frac{\sigma * D^3}{10,18} \rightarrow F = \frac{\sigma * D^3}{10,18 * I}$$

Donde: (2.8)

I: Longitud de la probeta que va a estar sometida a flexión.

2.6 Mecanismo de las fallas por fatiga

Hay tres etapas de falla por fatiga:

- **Etapas de iniciación de las grietas:** Suponiendo que el material es un metal dúctil que al ser fabricado, no tenía grietas, pero tiene la colección normal de partículas, inclusiones, etcétera, comunes en materiales de ingeniería. A escala microscópica, los metales no son homogéneos ni isotrópicos. Suponiendo además, que hay algunas partes de concentración geométrica de esfuerzos en localizaciones de esfuerzo significativo variando con el tiempo, que contienen un componente a tensión. Como los esfuerzos en la muesca oscilan, puede ocurrir fluencia plástica local debido a concentración de esfuerzo, aun cuando el esfuerzo nominal en la sección esté muy por debajo del límite elástico del material. La fluencia plástica local causa distorsión, creando bandas de deslizamiento, las que forman grietas microscópicas. Aun en ausencia de muescas este mecanismo sigue funcionando, siempre que en alguna parte del material se haya excedido el límite elástico. Los huecos o inclusiones preexistentes servirán como elevadores de esfuerzo para iniciación de la grieta.

- **Etapa de propagación de las grietas:** Una vez establecida una microgrieta (o si está presente desde el inicio), se hacen operables los mecanismos de la mecánica de fracturas. La grieta aguda crea concentraciones de esfuerzos superiores a los de la muesca original, lo que provoca una zona plástica en el extremo de la grieta cada vez que el esfuerzo a tensión la abre, lo que achata su extremo y reduce la concentración efectiva de esfuerzos. La grieta crece un poco. Cuando el esfuerzo se alterna desde un régimen de esfuerzo a compresión hasta cero o hasta un esfuerzo de tensión lo bastante inferior, la grieta se cierra, la fluencia plástica cesa momentáneamente y de nuevo la grieta se vuelve aguda, aunque con una dimensión mayor. Este proceso continúa en tanto el esfuerzo local en la punta de la grieta este alternando desde por debajo del punto de fluencia a tensión, hasta por encima.
- **Fractura:** La grieta continuará creciendo en cuanto estén presentes esfuerzos cíclicos a tensión. Llegado algún momento, el tamaño de la grieta se hace lo bastante grande como para elevar el factor de intensidad de esfuerzo, en el extremo de la grieta al nivel de la tenacidad a la fractura del material, y en el siguiente ciclo de esfuerzo a tensión ocurre al instante la falla súbita (Hashemi & Smith, 2004).

2.8 Diagrama S-N

La resistencia a fatiga de un material se expresa por medio de la curva de fatiga que expresa el número de ciclos que se requieren para producir el fallo con distintos niveles de esfuerzos cíclicos (ver figura 2.3).

La curva de fatiga se obtiene mediante ensayos, ya sea sobre probetas o sobre componentes completos. Debido a la naturaleza estocástica de la resistencia a fatiga los resultados presentan una gran dispersión y es necesario un gran número de ensayos a los que se debe hacer un tratamiento de tipo estadístico hasta obtener una curva de fatiga del material utilizable en diseño.

De los resultados de numerosos ensayos a fatiga se puede ver que la curva S-N o curva de Wohler presenta una forma característica, prácticamente horizontal para muy pequeños y para muy grandes valores de N y con un punto de inflexión a algunos miles de ciclos.

- Para poderse utilizar apropiadamente un gráfico S-N del material, en este deben aparecer todos los factores significativos de realización del ensayo a fatiga, tales como esfuerzo medio, espécimen con entalla o no, forma de aplicación de la carga, condiciones superficiales del espécimen, procesos de fabricación, tratamiento superficial, entre otros (Hashemi & Smith, 2004).

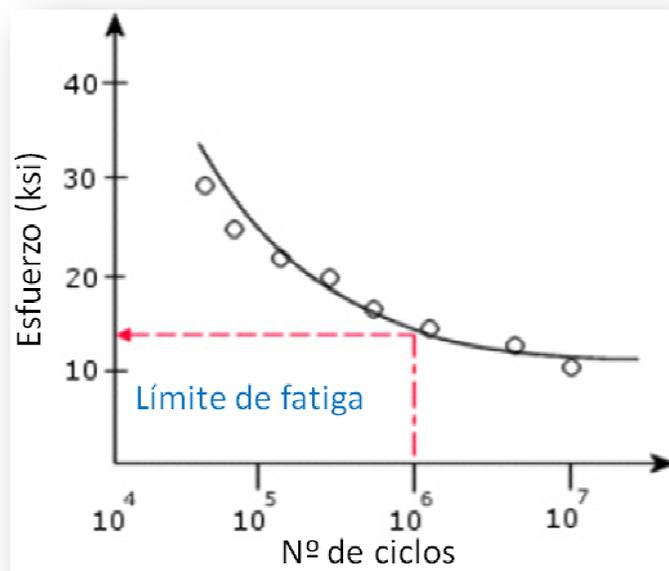


Figura 2.5. Ejemplo de un diagrama S-N

Fuente: Ingeniería LTDA. Enero 2005. < <http://www.cad-cae.com/images2/022.jpg> >

2.9 Definición de 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.

2.9.1 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 afeitar 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 ecuación 2.9

$$HB = 1,8544 \frac{P}{d} \quad (2.9)$$

P: carga aplicada en N

d: Diagonal media de la huella en mm. (ver ecuación 2.10)

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (2.10)$$

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 Kg.

2.9.2 Correlación entre el esfuerzo de fluencia y esfuerzo ultimo con la dureza en los aceros al carbono

Éste es un método para el cálculo del esfuerzo de fluencia y esfuerzo último en aceros al carbono. A través ensayos de experimentación, 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. La relación matemática

entre estas dos propiedades se obtiene mediante el método de linealización de curvas por el método de los mínimos cuadrados, la ecuación que resulta 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, esta ecuación es válida para todo los tipos de aceros estudiados que estén en un rango de dureza Vickers entre 129-632 Hv. (Pavlina y Van Tyne, 2008).

$$S_y = -90,7 + 2,876 * HV \quad (2.11)$$

CAPÍTULO 3

MARCO METODOLÓGICO

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.

3.1 Metodología de la investigación

La metodología seguida en el presente trabajo de investigación es de tipo experimental, donde los ensayos se basan en probetas de acero AISI 1018 soldadas a tope mediante soldadura de arco con electrodo revestido (SMAW), las cuales poseen unas dimensiones que corresponden con lo establecido por la norma ASTM E-466-96 para ensayos de fatiga.

Lo que se obtuvo en esta investigación es la influencia de la velocidad de enfriamiento en los esfuerzos residuales en soldaduras a tope sometidas a condiciones de fatiga mecánica.

3.2 Diseño de la investigación

El estudio propuesto determinó la relación existente entre las probetas soldadas y enfriadas a distintas velocidades con las probetas soldadas con regeneración por recocido y las probetas sin soldar, sometidas a condiciones de fatiga mecánica.

La selección y diseño de la probeta se realizó de acuerdo a la norma ASTM E-466-96 y a las especificaciones de la máquina de ensayos de fatiga disponible en el laboratorio de térmica de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo.

La soldadura fue realizada con electrodo 6013 de diámetro 3/32 bajo el procedimiento de soldadura con arco revestido, ya que este tipo de electrodo es el más comercial y recomendado para la mayoría de las aplicaciones de soldadura en uniones de acero al carbono, así como para aplicaciones de soldadura en todas las posiciones, la cual se distingue por la buena penetración que es producida por la alta potencia del arco, siendo esto último de gran importancia debido a las condiciones bajo las cuales las probetas son soldadas.

Se utilizó una intensidad de corriente de 100 A para el proceso de soldadura, esta intensidad fue asignada con el valor máximo según el catálogo de electrodos revestidos GRI-TEC de LINCOLN ELECTRIC.

3.3 Población y muestra

El acero AISI 1018 representó la población estudiada para la investigación, mientras que la muestra fue conformada por un total de ciento veinte (120) probetas, las cuales se identificaron como grupo A, B, C, D y E, cada grupo constituido por veinticuatro (24) probetas.

Los ensayos de fatiga se realizaron para cada grupo de probetas con distintos tipos de especificaciones como se muestra a continuación:

- Grupo A: Probetas mecanizadas del material original.

- Grupo B: Probetas soldadas, mecanizadas y con regeneración por recocido.
- Grupo C: Probetas mecanizadas y con soldadura enfriada a aire tranquilo a temperatura ambiente.
- Grupo D: Probetas mecanizadas y con soldadura enfriada a aire temperatura ambiente con una velocidad de 3,1 m/s.
- Grupo E: Probetas mecanizadas y con soldadura enfriada a aire temperatura ambiente con una velocidad de 4,8 m/s.

La estrategia utilizada para dar soluciones a la problemática existente en cuanto a la acumulación de los esfuerzos residuales en piezas soldadas a tope se explica a continuación.

3.4 Estimación experimental de los esfuerzos residuales

Para determinar los esfuerzos residuales experimentalmente se realizó la siguiente metodología:

3.4.1. Selección del material para las probetas.

Las probetas se realizaron en acero AISI 1018, ya seleccionado anteriormente como material sometido a estudio ya que dicho acero es fácilmente soldable y maquinable lo cual favorece el estudio de esta investigación.

Las propiedades mecánicas y la composición química (ver tabla 3.1) del acero AISI 1018 estirado en frío son las siguientes:

Propiedades mecánicas:

- Dureza 126 HB (71 HRb).
- Esfuerzo de fluencia 391,03 MPa.
- Esfuerzo máximo 542,30 MPa.
- Elongación máxima 30%.
- Reducción de área 62%.
- Módulo de elasticidad 205 GPa.
- Maquinabilidad 76% (AISI 1212 = 100%).

Fuente certificado de calidad otorgado por la empresa Industrias Aramendi S.L (ver apéndice A).

Composición química:

Tabla 3.1 Composición química del acero AISI 1018

Componente	C	Si	Mn	P	S
%	0.170	0.163	0.711	0.008	0.015

[Fuente certificado de calidad otorgado por la empresa Industrias Aramendi S.L]

3.4.2 Adquisición del material.

El acero AISI 1018 fue adquirido en la empresa SUMINDU S.A. en forma de barras cilíndricas de dimensiones de 25,4 mm de diámetro x 6.000 mm de longitud, que a su vez fue obtenido por la misma de la empresa Industrias Aramendi S.L, ubicada en España donde fueron realizados los procesos de colada del acero y el estiramiento en frío del mismo hasta las dimensiones anteriormente señaladas.

3.4.3 Determinación experimental de las propiedades mecánicas del acero AISI 1018

Para poder llevar a cabo la presente investigación fue necesario saber el valor del esfuerzo máximo del material, para ello se realizó un ensayo de tracción en donde las dimensiones y demás características de la probeta son regidas por la norma ASTM A-370. También se determinó el esfuerzo de fluencia ya que es un valor necesario para obtener los valores de los esfuerzos para el ensayo de fatiga. Se tomó tres (3) muestras, debido a que es la mínima cantidad que exige la norma para garantizar la validez del ensayo.

El ensayo de tracción se realizó en el laboratorio de materiales de la Universidad de Carabobo, utilizando la máquina G.U.N.T WP300 con capacidad de 20 kN, siguiendo el procedimiento que se encuentra en el laboratorio.

3.4.4 Realización de la Probeta.

El mecanizado de la probeta, como lo sugiere la norma ASTM E-466-96, se realizó bajo un mismo proceso, ya que si se realiza por procedimientos distintos puede influir en los resultados.

Para el proceso de mecanizado se tomó en cuenta lo siguiente:

- Las superficies de las probetas deben estar muy bien alineadas.
- La superficie debe estar libre de ralladuras o grietas que aumenten la posibilidad de falla fuera de la región de estudio.

En resumen, la realización de la probeta se basó en los siguientes pasos:

1. Realizar el cilindrado y mecanizado de la probeta según las dimensiones y forma especificadas (ver anexo I).
2. Cortar la probeta en la zona de estudio.
3. Realizar el bisel (ver anexo I).
4. Soldar la probeta en posición horizontal.

5. Enfriar la soldadura según su especificación.
6. Mecanizar la longitud que contiene el diámetro en estudio para llevarlo a las dimensiones correspondientes.

Los cálculos necesarios para realizar el mecanizado de la probeta (ver figura 3.1.) se encuentran en el anexo II.

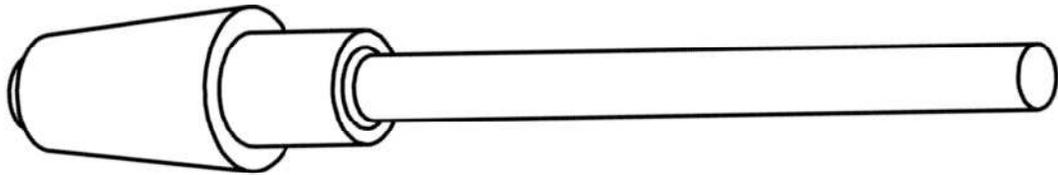


Figura 3.1. Figura de la probeta

Después que se realizaron las cinco primeras operaciones se obtiene la probeta soldada (ver figura 3.2.), a la cual se le realizó las dos últimas operaciones de mecanizado para obtener la probeta totalmente mecanizada (ver figura 3.3.).



Figura 3.2. Foto de la probeta soldada antes del mecanizado final

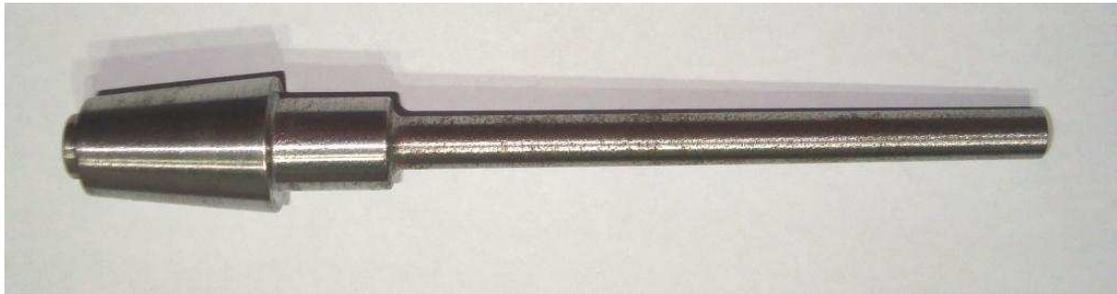


Figura 3.3 Foto de la probeta soldada y totalmente mecanizada

3.4.5 Tratamiento térmico de las probetas del grupo B.

El tratamiento térmico realizado a las probetas pertenecientes al grupo B es un recocido subcrítico, se realizó con el propósito de aliviar las tensiones residuales producto del proceso de soldadura de arco con electrodo revestido (SMAW). Este recocido se diferencia del recocido total, tal que el acero es llevado a temperaturas próximas pero inferiores a la línea A1 del diagrama hierro – carbono (ver figura 3.4). En este caso el acero posee 0,17% C y la temperatura crítica de la línea A1 es de 727 °C, por lo que se realizó el recocido a 680 °C, por un tiempo aproximado a un (1) minuto por milímetro de espesor de la probeta, al culminar dicho tiempo se apagó el horno y se dejó enfriar dentro de este (ver figura 3.5 y figura 3.5).

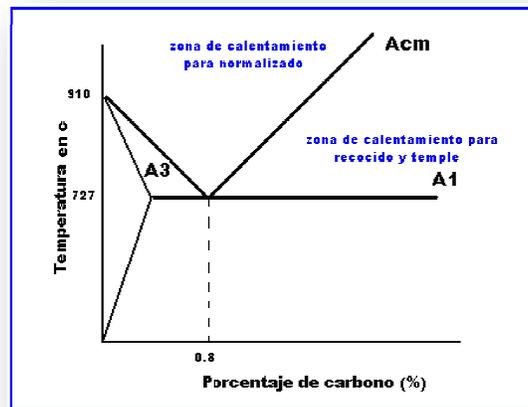


Figura 3.4 Diagrama Hierro – Carbono del acero (Pere Molera Sola 1991. Tratamientos térmicos de los metales. Pág. 15).



Figura 3.5 Horno para recocido a 680 °C



Figura 3.5 Foto de la probeta sometida al tratamiento térmico.

3.4.6 Preparación de la probeta para ensayo de microdureza Vickers

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

La preparación de la superficie comenzó 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 procedió a pulir la superficie con la ayuda de una pasta abrasiva colocada sobre un paño de algodón, con lo que finalmente se logró tener una superficie adecuada para el ensayo de microdureza.

3.4.7 Medición de microdureza Vickers

Se midió la dureza en diferentes zonas de la probeta con el fin de determinar su variación a lo largo de la superficie. Se utilizaron dos probetas de cada grupo (Grupos C, D y E) en la cual se tomaron dieciséis (16) puntos por cada probeta con una separación mínima de 2 mm entre punto y punto partiendo de la zona afectada por la soldadura y para el grupo A se le realizaron dieciséis (16) indentaciones a cada una de las dos probetas en cuatro zonas, con una distancia de diez (10) milímetros por zona.

Con los valores medidos se estudió el comportamiento de la dureza de las probetas original y la dureza de las probetas soldadas a medida que se va alejando del cordón de soldadura para cada grupo de probetas. Dichas mediciones se realizaron con un micro durómetro marca Buehler disponible en el Laboratorio de Materiales de la Universidad de Carabobo.

Se marcaron los puntos donde se midió la dureza en las ocho (8) probetas y se procedió a realizar las mediciones. Se realizaron mediciones de microdureza Vickers a dos probetas sin soldar de acero AISI 1018 para conocer la dureza inicial del material lo cual sirvió como referencia del material base. Se continuó midiendo la dureza superficial de las seis (6) probetas soldadas restantes en los dieciséis (16) puntos ya determinados, donde se obtuvieron dieciséis (16) indentaciones por cada grupo de probeta.

El ensayo se realizó con un indentador piramidal de base cuadrada, sometiendo al material de ensayo a una carga sostenida de 100 g durante 5 s, después de verificar que la huella tenía la apariencia correcta se prosiguió a tomar las medidas en los puntos antes mencionados.

3.4.8 Obtención de los esfuerzos residuales mediante el método de Masubushi a partir de ensayos de dureza Vickers

Haciendo referencia a lo expuesto por Masubushi K. se obtuvieron los esfuerzos residuales en las diferentes zonas de la probeta, tomando en cuenta que el mismo se define como el agregado luego de un proceso de soldadura, para esto se utilizó la ecuación 2.5.

Para obtener Sy_0 y Sy_{sold} , se realizaron mediciones de dureza en el material sin ser sometido al proceso de soldadura y mediciones de dureza en el material sometido al proceso de soldadura, según lo explicado en la sección 3.4.6; ciertamente el acero AISI 1018 cumple con la dureza Vickers para el uso de la ecuación (2.4) en la sección 2.9.2, se procedió a determinar el límite de fluencia del material de trabajo por medio de la dureza mediante la ecuación (2.4).

3.5 Determinación de la influencia de la velocidad de enfriamiento

Para determinar la relación entre las probetas soldadas y endriadas a distintas velocidades con las probetas soldadas y con regeneración por recocido se realizó la siguiente metodología:

3.5.1 Ensayo de fatiga.

Para el ensayo de fatiga se utilizaron cuatro (4) niveles de esfuerzos según el método de la escalera, los cuales son 50, 60, 70, y 80% del esfuerzo de fluencia del material, donde la fuerza para cada uno de estos niveles se determinó a partir de la ecuación 2.8 obtenida sustituyendo la ecuación 2.7 en la ecuación 2.6.

Entonces a partir de la ecuación 2.8 se obtuvo el valor de la fuerza para cada uno de los ensayos, y los mismos se realizaron bajo la siguiente metodología:

1. Observar que el indicador de fuerza este en cero (0), de lo contrario se debe girar el tornillo de presión hasta que la regleta indique este valor, esto es para que el orificio del aplicador de la fuerza este alineado con el eje de transmisión.



Figura 3.6 Indicador de fuerza

2. Desenroscar la mordaza que se encuentra en el eje de transmisión para introducir en ella un extremo de la probeta.



Figura 3.7 Mordaza desenroscada de la máquina de fatiga

3. Colocar el otro extremo de la probeta dentro del orificio del aplicador de fuerza.

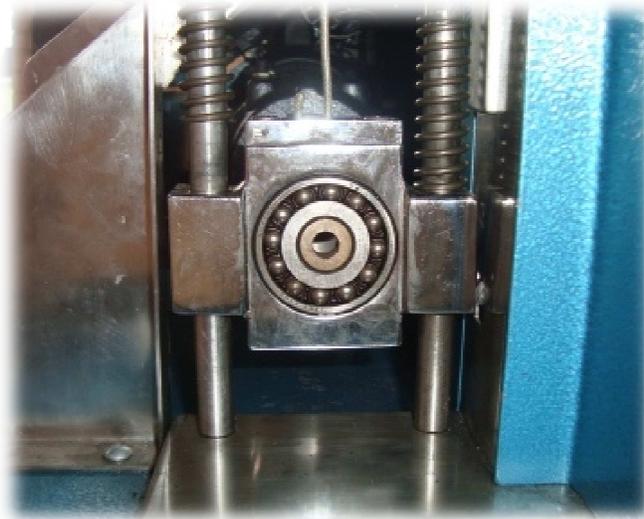


Figura 3.8 Sistema aplicador de fuerza

4. Una vez ajustada la probeta a ambos elementos, realizar el apriete de la mordaza a la rosca del eje de transmisión.



Figura 3.9 Probeta ajustada en la máquina de fatiga

5. Indicar el valor de la carga a la máquina haciendo girar el mecanismo de aplicador de fuerza.
6. Verificar que la rejilla de seguridad este cerrada y que el pulsador de parada este desactivado.



Figura 3.10 Rejilla de seguridad cerrada

7. Colocar en cero (0) el contador de ciclos.
8. Encender la máquina.
9. Dar inicio al ensayo mediante la pulsación del botón de arranque.



Figura 3.11 Tablero de control de la máquina de fatiga

10. Una vez que la probeta falle y el motor se apague, se debe proceder a abrir la rejilla de seguridad.
11. Retirar la probeta del eje de transmisión, siguiendo el procedimiento inverso realizado para su instalación.
12. Al finalizar los ensayos se debe quitar el suministro de energía a la máquina.

Cada uno de los resultados que se obtuvieron, fueron tabulados de acuerdo a la norma ASTM E-468, indicando la identificación de la probeta, relación de esfuerzos, vida a la fatiga o ciclo hasta que culminó el ensayo, causa de la culminación del ensayo y observación acerca del análisis post ensayo de la probeta.

3.6 Realización de las curvas S - N

Una vez culminados los ensayos, los resultados se representaron a través de curvas S – N. De acuerdo con la norma ASTM E 739-91 se utilizaron 6 probetas para cada nivel de esfuerzo.

Entonces la distribución de probetas para cada uno de los ensayos se representó en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Distribución de las probetas para los ensayos

Esfuerzo aplicado (Mpa)	Cantidad de Probetas				
	Grupo A	Grupo B	Grupo C	Grupo D	Grupo E
50% σ_f	6	6	6	6	6
60% σ_f	6	6	6	6	6
70% σ_f	6	6	6	6	6
80% σ_f	6	6	6	6	6

3.7 Validación y procesamiento de datos.

Con los valores obtenidos de esfuerzos residuales mediante el método de Masubushi a partir de ensayos de dureza Vickers y los ensayos de fatiga para cada uno de los grupos de probeta, se evaluó la influencia de la velocidad de enfriamiento en los esfuerzos residuales en soldaduras a tope del acero AISI 1018 en probetas de sección transversal circular sometidas a condiciones de fatiga mecánica.

Finalmente se compararon los resultados obtenidos en probetas con esfuerzos residuales producidos por la velocidad de enfriamiento de la soldadura con los obtenidos en probetas regeneradas y en las probetas con el material original efectuando los análisis, conclusiones y recomendaciones de la investigación.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS EXPERIMENTALES

A continuación se muestran los resultados obtenidos luego de la realización de los ensayos descritos en el capítulo anterior.

4.1 Propiedades iniciales del material

El material base considerado para este trabajo de investigación es acero ordinario estirado en frío, con una composición química denotada por la ASTM como AISI 1018, el cual es de bajo contenido de carbono, en donde sólo se requiere una resistencia moderada junto con una plasticidad considerable.

Se realizaron ensayos de tracción al material base según lo recomendado por la norma ASTM A-370, pudiéndose obtener de esta manera las propiedades mecánicas del material necesarias para la realización de los ensayos de fatiga, dichas propiedades se encuentran reflejadas en la tabla 4.1

Tabla 4.1 Propiedades mecánicas del acero AISI 1018

Propiedad Mecánica	Esfuerzo (MPa)
Esfuerzo de fluencia (S_y)	425
Esfuerzo último (S_u)	350
Esfuerzo máximo (S_{max})	510

A continuación se muestra la curva Esfuerzo vs Deformación (ver figura 4.1) obtenida de los ensayos de tracción, en la cual se encuentran representados los valores anteriormente mencionados.

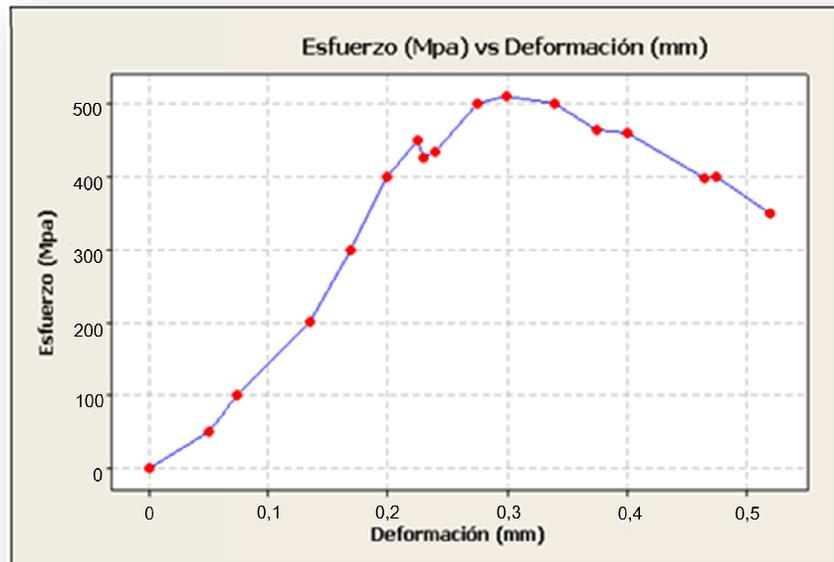


Figura 4.1 Curva Esfuerzo vs Deformación

4.2 Cálculo de la dureza mediante el ensayo de microdureza superficial.

En la tabla 4.2 se exponen los resultados promedio de microdureza de las probetas pertenecientes a los grupos C, D y E las cuales fueron soldadas y enfriadas a distintas velocidades según lo expuesto en la sección 3.3, en cuanto grupo A, el cual representa las propiedades originales del material, el valor promedio resultante de las dos probetas fue 132,43 HV.

Tabla 4.2 Datos promedios de Microdureza Vickers de la probeta soldadas

Distancia (mm)	Grupo C	Grupo D	Grupo E
2	125,85	118,47	113,61
4	128,52	125,32	123,03
6	148,01	170,06	178,47
8	143,97	168,65	173,98

Los resultados promedios de microdureza Vickers se representaron gráficamente (ver figura 4.2)

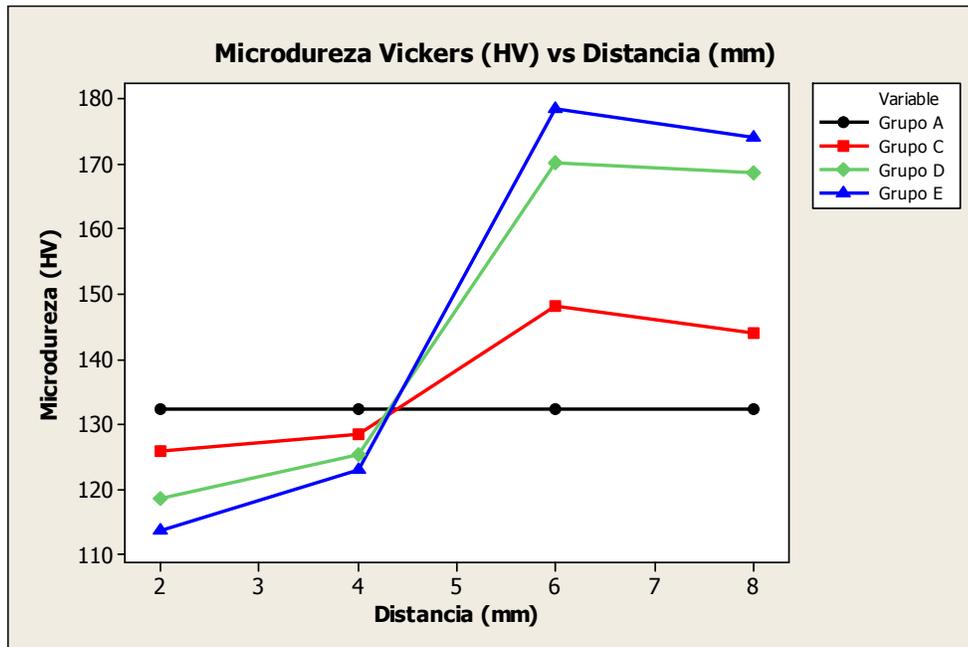


Figura 4.2 Curva Microdureza Vickers Vs distancia con respecto a la soldadura.

4.3 Cálculo experimental del límite de fluencia

Se procedió a determinar el límite de fluencia de las probetas de trabajo por medio de la dureza del material obtenidas anteriormente, se calculó mediante la relación lineal, resultado de los mínimos cuadrados, los cuales permiten relacionar por medio de la dureza del material en estudio a una

relación de regresión lineal, la relación lineal que asocia la dureza del acero AISI 1018 por el rango de dureza se obtiene con la ecuación 2.11

Si se sustituye la dureza del material da como resultado:

$$S_{y_0} = 290,17 \text{ MPa}$$

De la misma manera se procedió a calcular el límite de fluencia del material en cada probeta bajo la condición en estudio, los resultados se muestran en la tabla 4.3

Tabla 4.3 Esfuerzos de fluencia de cada grupo de probetas
Esfuerzos de fluencia (MPa)

Distancia (mm)	Grupo C	Grupo D	Grupo E
2	271,24	250,02	234,29
4	278,92	269,72	263,13
6	334,98	398,39	422,58
8	323,35	394,34	409,67

4.4 Cálculo de esfuerzos residuales superficiales mediante el método de Masubushi

Los esfuerzos residuales superficiales se obtuvieron mediante la ecuación 2.5, a continuación se muestran los esfuerzos residuales obtenidos en cada grupo de probetas con respecto a la distancia del cordón de soldadura. (Ver tabla 4.4).

Tabla 4.4 Esfuerzos residuales de cada grupo de probetas
Esfuerzo residual (MPa)

Distancia (mm)	Grupo C	Grupo D	Grupo E
2	18,93	40,15	55,88
4	11,07	20,45	27,04
6	-44,81	-108,22	-132,41
8	-33,18	-104,17	-119,5

Los valores obtenidos de esfuerzos residuales de cada grupo de probetas fueron representados gráficamente en la figura 4.3, en donde el grupo A se visualiza como línea recta en cero debido a que representa el material original sin ningún esfuerzo residual, ya que no ha pasado por el proceso de soldadura.

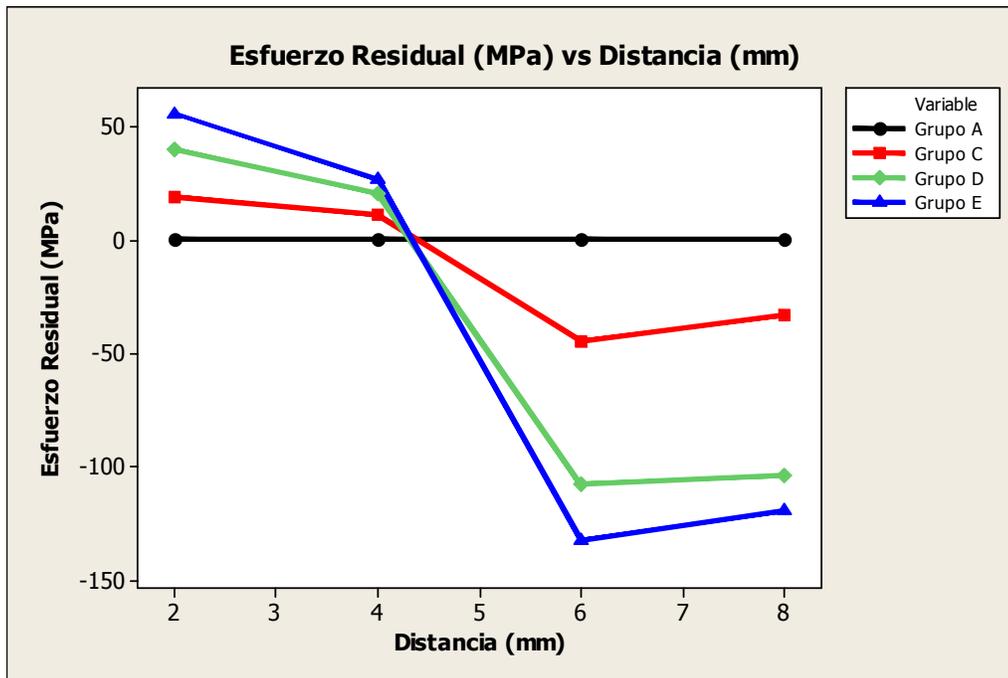


Figura 4.3 Curva Esfuerzo Residual vs Distancia del cordón de soldadura

4.5 Determinación de la fuerza aplicada a cada ensayo

De acuerdo al procedimiento establecido en la metodología, se realizan los ensayos de fatiga a las probetas de cada grupo con sus respectivas especificaciones, sometidas a una velocidad de giro de 3.600 rpm, también considerando que si alguna probeta durante el ensayo llegase a superar el millón (1.000.000) de ciclos se considerara vida infinita, pero este caso nunca ocurrió.

Para realizar los ensayos de fatiga, se determina el valor de la fuerza que se aplica para cada estado de esfuerzo, el cual se obtiene con la ecuación III.2, que está en función del esfuerzo, el diámetro y la longitud de prueba.

A continuación se presenta un cálculo tipo para el primer nivel de esfuerzo (50% σ_f) utilizando la ecuación 2.8:

$$F = \frac{\sigma * D^3}{10,18 * L} \quad (2.8)$$

Donde:

$$D^3 = (8mm)^3 = 512mm^3$$

$$L = 117mm$$

$$\sigma_f = 425 MPa \rightarrow 50\% \sigma_f = 212,5MPa$$

Entonces:

$$F = \frac{212.5N/mm^2 * 512mm^3}{10,18 * 117mm} \sim 90N$$

Seguidamente se presenta un cuadro resumen con los valores de las fuerzas aplicadas para cada nivel de esfuerzo.

Tabla 4.5 Fuerza aplicada a las probetas en el ensayo de fatiga

Nivel de Esfuerzo	Esfuerzo aplicado (MPa)	Fuerza aplicada (N)
50% σ_f	212,5	90
60% σ_f	255	110
70% σ_f	297,5	130
80% σ_f	340	150

Los valores de los resultados obtenidos de los ensayos de flexión rotativa para cada grupo de probetas se muestran a continuación en tablas resumen.

Tabla 4.6 Valores de los ensayos de fatiga a probetas mecanizadas sin soldar



Escuela de Ingeniería Mecánica UC

Material

Acero AISI 1018

Velocidad de giro

3.600 rpm

Nº de probeta	Fuerza (N)	Nº de ciclos
1	90	76.221
2	90	65.122
3	90	73.988
4	90	77.511
5	90	37.067
6	90	50.131
7	110	44.134
8	110	47.178
9	110	25.324
10	110	41.710
11	110	64.138
12	110	27.913
13	130	34.137
14	130	18.408
15	130	14.286
16	130	34.349
17	130	43.411
18	130	22.808
19	150	12.530
20	150	6.198
21	150	21.417
22	150	5.810
23	150	8.414
24	150	8.520

Tabla 4.7 Valores de los ensayos de fatiga a probetas soldadas con regeneración por recocido

	Escuela de Ingeniería Mecánica UC	
	Material	Acero AISI 1018
	Velocidad de giro	3.600 rpm
	Nº de probeta	Nº de ciclos
	Esfuerzo (N)	

1	90	70.041
2	90	58.123
3	90	30.475
4	90	82.026
5	90	52.526
6	90	63.420
7	110	18.754
8	110	19.655
9	110	20.740
10	110	25.214
11	110	17.340
12	110	18.727
13	130	18.081
14	130	5.111
15	130	3.652
16	130	10.197
17	130	9.978
18	130	8.940
19	150	3.610
20	150	5.014
21	150	5.179
22	150	3.908
23	150	4.024
24	150	4.890

Tabla 4.8 Valores de los ensayos de fatiga a probetas soldadas y enfriadas a aire tranquilo

 N° de probeta	Escuela de Ingeniería Mecánica UC Material Acero AISI 1018 Velocidad de giro 3.600 rpm	
	Esfuerzo (N)	N° de ciclos
1	90	20.074
2	90	18.789

3	90	22.053
4	90	20.066
5	90	15.221
6	90	25.754
7	110	14.754
8	110	13.655
9	110	20.740
10	110	15.214
11	110	14.340
12	110	18.727
13	130	6.614
14	130	5.023
15	130	5.221
16	130	5.353
17	130	6.918
18	130	7.516
19	150	1.927
20	150	3.516
21	150	2.252
22	150	1.201
23	150	1.724
24	150	2.453

Tabla 4.9 Valores de los ensayos de fatiga a probetas soldadas y enfriadas con una velocidad de 3,1 m/s

	Escuela de Ingeniería Mecánica UC	
	Material	Acero AISI 1018
	Velocidad de giro	3.600 rpm
Nº de probeta	Esfuerzo (N)	Nº de ciclos
1	90	18.542
2	90	19.885
3	90	16.904
4	90	17.753

5	90	18.598
6	90	17.965
7	110	7.943
8	110	6.986
9	110	7.523
10	110	6.238
11	110	7.012
12	110	5.988
13	130	3.752
14	130	2.986
15	130	3.263
16	130	2.760
17	130	2.150
18	130	3.231
19	150	2.944
20	150	1.450
21	150	1.675
22	150	1.289
23	150	1.857
24	150	1.367

Tabla 4.10 Valores de los ensayos de fatiga a probetas soldadas y enfriadas con una velocidad de 4,8 m/s

	Escuela de Ingeniería Mecánica UC	
	Material	Acero AISI 1018
Nº de probeta	Velocidad de giro	3.600 rpm
	Esfuerzo (N)	Nº de ciclos
1	90	14.876
2	90	17.234
3	90	19.200
4	90	14.654
5	90	16.000
6	90	18.720

7	110	4.554
8	110	4.483
9	110	4.675
10	110	5.933
11	110	5.085
12	110	4.723
13	130	1.740
14	130	1.529
15	130	1.372
16	130	1.755
17	130	2.430
18	130	1.678
19	150	690
20	150	1.373
21	150	517
22	150	739
23	150	588
24	150	840

Para cada grupo de probetas se determina el promedio de ciclos de vida para cada nivel de esfuerzos, con el fin de representar en un solo valor los ciclos para cada uno de los esfuerzos de cada grupo de probetas, y de esta manera representarlos en curvas esfuerzo – ciclos de vida (S-N).

Tabla 4.11 Valores promedios para probetas sin soldar

	Escuela de Ingeniería Mecánica UC	
	Material	Acero AISI 1018
	Velocidad de giro	3.600 rpm
	Fuerza Aplicada (N)	Nº de ciclos
	90	63.340
	110	35.116
	130	27.900

150

10.482

Tabla 4.12 Valores promedios para probetas soldadas y con regeneración por recocido

Escuela de Ingeniería Mecánica UC	
Material	Acero AISI 1018
Velocidad de giro	3.600 rpm
Fuerza Aplicada (N)	Nº de ciclos
90	59.435
110	20.072
130	9.327
150	4.438

Tabla 4.13 Valores promedios para probetas soldadas y enfriadas a aire tranquilo

Escuela de Ingeniería Mecánica UC	
Material	Acero AISI 1018
Velocidad de giro	3.600 rpm
Fuerza Aplicada (N)	Nº de ciclos
90	20.326
110	16.238
130	6.108
150	2.179

Tabla 4.14 Valores promedios para probetas soldadas y enfriadas a una velocidad de aire de 3,1 m/s

Escuela de Ingeniería Mecánica UC	
Material	Acero AISI 1018
Velocidad de giro	3.600 rpm
Fuerza Aplicada (N)	Nº de ciclos

90	18.275
110	6.948
130	3.024
150	1.764

Tabla 4.15 Valores promedios para probetas soldadas y enfriadas a una velocidad de aire de 4,8 m/s



Escuela de Ingeniería Mecánica UC

Material

Acero AISI 1018

Velocidad de giro

3.600 rpm

Fuerza Aplicada (N)

Nº de ciclos

90	16.781
110	4.909
130	1.751
150	791

Una vez establecidos los valores promedios para cada uno de los ensayos, se procede a construir las curvas S-N para que por medio de ellas se pueda comparar el comportamiento según su especificación de enfriamiento.

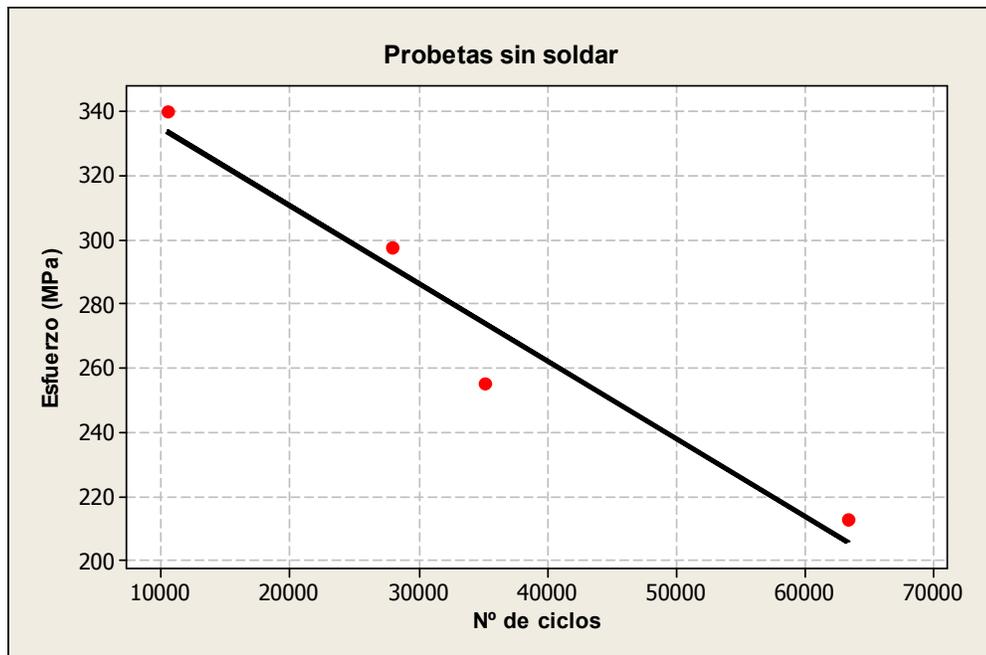


Figura 4.4 Curva S-N para probetas sin soldar

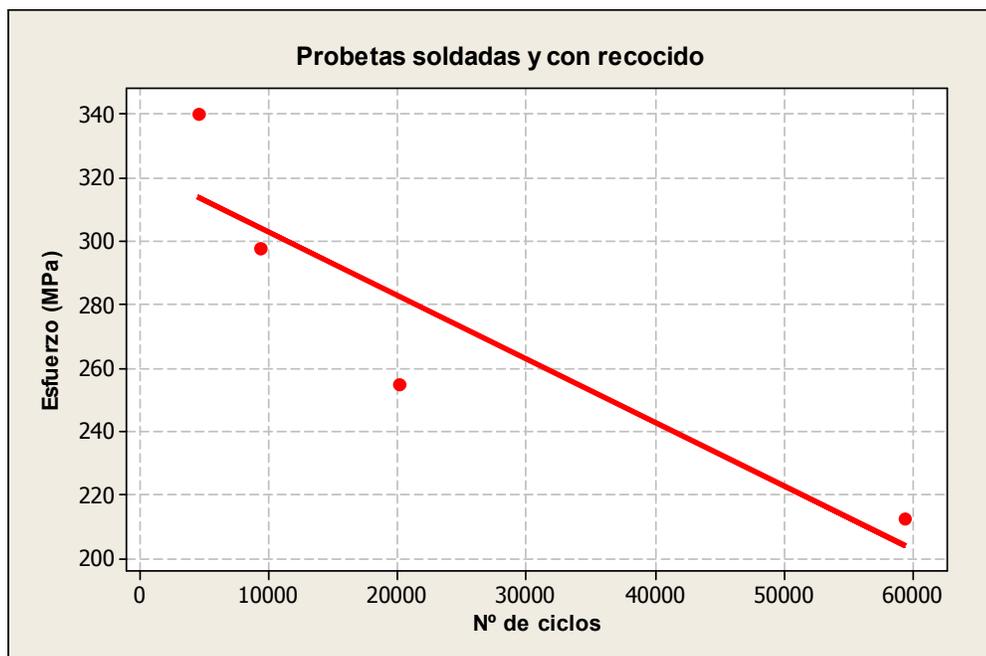


Figura 4.5 Curva S-N para probetas soldadas y con regeneración por recocido

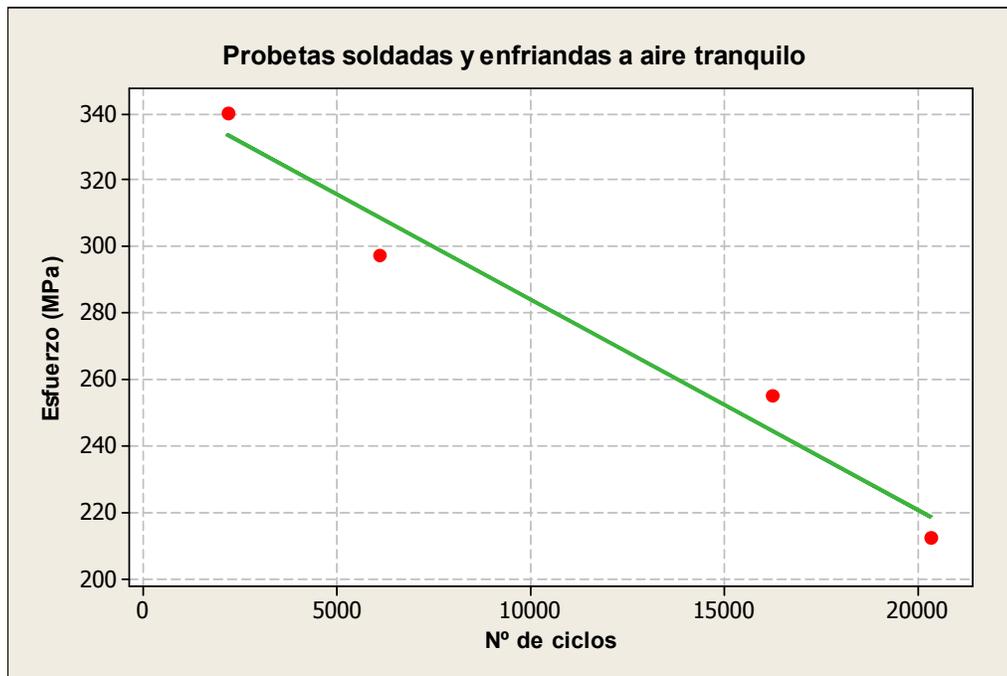


Figura 4.6 Curva S-N para probetas soldadas y enfriadas a aire tranquilo

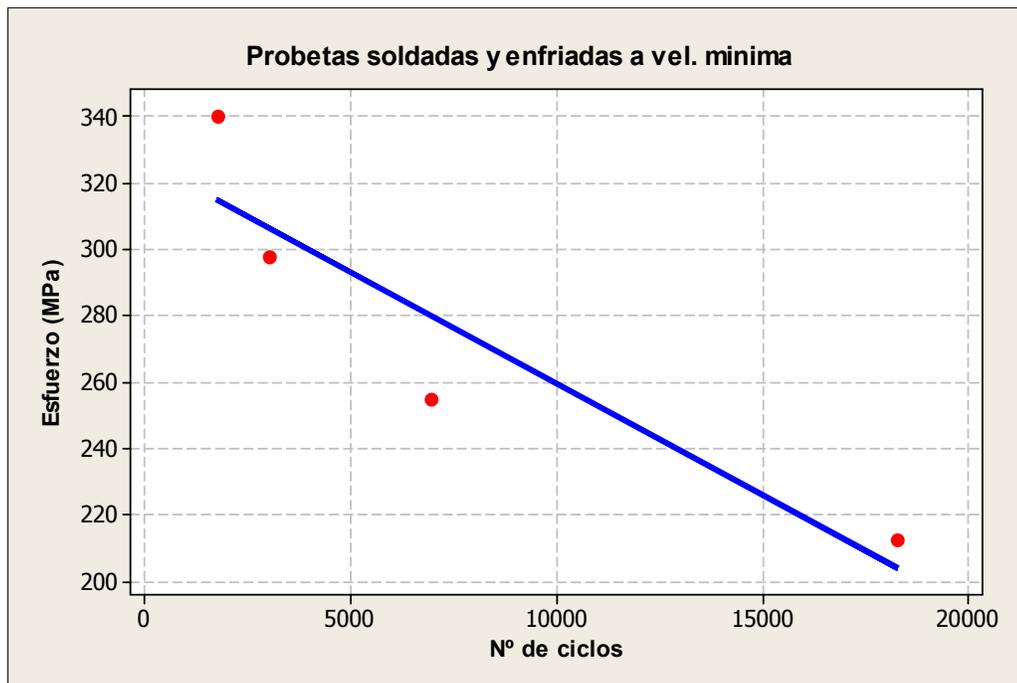


Figura 4.7 Curva S-N para probetas soldadas y enfriadas a una velocidad de aire de 3,1 m/s

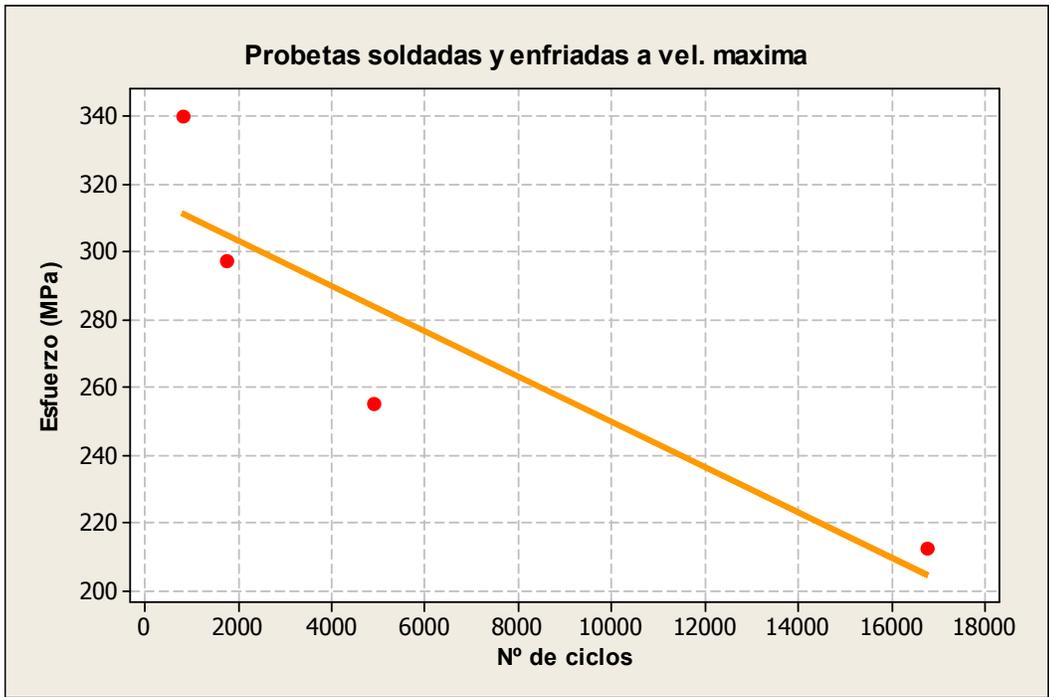


Figura 4.8 Curva S-N para probetas soldadas y enfriadas a una velocidad de aire de 4,8 m/s

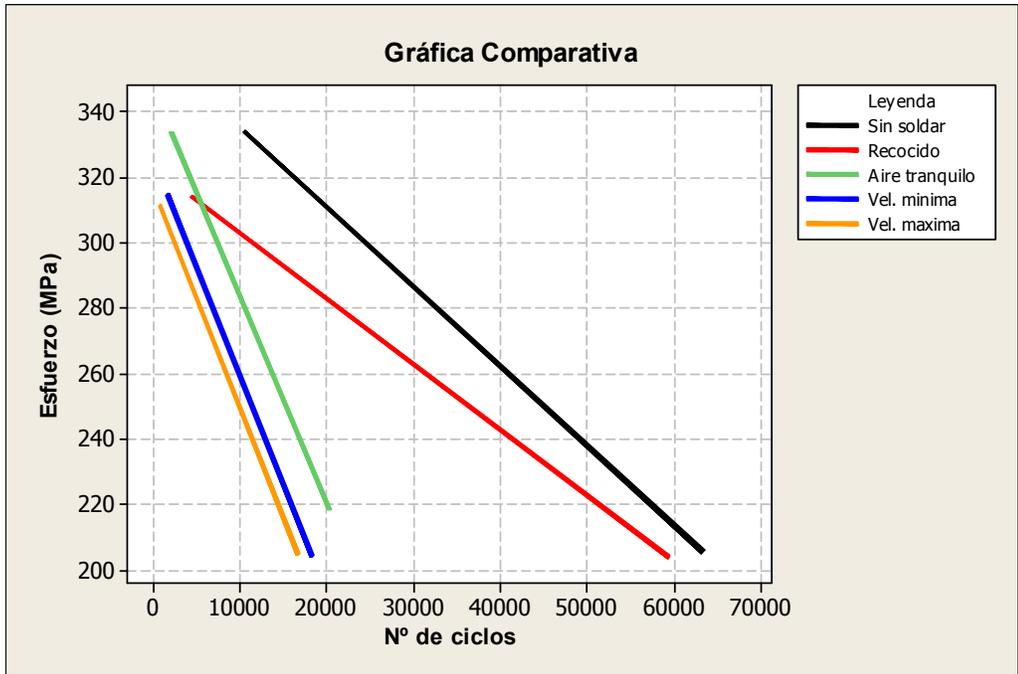


Figura 4.9 Curva S-N comparativa para cada grupo de probetas según su especificación.

CAPÍTULO 5

Análisis de resultados

5.1 Discusión de los resultados

Se observó que las tensiones residuales por la soldadura son factores que influyen en el deterioro de las construcciones soldadas ya que a mayor concentración de esfuerzo, menor es la resistencia a la fatiga. Estos esfuerzos fueron generados durante el calentamiento que la soldadura impone a una pequeña parte de la probeta, capaz de afectar la estructura y condiciones de movimiento del material.

Los esfuerzos residuales son generados por la expansión y contracción del material base, esto se origina por las pérdidas de calor desigual en todo el material de la pieza, esto se puede visualizar en la gráfica de esfuerzos residuales vs la distancia del cordón de soldadura para cada grupo de probetas, la cual fue obtenida mediante el cálculo de esfuerzos residuales a través del método de Masubushi, donde se observa que se generan esfuerzos residuales a tracción en las cercanías del cordón y en los puntos más alejados se generan esfuerzos a compresión.

Los esfuerzos residuales de compresión incrementan los ciclos de resistencia y por otro lado se demuestra a través de los resultados obtenidos que los esfuerzos residuales de tracción disminuyen los ciclos de resistencia,

esto se puede visualizar de forma clara en la curva comparativa S-N (Figura 4.7), en donde se observa la reducción considerable de vida en ciclos en las probetas soldadas y sin regeneración, adicionalmente se observa que mientras mayor sea la velocidad del aire en el medio donde se está soldando, menor es la resistencia a la fatiga, esto es por la aparición de zonas en la soldadura donde el flujo de calor disminuye por el enfriamiento forzado donde aparecen esfuerzos residuales de tracción que ayudan a disminuir los ciclos de vida.

En cada curva de cada grupo de probetas obtenida, se observó primeramente que hay disminución en la resistencia a la fatiga a medida que aumenta el número de ciclos, tal como es el comportamiento típico de las curvas S-N para aceros de bajo carbono, lo que indica el correcto procedimiento utilizado; por otra parte ninguna de estas curvas logró disminuir la resistencia a la fatiga a medida que aumento el numero de ciclos.

Las fallas se originaron en un punto de concentración de esfuerzos como se esperaba, este concentrador de esfuerzo fue el cambio brusco de sección transversal en las probetas sin soldar y el cambio brusco de sección transversal en las soldaduras en las probetas soldadas.

La curvas S-N de las probetas sin soldar (Figura 4.2) son de gran utilidad para compararlas con la curvas S-N de las probetas soldadas y regeneradas por recocido (Figura 4.3), en esta comparación se busca semejanza y cercanía entre dichas curvas, para verificar que hubo un buen proceso de soldadura, estas curvas presentan mayor resistencia a la fatiga con respecto a las probetas soldadas sin regeneración por recocido ya que los esfuerzos residuales generados por la soldadura fueron aliviados, estas curvas son cercanas y poseen una pendiente similar.

En las curvas S-N de las probetas soldadas y enfriadas a aire tranquilo (Figura 4.4), se observó que disminuyó la resistencia a la fatiga a medida que aumentó el número de ciclos, debido a los esfuerzos residuales generados por el proceso de soldadura, que trajo como consecuencia el aumento del

concentrador de esfuerzo, realizando una comparación de esta curva con la curva S-N de probetas soldadas y regeneradas por recocido se puede visualizar los efectos negativos que generan los esfuerzos residuales que reducen considerablemente los ciclo de vidas.

Las curvas S-N de las probetas soldadas y enfriadas con aire a una velocidad de 3,1m/s (Figura 4.5), se obtuvo que disminuye aun más la resistencia a la fatiga a medida que aumenta el número de ciclos, en comparación con las curvas S-N de probetas soldadas a aire tranquilo, esto nos da un indicio de que la velocidad del aire en el medio donde se está soldando y enfriando la soldadura influye de manera negativa en cuanto a la resistencia a la fatiga.

La curva S-N de las probetas soldadas con aire a una velocidad de 4,8 m/s (Figura 4.6), se obtuvo mayor disminución en la resistencia a la fatiga a medida que aumenta el número de ciclos, que las probetas soldadas y enfriada con aire a una velocidad de 3,1 m/s, esta última curva ayuda a corroborar que la velocidad del aire en donde se está realizando influye de manera más negativa cuando es mayor la velocidad del aire, debido que aparecen zonas en la soldadura donde el flujo de calor es menor debido al enfriamiento forzado, tal como se indicó anteriormente.

Las zonas de la soldadura donde existe menor flujo de calor, generan esfuerzos residuales de tracción, los cuales son perjudiciales ya que una vez establecida una microgrieta se crea concentraciones de esfuerzos, lo que provoca una zona plástica en el extremo de la grieta cada vez que el esfuerzo a tensión la abre, lo que achata su extremo y reduce la concentración efectiva de esfuerzos.

El examen a simple vista de las probetas falladas por fatiga muestran un patrón característico, hay una región que emana del sitio de la microgrieta original, que aparece como bruñida y otra región aparece mate y áspera. La región bruñida, como se mencionó anteriormente es la zona de la grieta con las

marcas de playa, llamadas así por su semejanza a las huellas dejadas sobre la arena por la marea en recesión, las cuales son producidas por el efecto anteriormente explicado de iniciación y detención alternante de la grieta debido a los esfuerzos de tracción y compresión. La región mate y áspera con la apariencia de una fractura frágil, es la llamada zona frágil de falla, la cual es la porción que falló de manera súbita, cuando la grieta alcanzó su tamaño límite, en algunos casos se observó en esta zona un pequeño remanente de la sección transversal original.

En algunas probetas se puede observar zonas brillantes que tienden a borrar las marcas de playa, esto pudo haber ocurrido debido al excesivo frotamiento entre las superficies de la grieta.

Se observó dispersión existente en los datos, esto es típico en pruebas de resistencia a la fatiga. La diferencia entre las muestras requeridas para generar toda la curva pudiera ser responsable de la dispersión. Algunas muestras podrían haber contenido más o mayores defectos, como por ejemplo: microporos producidos por la fundición del acero o por el proceso de soldadura, que sirven de elevadores de esfuerzos.

Se puede inferir con alto grado de confiabilidad que la grieta en las probetas ensayadas fueron producidas por el deslizamiento de dislocaciones, ya que en ausencia de muescas la fluencia plástica local causa distorsión, creando bandas de deslizamiento a lo largo de los bordes del material, conforme los esfuerzos se alternan aparecen más bandas de deslizamiento, las que forman grietas microscópicas.

CONCLUSIONES

Los intereses programados en los objetivos específicos han concluido en el logro del objetivo general. En este proyecto se planteó las pautas para la ejecución de ensayos de dureza Vickers y ensayos de fatiga de probetas con diferentes condiciones lo cual es importante ya que la mayoría de las piezas metálicas son sometidas a esfuerzos cíclicos o repetitivos, las cuales pueden fallar por fatiga debido a un esfuerzo mucho menor de lo que la pieza puede soportar durante la aplicación de un esfuerzo estático sencillo.

La información compilada sobre fatiga mecánica, características de acero AISI 1018 y soldadura SMAW, fue una herramienta de gran importancia ya que sirvió de aporte para sustentar el trabajo de grado.

Las propiedades mecánicas del material se determinaron a través del gráfico de esfuerzo vs deformación resultante de los ensayos de tracción, estas propiedades determinadas fueron cercanas a las propiedades suministradas por el proveedor a través del certificado de calidad

Los ensayos de fatiga mostraron la influencia de la velocidad de enfriamiento en la disminución de la resistencia a la fatiga, debido a que mientras mayor es la velocidad del aire en el medio que se está soldando y enfriando la soldadura, menor serán los ciclos de vida, trayendo como consecuencia efectos negativos en el desempeño de la misma, así como también se demostró mediante los ensayos de fatiga realizados para las

probetas con regeneración por recocido el buen proceso de soldadura debido a la proximidad de su curva S-N con la curva S-N del material original.

El comportamiento de los esfuerzos residuales determinados mediante las mediciones de dureza, a medida que se alejan del cordón de soldadura es decreciente pasando de esfuerzos residuales a tracción a esfuerzos residuales a compresión en la zona afectada por el proceso de soldadura.

Uno de los mayores logros de esta investigación fue proporcionar mayor seguridad al diseñador al momento de construir piezas móviles como ejes de transmisión de movimiento, bielas entre otras.

Otro gran logro de esta investigación fue llegar a incluir factores que generan efectos negativos en el trabajo de campo en diferentes condiciones reales como lo son soldadura a aire tranquilo, soldadura con regeneración por recocido y soldadura con ambiente que posee velocidad de aire de 3,1m/s y 4,8 m/s.

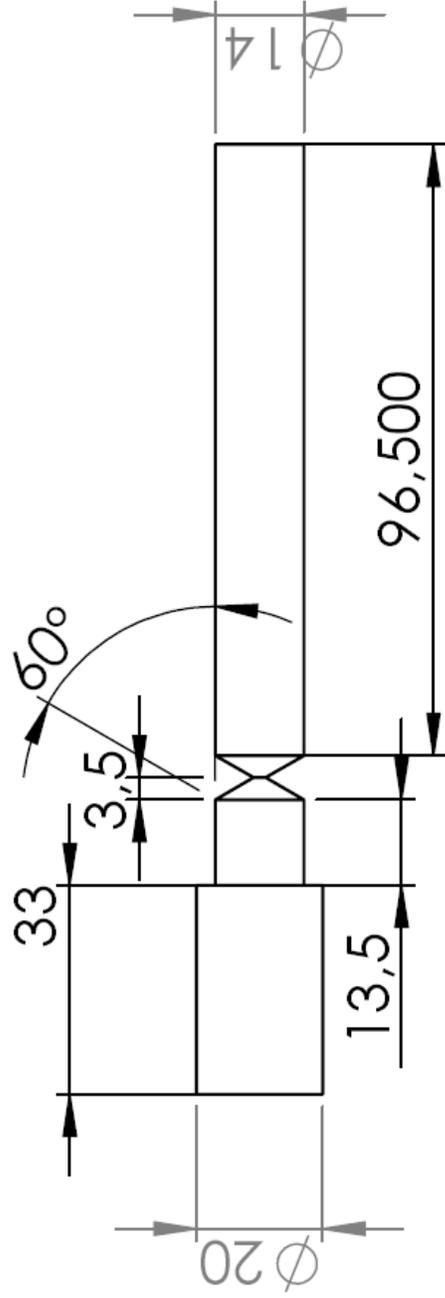
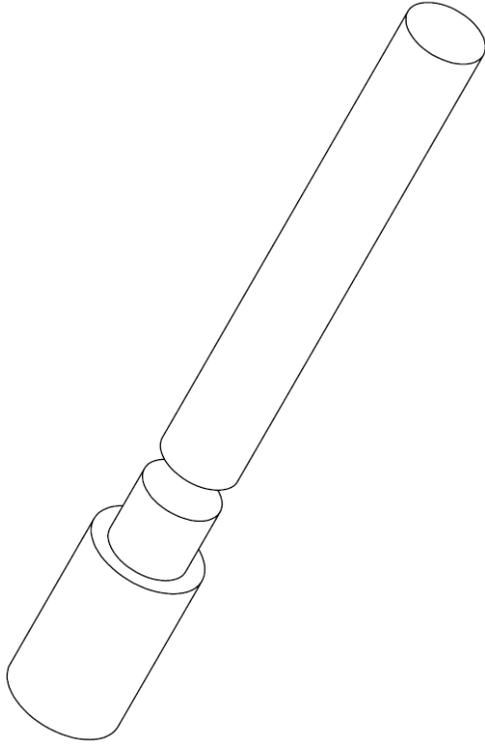
Esto da pie a generar nuevos proyectos similares, con diferentes aceros, electrodos, intensidad de corriente para así crear una base de datos que le sirva al diseñador para que utilice las condiciones de trabajo apropiada.

Se graficaron los resultado en curvas S-N, en las cuales se representa al esfuerzo S que causa la falla en comparación con el numero de ciclos N a los que se produce la falla, dichas gráficas muestran tendencias de curvas típicas teóricas de aceros de bajo carbono, lo que da garantía del correcto procedimiento utilizado.

RECOMENDACIONES

- Es recomendable realizar estudios posteriores en las mismas condiciones de esfuerzos y material, utilizando otro tipo de soldadura y otras velocidades de enfriamiento, para así tener un amplio y certero criterio de diseño y selección de elementos que estén bajo estas condiciones de carga.
- Se recomienda realizar estudios posteriores con análisis metalográfico para verificar si existen factores que aumenten o disminuyan la resistencia a la fatiga mecánica.
- También se pueden realizar estudios posteriores para probetas de otros materiales utilizados comúnmente en la industria, cuidando muy bien los detalles de fabricación, tratamientos térmicos, tipo de soldadura, y así definir nuevas investigaciones y conocer nuevos comportamientos de materiales, ampliando así los criterios de diseño y selección de elementos mecánicos.
- Debido a que el enfoque de esta investigación en cuanto a los ensayos de fatiga fue la zona crítica de las curvas S-N, es decir la zona inicial, donde ocurre la falla a un temprano número de ciclos, se recomienda realizar estudios similares en donde los ensayos sean llevados a ciclos considerados como de vida infinita para evaluar el comportamiento.

ANEXO I



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE ENTENDEN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAL: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIA LA ESCALA		REVISIÓN	
NOMBRE		IRMA		FECHA		TÍTULO: Bisel			
DIBUJ.		VERIF.		APROB.		MATERIAL:			
FABR.		CALD.		FECHO:		N.º DE DIBUJO			

ANEXO II

Los cálculos necesarios para la realización del mecanizado se muestran a continuación:

Las velocidades que opera el torno se puede visualizar en la tabla 3,2

Tabla 3.2 Velocidades disponibles del torno en rpm

2000	1550	1300	1000
730	525	365	240
125	75	50	20

El tocho fue obtenido de una barra de de una pulgada de diámetro, se corto tres milímetros por encima de la medida porque se presume una pérdida de por el corte donde se realizará la soldadura. Las dimensiones y características del toco se encuentran a continuación:

Dimensiones del tocho:

$\varnothing 1'' = 2,54 \text{ mm}$ y $L = 153 \text{ mm}$

Material:

AISI = 1018

Esfuerzo último:

$S_u = 414 \text{ MPa} = 42,24 \text{ kgf/mm}^2$

La herramienta utilizada fue de Acero sinterizado, la cual posee los parámetros de corte que se encuentra en la tabla 3.3. Estos parámetros de velocidad de corte, avance y profundidad de corte, son los utilizados para la realización del mecanizado.

Tabla 3.3 Parámetros de corte

Desbaste	Acabado
Vc = 150	Vc = 250
f = 2,5	f = 0,25
d = 15	d = 1,5

Nota: Unidades Vc (m/min), f (mm/rev), d (mm)

En la operación número uno se realiza un cilindrado con la finalidad de obtener el diámetro mayor de la probeta, como se muestra a continuación:

OPERACION N° 1: Cilindrado

Øi = 2,54 mm Øf= 20 mm L= 153 mm

d=2,7 mm 1 Pasada desbaste

$$N = \frac{(1000 * Vc)}{(\pi * D)} = \frac{(1000 * 150)}{(\pi * 22,7)} = 2103,36 \approx 2000 \text{ rpm}$$

$$Vc = \frac{2000(\pi)(22,7)}{(1000)} = 142,62 \frac{m}{min}$$

$$tc = \frac{L}{f * N} = \frac{(153)}{(2,5 * 2000)} = 0,0306 \text{ min}$$

Luego de la operación número uno, se realizó otro cilindrado, este es para obtener el diámetro de 14 mm, este cilindrado ocupara solo 120 mm de la longitud de la probeta, esto se puede visualizar a continuación:

OPERACION N° 2: Cilindrado

Øi = 20 mm Øf= 14 mm L= 120mm

d= 3 mm 2 Pasada  2 mm desbaste
1 mm acabado

1era Pasada de Desbaste

$$\varnothing_i = 20\text{mm}$$

$$\varnothing_f = 16\text{mm}$$

$$N = \frac{(1000 * 150)}{(\pi * 18)} = 2652,58 \approx 2000 \text{ rpm}$$

$$V_c = \frac{2000(\pi)(18)}{(1000)} = 113,09 \frac{m}{min}$$

$$t_c = \frac{(120)}{(2,5 * 2000)} = 0,024 \text{ min}$$

2da Pasada Acabado

$$\varnothing_i = 16\text{mm}$$

$$\varnothing_f = 14\text{mm}$$

$$L = 120\text{mm}$$

$$N = \frac{(1000 * 250)}{(\pi * 15)} = 5305,16 \approx 2000 \text{ rpm}$$

$$V_c = \frac{2000(\pi)(15)}{(1000)} = 94,24 \frac{m}{min}$$

$$t_c = \frac{(120)}{(0,25 * 2000)} = 2,24 \text{ min}$$

Seguidamente se procede a realizar un corte a 100 mm del extremo.

OPERACION N° 3: Tronzado

$$\varnothing_i = 14 \text{ mm}$$

$$N = \frac{(1000 * 150)}{(\pi * 14)} = 3410,46 \approx 2000 \text{ rpm}$$

$$V_c = \frac{2000(\pi)(14)}{(1000)} = 87,96 \frac{m}{min}$$

$$t_c = \frac{(7)}{(2,5 * 2000)} = 0,0014 \text{ min}$$

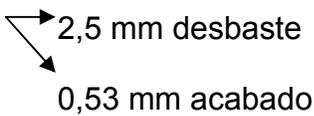
Una vez realizado el corte, se realiza el bisel correspondiente según la norma AWS D1.1 como se muestra a continuación:

OPERACION N° 4: Biselado

$$\text{Sen } \phi = \frac{d_{\text{max}}}{h}$$

$$d_{\text{máx}} = \text{Sen } \phi * h \quad d_{\text{máx}} = \text{Sen } 30^\circ * (6.06)$$

$$d_{\text{máx}} = 3.03 \text{ mm}$$

2 Pasada 

1era Pasada de Desbaste

$$\phi_i = 4 \text{ mm}$$

$$\phi_f = 14 \text{ mm}$$

$$L = 5,77 \text{ mm}$$

$$d_{\text{desbaste}} = \frac{2,5}{\text{Sen}(30)} = 5 \text{ mm}$$

$$N = \frac{(1000 * 150)}{(\pi * 9)} = 5305,16 \approx 2000 \text{ rpm}$$

$$V_c = \frac{2000(\pi)(9)}{(1000)} = 56,54 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

$$t_c = \frac{(5,77)}{(2,5 * 2000)} = 0,0011 \text{ min}$$

2da Pasada de Acabado

$$\phi_i = 1,88 \text{ mm}$$

$$\phi_f = 14 \text{ mm}$$

$$L = 6,99 \text{ mm}$$

$$d_{\text{acabado}} = \frac{0,53}{\text{Sen}(30)} = 1,06 \text{ mm}$$

$$N = \frac{(1000 * 250)}{(\pi * 7,94)} = 6013,41 \approx 2000 \frac{m}{min}$$

$$Vc = \frac{2000(\pi)(7,94)}{(1000)} = 49,88 \frac{m}{min}$$

$$tc = \frac{(30,01)}{(0,25 * 2000)} = 0,06002 \text{ min}$$

Luego de realizar el bisel, la probeta se somete a soldadura de arco eléctrico con electrodo revestido, con los parámetros que se encuentran a continuación

OPERACION N° 5: Soldadura

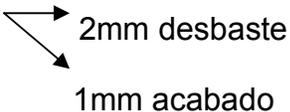
Electrodo 6013 3/32 Lincoln Electric.

Corriente a utilizar = 100 A.

Al culminar la operación de soldadura, se realiza un cilindrado con una longitud de 100 mm para obtener la medida final de ese extremo de la probeta.

OPERACION N° 6: Cilindrado

$\varnothing_i = 14\text{mm}$ $\varnothing_f = 8\text{mm}$ $L = 100\text{mm}$

$d = 3\text{mm}$ 2 Pasada  2mm desbaste
1mm acabado

1era Pasada de Desbaste

$$N = \frac{(1000 * 150)}{(\pi * 11)} = 4340,58 \approx 2000 \frac{m}{min}$$

$$Vc = \frac{2000(\pi)(11)}{(1000)} = 69,11 \frac{m}{min}$$

$$tc = \frac{(100)}{(2,5 * 2000)} = 0,02 \text{ min}$$

2da Pasada de Acabado

$$\varnothing_i = 10\text{mm}$$

$$\varnothing_f = 8\text{mm}$$

$$L = 100\text{mm}$$

$$N = \frac{(1000 * 250)}{(\pi * 9)} = 8841,94 \approx 2000 \frac{m}{min}$$

$$V_c = \frac{2000(\pi)(9)}{(1000)} = 56,54 \frac{m}{min}$$

$$t_c = \frac{(100)}{(0,25 * 2000)} = 2 \text{ min}$$

Finalmente se realiza una conicidad por el extremo opuesto de la probeta con el procedimiento realizado a continuación

OPERACION N° 7: Conicidad

$$\text{Cosa} = \frac{d}{h}$$

$$d = \text{Cos}(5,5) * (2,89) = 2,87$$

$$d = 2,87$$

2 Pasada  2mm desbaste
0,89mm acabado

1era Pasada de Desbaste

$$\varnothing_i = 20\text{mm}$$

$$\varnothing_f = 15,98\text{mm}$$

$$L = 30,06\text{mm}$$

$$d_{desbaste} = \frac{2}{\text{Cos}(5,5)} = 2,009\text{mm}$$

$$N = \frac{(1000 * 150)}{(\pi * 15,98)} = 2987 \approx 2000 \text{ rpm}$$

$$V_c = \frac{2000(\pi)(15,98)}{(1000)} = 100,40 \frac{m}{min}$$

$$tc = \frac{(30,06)}{(2,5 * 2000)} = 0,00601 \text{ min}$$

2da Pasada de Acabado

$$d_{acabado} = \frac{0,89}{\text{Cos}(5,5)} = 0,894\text{mm}$$

$\varnothing_i = 15,98\text{mm}$

$\varnothing_f = 14,2\text{mm}$

$L = 30,01\text{mm}$

$$N = \frac{(1000 * 250)}{(\pi * 14,2)} = 5604 \approx 2000 \frac{m}{min}$$

$$Vc = \frac{2000(\pi)(14,02)}{(1000)} = 89,22 \frac{m}{min}$$

$$tc = \frac{(30,01)}{(0,25 * 2000)} = 0,06002 \text{ min}$$

APÉNDICE A



CERTIFICADO DE CALIDAD
CHECK CERTIFICATE

N.º CERTIFICADO
CERTIFICATE N.º

88435

PEDIDO N.º / ORDER N.º SUM 35-09	ALBARAN N.º PACKING LIST N.º 043065	CLIENTE / CUSTOMER SUMINDU S.A. ESQUINA DE PUENTE YANES EDIFIC BECD. PISO 3. LA CANDELARIA CARACAS-VENEZUELA CIF/VAT:
---	---	--

DESCRIPCION / DESCRIPTION RD 1"X5800 SAE 1018	CALIDAD / QUALITY SAE 1018	N.º COLADA / HEAT N.º 292061
--	-----------------------------------	-------------------------------------

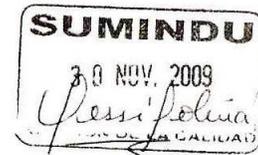
TIPO CERTIFICADO / CERTIFICATE TYPE S/EN 10204/2.2	OF 094029A	PESO / WEIGHT 11170 Kas	N.º BULTOS / BUNDLES N.º 11
---	-------------------	--------------------------------	------------------------------------

COMPOSICION QUIMICA / CHEMICAL COMPOSITION

C	Si	Mn	P	S	Pb	Se	Bo	Cr	Te
0.170	0.163	0.711	0.008	0.015					

CARACTERISTICAS MECANICAS / MECHANICAL PROPERTIES

- RESISTENCIA A LA TRACCION / TENSILE STRENGTH (Kg/mm²):
- LIMITE ELASTICO / YIELD POINT (Kg/mm):
- ALARGAMIENTO / ELONGATION 5D %:
- DUREZA SUPERFICIAL / SURFACE HARDNESS : 180 HR



OBSERVACIONES / OBSERVATIONS:

FECHA / DATE

8/10/09

FIRMA Y SELLO / SIGNATURE

CONTROL FINAL
FINAL INSPECTION
GARANTIA DE CALIDAD
QUALITY GUARANTEE

B.L.S.



APÉNDICE B



GRICON 8

NORMA		CLASIFICACIÓN
AWS/ ASME:	SFA – 5.1	E 6013
POSICIONES:	Plana y Horizontal	
CORRIENTE:	Alterna o Continua, Polo Negativo (-)	

DESCRIPCIÓN:

Electrodo de revestimiento rutilico, de alto rendimiento, operación muy suave, de casi nula salpicadura, de fácil encendido y reencendido. Genera cordones de penetración media, convexos, de excelente apariencia y con escoria autodesprendible.

APLICACIONES:

Por su alto rendimiento se recomienda su aplicación en trabajos que requieran altos volúmenes de soldadura, excelente para soldadura de tanques, elementos de máquinas, calderas y estructuras metálicas; donde se requiera un cordón de soldadura de fino acabado. Su campo de aplicación abarca temperaturas de trabajo desde -10 hasta +450°C.

OPERACIÓN:

Su operación es tan fácil, que aún aprendices de soldadura pueden obtener depósitos de muy buena apariencia. Se recomienda limpiar el área de soldadura y utilizar los rangos de corriente indicados para cada diámetro.

Resistencia a la tracción:	(500–550) N/mm ²	(72.5–79.7) Ksi.
Punto de fluencia:	(490) N/mm ² mín.	(71.0) Ksi.
Alargamiento (L= 5d)	25% mín	

ELECTRODOS PARA ACEROS AL CARBONO

∅ (mm)	∅ (pulg)	Longitud (mm)	Intensidad (Amp)	Peso/ Paq (Kg)
2.50	3/32	350	60-100	10
3.25	1/8	350	100-140	10
4.00	5/32	350	140-190	10
5.00	3/16	350	190-240	10

APÉNDICE C

Normas

- ASTM E 384-03 Standard Test Methods for Vickers Hardness of Metallic Materials
- ASTM E 466-96 Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials.
- ASTM E 468-90 Standard Practice for Presentation of Constant Amplitude Fatigue Test Results for Metallic Materials.
- ASTM E 739-91 Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ϵ -N) Fatigue Data.
- ASTM A 370 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products.
- AWS D1.1 Structural Welding Code – Steel.
- ASM Correlation of Yield Strength and Tensile Strength with Hardness for Steels.
- ASM Metals Handbook Volume 4 Heat Treating.

APÉNDICE D

Nomenclatura

Variable/Abreviatura	Descripción	Unidad
σ	Resistencia (o tensión)	Pa
F	Carga de tensión	N
l	Longitud	Mm
P	Carga	N
A	Área de sección transversal	m ²
ξ	Deformación	-
σ_{res}	Esfuerzo residual	Pa
Sy	Límite de fluencia	Pa
Su	Esfuerzo último	Pa
S _{máx}	Esfuerzo máximo	Pa
HRb	Dureza Rockwell B	-
HB	Dureza Brinell	-
HV	Dureza Vickers	-
SMAW	Soldadura por arco eléctrico protegido	-