



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Determinación de los esfuerzos residuales en soldadura a
tope por arco eléctrico con electrodo revestido en acero
ASTM A- 36

Andrade Z., Francys A.

Naguanagua, Noviembre de 2010



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Determinación de los esfuerzos residuales en soldadura a tope por arco eléctrico con electrodo revestido en acero ASTM A- 36

Trabajo especial de grado presentado ante la ilustre Universidad de Carabobo para optar al título de ingeniero mecánico

Tutor académico:

Ing. Edwin Peña

Autores:

Andrade Z., Francys A.

Naguanagua, Noviembre del 2010



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Determinación de los esfuerzos residuales en soldadura a tope por arco eléctrico con electrodo revestido en acero
ASTM A- 36

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

Andrade Z., Francys A.

Naguanagua, Noviembre de 2010



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Quienes suscriben, Miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para examinar la Tesis de Pregrado titulada **“Determinación de los esfuerzos residuales en soldadura a tope por arco eléctrico con electrodo revestido en acero ASTM A- 36”**, presentada por la bachiller: **Andrade Z., Francys A.**, portadora de la Cédula de Identidad N°: **17.316.630**; hacemos constar que hemos revisado y aprobado el mencionado trabajo.

Ing. Edwin Peña
Presidente del jurado

Ing. Carmelo Torres
Miembro del jurado

Ing. Giovanni Pizzella
Miembro del jurado

Naguanagua, Noviembre de 2010

Dedicatoria

A aquella entidad omnipotente, que me puso obstáculos muy rudos, y me lo hizo difícil, pero también me hizo entender que difícil es muy diferente a imposible. ((Sería bueno que me la pusieras más fácil de ahora en adelante)).

A mí; por despertar del letargo.

A mis abuelos Costanza Ysabel y Lucibal Anselmo, a mis hermanos Gean Franco, Francerys Angelina, Francisco Domingo, Francy Mariela y Valentina, a mi tía Jaira Ysabel, y a mis sobrinos Grismar Alejandra, Brandon Alejandro y Franco Alessandro; Porque esto es para ellos.

FAAZ.

Agradecimiento

A mi familia; hermosas personas que me apoyaron y creyeron en mí siempre: Abuelos, tías y tíos. Y a mis sobrinos, quienes dibujan una sonrisa enorme en mi rostro.

A aquellos con quienes puedo pensar en voz alta; G3R, MM y Eddie2k2.

A la *gentecita* con quien no solo compartí clases y buenos momentos, sino algo más: Rodríguez, Molina, Jiménez, Battes, López, Troitiño, Amari, León, Acosta, Escalona, Meza, Romero, Vigas, Luque y Molina.

A todos aquellos quienes me otorgaron su invaluable ayuda: Prof. Ing. Luis Escalona, Ing. María Escalona e Ing. Fran Gutiérrez por su disposición y guía, al Ing. Elkin Gualteros por su excepcional atención y cordialidad, a Ana Exime por ser una buena “compañera de tesis”, a la Ing. Milagros Torres por su excelente soporte y aprecio; y al Prof. Ing. Edwin Peña por su justa asistencia y guía.

Gracias. **FAAZ.**



INDICE GENERAL



INDICE GENERAL	i
INDICE DE FIGURAS	iii
INDICE DE TABLAS	vi
RESUMEN	viii
INTRODUCCIÓN	
CAPÍTULO I	
1.2 Situación problemática	1
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo general	3
1.2.2 Objetivos específicos	3
1.3 Justificación	4
1.4 Alcance	4
1.5 Limitaciones	5
CAPÍTULO II	6
2.1 Antecedentes	6
2.2 Marco teórico	9
2.2.1 Soldadura	9
2.2.2 Soldadura por arco con electrodo revestido	10
2.2.3 Esfuerzos residuales	11
2.2.4 Clasificación de las tensiones residuales	21
2.2.5 Detección de las tensiones residuales	22
2.2.6 Ensayo a tracción	25
2.2.7 Tratamientos térmicos	29
2.2.8 Ley de Hooke o Ley de elasticidad	32
2.2.9 Galgas extensométricas	33

2.2.10 Tipos de extensómetros eléctricos (strain gages)	36
2.11 Puente de Wheatstone	38
CAPÍTULO III	41
3.1 Nivel de la investigación	41
3.2. Diseño de la investigación	41
3.2.1. Determinación experimental de los esfuerzos residuales	42
3.2.1.1. Material de las probetas	43
3.2.1.2 Cortado de las láminas y biselado de las mismas	43
3.2.1.3 Soldadura de las probetas	44
3.2.1.4 Mecanizado de las probetas	46
3.2.1.5 Tratamiento de recocido	48
3.2.1.6 Ensayo de tracción según Masubushi	51
3.2.1.7 Comprobación del ensayo de tracción por extensometria	53
3.2.1.7.1. Preparación de la probeta	53
3.2.1.7.2 Circuito para lectura de la señal de la galga	55
3.2.2 Determinación de la relación entre el espesor de cordón y el esfuerzo residual.	58
CAPÍTULO IV	59
4.1. Determinación de los esfuerzos residuales mediante ensayo de tracción puro	59
4.2 Determinación de los esfuerzos residuales mediante ensayo extensométrico por tracción	68
4.3 Metalografía	73
CAPÍTULO V	77
CONCLUSIONES	85
RECOMENDACIONES	89
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90



INDICE DE FIGURAS



Figura 1.1 Algunas estructuras que requieren unión metálica permanente; en este caso, realizadas por soldadura	1
Figura 2.1 Ilustración descriptiva de soldadura por arco eléctrico	11
Figura 2.2 Historia de las tensiones y temperaturas para la barra central en el sistema de las tres barra	14
Figura 2.3. Estados transitorios y finales durante la soldadura	15
Figura 2.4. Distribución de tensiones residuales longitudinales y transversales de soldadura.	17
Figura 2.5 Tiempo de cambio del centro de deflexión de una barra de metal bajo la influencia del movimiento longitudinal de una fuente de calor	18
Figura 2.6 Representación esquemática de la distorsión ocurrida en una junta soldada en V	18
Figura 2.7 Gráfica obtenida por computadora en el ensayo de tensión	27
Figura 2.8 Galga Uniaxial	36
Figura 2.9 Configuración Multiaxial. (a) Biaxial. (b) Triaxial	37
Figura 2.10 Otras Configuraciones Extensometricas. (a) Tipo diafragma. (b) Para tensiones residuales. (c) Para transductores de carga	38
Figura 2.11 Puente de Wheastone	38
Figura 2.12 Puente de Wheastone con una galga sustituyendo una resistencia	39
Figura 3.1 Diagrama, pasos para determinar esfuerzos residuales	42
Figura 3.2 Obtención de las laminas de trabajo	43
Figura 3.3 biselado correspondiente según norma ANSI/AWS A2.4-98	44

Figura 3.4 Electrodeos recomendados para soldar acero al carbono ASTM A-36. Según El compendio de normas para el producto de acero (Gerdau Aza – 1ra edición, 2002)	45
Figura 3.5 Dimensiones probeta de tracción plana, norma ASTM E-8	47
Figura 3.6 Especificación de soldadura a tope con bisel, según norma ANSI/AWS A2.4-98 y Representaciones ilustradas de las probetas para ensayo a tracción con los tres grosores de cordón de soldadura	48
Figura 3.7 Calentamiento y enfriamiento sufrido por las probetas a través del tiempo (12 minutos a temperatura constante según material y espesor)	50
Figura 3.8 Pasos para preparar la probeta para extensometría por tracción	54
Figura 3.9 Galga Adherida a la probeta (punto de silicón para evitar contacto entre los cables)	55
Figura 3.10 Diagrama del circuito para lectura de la señal de voltaje de la galga en el ensayo extensométrico por tracción	56
Figura 3.11 Circuito en bakelita para la lectura de señal de galga. Vista de elementos (Izq); Vista de conexiones entre elementos del circuito (Drch)	56
Figura 3.12 Guía para el Circuito (Diagrama – Circuito en Bakelita)	56
Figura 4.1 Representación gráfica Fuerza vs. Elongación. Cordón de Soldadura, Grosor 1	62
Figura 4.2 Representación gráfica Fuerza vs. Elongación. Cordón de Soldadura, Grosor 2	62
Figura 4.3 Representación gráfica Fuerza vs. Elongación. Cordón de Soldadura, Grosor 3	63
Figura 4.4 Representación gráfica Esfuerzo vs. Elongación. Cordón de soldadura, grosor 1	65
Figura 4.5 Representación gráfica Esfuerzo vs. Elongación. Cordón de soldadura, grosor 2	65
Figura 4.6 Representación gráfica Esfuerzo vs. Elongación. Cordón de soldadura, grosor 3	66

Figura 4.7 Representación gráfica esfuerzos residuales según grosor de cordón de soldadura	67
Figura 4.8 Representación gráfica Deformación vs. Señal de voltaje. Cada punto (de cada línea) representa un grosor de cordón de soldadura, el más bajo es el grosor 1 y el más alto es el grosor 3	71
Figura 4.9 Representación gráfica Deformación vs. Esfuerzos. Cada punto (de cada línea) representa un grosor de cordón de soldadura, el más bajo es el grosor 1 y el más alto es el grosor 3	71
Figura 4.10 Esfuerzos residuales, Tracción vs. Extensometría	73
Figura 4.11 Metalografía de probetas con cordón de soldadura, grosor 3 (Zoom x100)	74
Figura 4.12 Metalografía de probetas con cordón de soldadura, grosor 2 (Zoom x100)	75
Figura 4.13 Metalografía de probetas con cordón de soldadura, grosor 1 (Zoom x100)	76



INDICE DE TABLAS



Tabla 2.1	Factores que contribuyen a las tensiones residuales	21
Tabla 2.2	Clasificación de las técnicas para la medición de tensiones residuales	24
Tabla 3.1	Descripción de la Maquina para soldadura SWAM	46
Tabla 3.2	Rango de temperatura para Aceros al carbono según Requerimientos para el tratamiento post-soldadura para aceros bajo carbono de la Norma ASME, sección VIII división 1, Rules for construction of pressure vessels, 2007	50
Tabla 3.3	Equipo para ensayo de tracción. Universidad de Carabobo. Facultad de Ingeniería, laboratorio de materiales.	51
Tabla 4.1	Fuerzas resistidas por los grupos de probetas A y B (Con y sin tratamiento térmico respectivamente) en el límite de Fluencia	60
Tabla 4.2	Fuerzas resistidas por los grupos de probetas A y B (Con y sin tratamiento térmico respectivamente) límite de resistencia a la tracción	60
Tabla 4.3	Fuerzas resistidas por los grupos de probetas A y B (Con y sin tratamiento térmico respectivamente) en el límite de Ruptura	60
Tabla 4.4	Promedio de Elongaciones para cada grosor de cordón de soldadura según grupos muestra de cada tipo de probeta	61
Tabla 4.5	Promedio de Fuerzas Resistidas en los puntos: limite de fluencia, resistencia a la tracción y limite de ruptura, para cada grosor de cordón de soldadura según grupos muestra de cada tipo de probeta	61
Tabla 4.6	Esfuerzo que soportan las probetas tipo A en su límite elástico	63
Tabla 4.7	Esfuerzo que soportan las probetas tipo B en su límite elástico	63

Tabla 4.8	Esfuerzo que soportan las probetas tipo A en su límite de resistencia a la tracción	64
Tabla 4.9	Esfuerzo que soportan las probetas tipo B en su límite de resistencia a la tracción	64
Tabla 4.10	Esfuerzo que soportan las probetas tipo A, límite de ruptura	64
Tabla 4.11	Esfuerzo que soportan las probetas tipo B, límite de ruptura	64
Tabla 4.12	Esfuerzos residuales en el límite de fluencia para los tres tipos de grosores de soldadura	67
Tabla 4.13	Esfuerzos residuales en el límite de resistencia a la tracción para los tres tipos de grosores de soldadura	68
Tabla 4.14	Esfuerzos residuales en el límite de ruptura para los tres tipos de grosores de soldadura	68
Tabla 4.15	Señales de voltaje emitidas por los strain gage (galgas), promedio de voltaje, Deformación promedio y Esfuerzo soportado por las probetas A y B (con y sin tratamiento térmico respectivamente) según su grosor de cordón de soldadura	69
Tabla 4.16	Esfuerzos residuales en el límite de fluencia para los tres tipos de grosores de soldadura	72
Tabla 4.17	Zonas de muestra 03 (NTT y TT)	74
Tabla 4.18	Zonas de muestra 02 (NTT y TT)	75
Tabla 4.19	Zonas de muestra 01 (NTT y TT)	76



RESUMEN



Este trabajo investigativo tiene como finalidad la determinación de esfuerzos residuales respecto al grosor de cordón de soldadura, generado por el proceso de soldadura SMAW con una sola pasada en acero estructural ASTM A-36.

La determinación de dichos esfuerzos se mide apoyándose en la teoría de Masubuchi (1980), quien demostró que el esfuerzo residual de tracción será igual al límite de fluencia del material a la temperatura ambiente. Realizando entonces, diferencias de esfuerzos obtenidos por ensayos de tracción a grupos de probetas tratados térmicamente (aliviando tensiones) y grupos sin tratamiento térmico (cada grupo con subgrupos caracterizados por un grosor de cordón de soldadura diferente), obteniendo entonces una tendencia de esfuerzos vs grosor de cordón. Corroborando estos resultados al compararlos con la tendencia que arroja el ensayo realizado por extensometría y el ensayo metalográfico de las piezas.

Obteniendo entonces que a medida que el cordón de soldadura es más grueso, mayores son los esfuerzos residuales almacenados en la zona térmicamente afectada en el proceso de soldadura.



INTRODUCCIÓN



Desde hace ya mucho tiempo que las uniones de las estructuras metálicas, en su mayoría, son realizadas por medio de la soldadura, y se sabe que una unión metálica por medio de cambio de temperatura genera esfuerzos residuales en las partes soldadas, y por tanto es de esperarse el sobre diseño de la estructura; para así asegurar el funcionamiento adecuado de la misma.

Pero, ¿qué tanto se sobre diseñan estas estructuras?, eso es algo que no está propiamente establecido, ya que según la variación de muchos factores y el tipo de materiales utilizados (tanto en partes a soldar y material de aporte en el proceso de soldadura) afectan el módulo de los esfuerzos residuales que estas uniones conllevan.

Como parte de un compendio de estudios, encargados de analizar diversos factores que actúan como variadores de los esfuerzos residuales; esta investigación pretende, mediante ensayos, de determinar dichos esfuerzos generados por una unión soldada, según la variación del cordón de soldadura que les une; con la finalidad de poder tener un patrón de referencia a la hora de diseñar alguna estructura que requiera unión por soldadura a tope con arco eléctrico y electrodo revestido.

Determinar estos esfuerzos según el grosor del cordón que unirá las piezas, servirá para realizar los cálculos necesarios y disminuir notablemente el sobre diseño de la estructura; esto a su vez disminuirá el trabajo requerido para las uniones, el material de aporte necesario en el proceso de soldadura,

el factor de seguridad (y a su vez el material estructural adicional), trayendo mejoras económicas y mejoras en la exactitud de los cálculos necesarios para la creación de estructuras.

Esperando entonces, generar un aporte para la ingeniería encargada de diseños que dependan de procesos de soldadura para unir piezas y al área que estudia la ciencia de los materiales, al poder proveerles una especie de guías que describen los esfuerzos residuales que se generan en piezas de acero ASTM A-36 al ser unido por un proceso de soldadura a tope por arco eléctrico con electrodo revestido.



CAPÍTULO I

Planteamiento del problema



1.1 Situación problemática

El diseño de estructuras que requiere unión de piezas metálicas permanentemente, emplea con frecuencia el uso de soldadura; ya que presenta costos bajos en manufactura con relación a procesos de fabricación como forja, extrusión y otros.

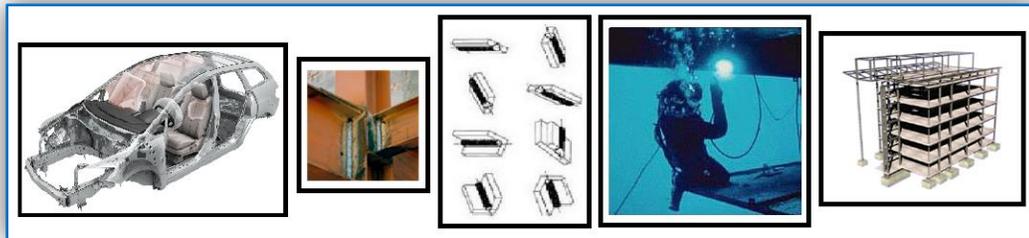


Figura 1.1 Algunas estructuras que requieren unión metálica permanente; en este caso, realizadas por soldadura. Fuente: Imágenes random (on line) Disponibles en: <http://www.google.co.ve/imghp?hl=es&tab=wi> (palabra clave: “tipos de soldadura”).

La soldadura se lleva a cabo gracias a la cohesión entre metal base y de aporte, a través de una fuente de calor móvil fuertemente concentrada, fundiendo y mezclando ambos elementos. Por consiguiente, el área próxima al cordón, se dilata al aumentar la temperatura y se contrae cuando se enfría;



su movimiento es restringido por la masa del cuerpo y se generan tensiones y desplazamientos en la zona.

Así mismo, existen otros factores que intervienen en el proceso y aumentan la vulnerabilidad del área afectada, como la velocidad de movimiento y corriente utilizada, el tipo de trayectoria dictada en el electrodo al momento de soldar, bien sea elíptica, semicircular o en zigzags. Estos componentes establecen un mayor tiempo de contacto entre el material a soldar y la fuente móvil de calor; cabe destacar que mientras mayor sea este tiempo, mayores serán los esfuerzos residuales que se generen en el proceso (Messler, R. W., 2004).

Las tensiones residuales surgen tanto en el plano perpendicular al cordón, como en el longitudinal, siendo esta última de mayor magnitud, además a medida que se alejan de la línea de fusión de soldadura ambas disminuyen (Masubuchi, 1980). Al conjunto de ambos esfuerzos se denominan esfuerzos residuales globales y afectan la resistencia mecánica del material en las zonas afectadas, disminuyendo los niveles de carga aplicados para los cuales la pieza presenta fallas.

Lo anteriormente expuesto demuestra que cuando se utiliza el proceso de soldadura, ya sea para construir o reparar, trae alteraciones en los materiales y/o estructuras por lo que es necesario considerar sus consecuencias nocivas. En busca de métodos que aseguren el sistema, los diseñadores tienden a usar cordones de gran espesor, sobrediseñando y generando material ocioso al momento de que el elemento realice la función para la cual fue creado y se enfrente a los esfuerzos que se encuentran en su lugar de desempeño.



De allí la necesidad de determinar estos esfuerzos residuales y, de esta forma, facilitar el diseño de elementos que requieran soldadura sin que se sobrestime, y mucho menos se subestime, la cantidad de material que debe emplearse para su fabricación.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Determinar los esfuerzos residuales globales debidos al proceso de soldadura a tope por arco eléctrico con electrodo revestido, en acero ASTM A-36.

1.2.2 Objetivos específicos

- Realizar ensayos de tracción a probetas soldadas, de distintos espesor de cordón, para obtener valores reales de esfuerzos residuales en función de las tensiones aplicadas, mediante la teoría de Masubuchi.
- Medir de forma experimental las deformaciones que ocurren en las probetas de acero a causa del proceso de soldadura a través de extensómetro.
- Comparar los resultados obtenidos en ambos experimentos.
- Determinar la relación entre el esfuerzo residual y el espesor del cordón de soldadura en acero ASTM-A36 con un modelo matemático basado en los datos obtenidos.
- Analizar y discutir los resultados obtenidos.



1.3 Justificación

El aporte de este trabajo es obtener un patrón de comportamiento y los esfuerzos residuales que se generan en acero ASTM-A36, que indique la relación entre el espesor de cordón de soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido en una pasada, con trayectoria recta, ganando con dicho patrón, la disminución de la incertidumbre en cuanto al esfuerzo real que el material mencionado, habiendo pasado por dicho proceso de soldadura, puede soportar.

Esta investigación forma parte de un compendio de estudios y trabajos relacionados al proceso de soldadura y efectos residuales. Sin embargo, a pesar de que la información existente implica una gran variedad de aceros, no se encuentra incluido el acero estructural ASTM-A36, siendo uno de los aceros al carbono más utilizado en la fabricación de tubos, ductos, vigas y estructuras.

1.4 Alcance

Se busca la determinación de los esfuerzos residuales para acero estructural ASTM A-36, gracias a una relación entre los esfuerzos generados por un proceso de soldadura a tope por arco eléctrico con electrodo revestido, en una pasada, con cordones de soldadura cuyos espesores de cordón son variables.

Se seleccionó el acero ASTM A-36 como material de estudio ya que la soldabilidad es adecuada. Por su alta tenacidad y baja resistencia mecánica y su amplia gama de aplicaciones a nivel estructural.



Se mantendrá constante la intensidad de corriente y el voltaje para todos los espesores y la velocidad de aplicación del cordón según el espesor que se quiera generar, según valores recomendados por la AWS para el espesor de láminas empleado.

El cálculo de esfuerzos se realizará experimentalmente por ensayo de tracción en probetas soldadas bajo la metodología de Masubuchi; algunas sometidas a proceso de recocido para que a nivel microestructural la pieza sufra una relajación de esfuerzos, y otras probetas sin el proceso de recocido; la diferencia entre el esfuerzo de la pieza recocida y la pieza sin tratamiento térmico de recocido, otorgará como resultado el esfuerzo residual generado por el proceso de soldadura con las características antes mencionadas.

Para corroborar el cálculo de esfuerzos residuales por la metodología de Masubuchi se utilizarán strain gage según metodología de ensayo de tracción.



CAPÍTULO II

Marco Teórico



2.1 Antecedentes

Horioka y Alencastre; (2002), desarrollaron el estudio de soldadura a tope para acero ASTM A36 mediante el Método de Elementos Finitos, en las que a través de simulación matemática, se analiza la distribución de esfuerzos en uniones soldadas típicas sometidas a cargas estáticas de diseño, teniendo en consideración la variación de algunos parámetros geométricos y así convalidar resultados experimentales. Los tipos de uniones simuladas en esta investigación son las recomendadas por la AWS. En este trabajo se consideró que los parámetros geométricos que afectaron principalmente a una unión soldada son la sobre monta y las socavaciones, estos dos factores pueden variar significativamente el valor de los esfuerzos en comparación con el resultado del cálculo analítico.

Burgos y Otros; (2006), inician la búsqueda de soluciones que permitan garantizar el desempeño para el que fueron proyectados los elementos de estudio. En efecto se evalúa el efecto de la detonación de un explosivo como método para reducir los esfuerzos residuales con la colocación de cargas explosivas: una de forma lineal y la otra de forma sinusoidal. Los resultados experimentales obtenidos corroboraron la efectividad del método y



demonstraron que en ambas formas o alternativas se logró una disminución de los esfuerzos residuales entre el 50 y el 60%, comprobándose que el tratamiento ofrece una alternativa viable para extender la vida útil de las uniones soldadas. Dicho estudio se gracias a la fabricación de probetas de acero ASTM - A36 soldadas. La medición de los esfuerzos residuales se realizó mediante extensómetros, utilizando el puente de Wheastone como circuito fundamental para medir de forma directa el desequilibrio eléctrico que se produce tras la deformación de las galgas.

García y otros; (2006), a la par de Burgos y los otros, estudian las construcciones metálicas obtenidas mediante la aplicación de soldadura, analizando los cambios que se producen como la pérdida de la forma geométrica de la estructura, la no coincidencia de bordes y desplazamientos apreciables debido al calentamiento no uniforme que se manifiesta durante la realización de la junta en el cordón y zonas próximas al mismo. Al emplear una fuente de calor móvil fuertemente concentrada, como puede ser un arco eléctrico, ocurren procesos físico-químicos, estructurales y termo-deformacionales de diversa índole que provocan el surgimiento de tensiones residuales, particularmente en el cordón y en la Zona Afectada Térmicamente (ZAT).

Serna-Giraldo y otros; (2007), analizan y llevan a la práctica la utilización del ruido magnético de Barkhausen, cuyo principio es la aplicación de campos magnéticos variables en uniones soldadas de aceros al carbono donde se presenta una variación microestructural como consecuencia de los ciclos térmicos. Cuando los materiales ferromagnéticos se someten a campos magnéticos variables, la variación en la inducción se presenta de forma discontinua como una respuesta al movimiento de las paredes de dominios magnéticos. Esos saltos abruptos se conocen como Ruido Magnético de Barkhausen (RMB), y pueden detectarse colocando una bobina en la



superficie de la muestra. Se sabe que el RMB es susceptible a la condición microestructural y al estado de tensión del material, siendo utilizado en la medición de estados de esfuerzos residuales.

Bejarano (2007), En este estudio se planteó que si en un sistema se presenta una carga variable que genera una falla súbita de la unión soldada bajo esfuerzos menores que los límites de ruptura establecidos se producen pérdidas económicas lo cual promueve un estudio como este, cuya intención se enfocó en presentar y argumentar las consideraciones de diseño además de factores que afectan el desempeño de la uniones al ser soldadas bajo estas condiciones de carga, limitándose a los aceros bajo carbono y al proceso de soldadura por arco eléctrico. Una vez expuestas las diferencias entre un análisis de fatiga en elementos monolíticos en los cuales son directamente aplicables las teorías de fatiga clásicas así como las particularidades que hacen de la soldadura un tema donde se deben considerar muchas variables antes de aplicar dichas teorías, se presentan distintos criterios para el ingeniero de diseño de uniones soldadas tanto para carga cíclica como para carga estática

Richter-Trummer y otros; (2008), retoman el uso de galgas extensométricas para la medición de esfuerzos residuales en soldadura a través del Método de Seccionado ("*Sectioning method*"), el cual consiste en hacer un corte en una instrumentado placa con el fin de liberar las tensiones residuales que estuvieron presentes en la línea de corte. Para ello, el proceso de corte no debe introducir la plasticidad o calor, de modo que las de tensiones residuales originales se pueden medir sin la influencia efectos de la plasticidad en la corte de los planos la superficie.

Bello y Marchena (2008), determinaron la magnitud del esfuerzo residual teórico y experimental en las uniones a tope de acero AISI 1045, soldadas por



arco eléctrico con electrodo revestido como material de aporte. Se realizaron ensayos a probetas, donde se determinó el valor experimental de la magnitud del esfuerzo residual estableciéndose comparaciones con los valores teóricos. Una metodología empleada para la determinación de los esfuerzos residuales fue la mencionada por Masubuchi, quien demostró que el esfuerzo residual de tracción será igual al límite de fluencia del material a la temperatura ambiente. La forma experimental en que se obtuvieron los esfuerzos residuales, fue realizando la diferencia entre los valores de esfuerzos de fluencia obtenidos a partir de ensayos de tracción a las probetas soldadas de las que un conjunto de estas, se le practico tratamiento térmico de alivio de esfuerzos y al otro grupo de la población no se le realizo dicho.

2.2 Marco Teórico

2.2.1 Soldadura

La soldadura es un proceso de fabricación en donde se realiza la unión de dos materiales, (generalmente metales o termoplásticos), usualmente logrado a través de la coalescencia (fusión), en la cual las piezas son soldadas fundiendo ambas y, en la mayoría de los casos, agregando un material de relleno fundido (metal o plástico), el cual tiene un punto de fusión menor al de la pieza a soldar, para conseguir un baño de material fundido (*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. Esto está en contraste con la soldadura blanda (en inglés *soldering*) y la soldadura fuerte (en inglés *brazing*), que implican el derretimiento de un material de bajo punto de fusión entre piezas de trabajo para formar un enlace entre ellos, sin fundir las piezas de trabajo.



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. (Fuente: Proceso de soldadura. (2009). [on line]. Disponible en: <http://es.wikipedia.org/wiki/Soldadura>).

2.2.2 Soldadura por arco con electrodo revestido

Este proceso de soldadura se caracteriza porque se produce un arco eléctrico entre la pieza a soldar y un electrodo metálico recubierto se caracteriza porque se produce un arco eléctrico entre la pieza a soldar y un electrodo metálico recubierto.

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

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

A continuación se presenta una imagen que ilustra el procedimiento explicado anteriormente, para un proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido, figura 2.1. (Fuente: Descripción del proceso de soldadura tipo SMAW. (2009). [on line]. Disponible en: www.sunarc.com).

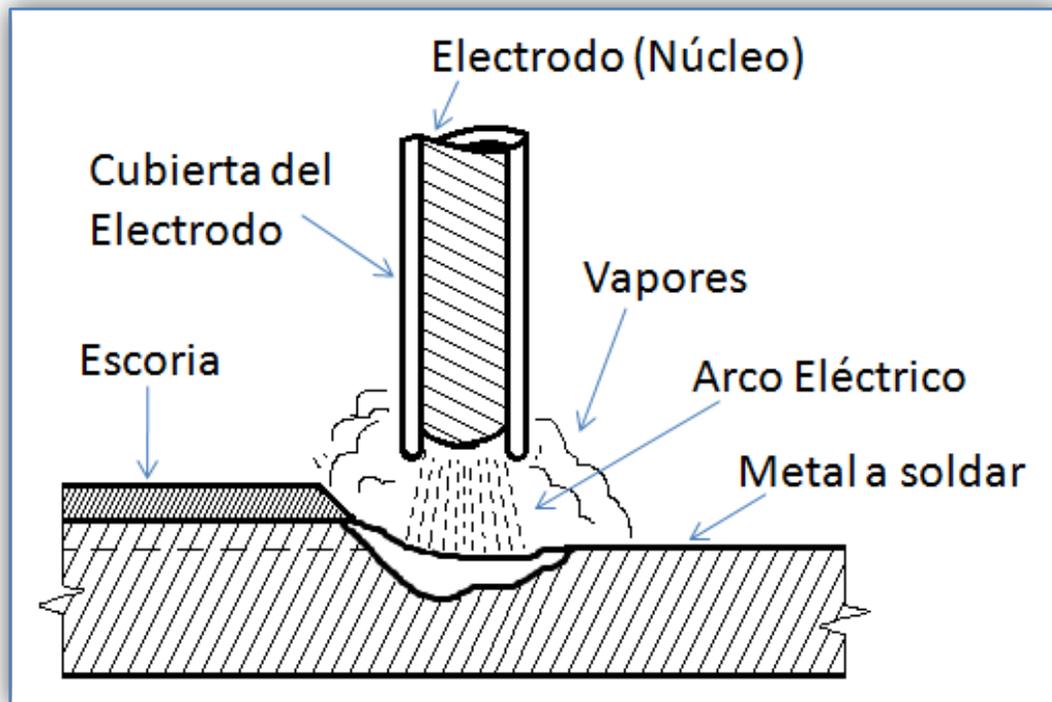


Figura 2.1 Ilustración descriptiva de soldadura por arco eléctrico. Fuente: AWS Welding Handbook 8va Edición vol. 2 Welding Process.

2.2.3 Esfuerzos residuales

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 "DT" y del coeficiente "a" de dilatación del material calentado, coincidiendo con lo planteado por Masubuchi K, Glizmanenko, Guliaev y otros.

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

En el caso de una unión soldada, en la zona de influencia térmica (ZIT), donde se supera el valor de temperatura del campo elástico, la tensión de compresión tiende a superar la de fluencia a esa temperatura, pero en ningún momento lo logra. El proceso inverso ocurre durante el enfriamiento en condiciones de movimiento restringido, las zonas que se vieron durante la deformación plástica en caliente, resultan cortas para ocupar los nuevos espacios alcanzados y aparecen entonces, tensiones térmicas de tracción. Al alcanzarse la temperatura ambiente habrán quedado tensiones térmicas permanentes de tracción cuyo valor es del orden del límite de fluencia del material.

Para que se pueda comprender el fenómeno anterior se explica un clásico sistema de tres barras utilizado por Masubushi K, el cual de una forma elemental explica las variaciones que se producen en una barra central (Figura 2.2).



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.

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. Ver figura 2.2.

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.

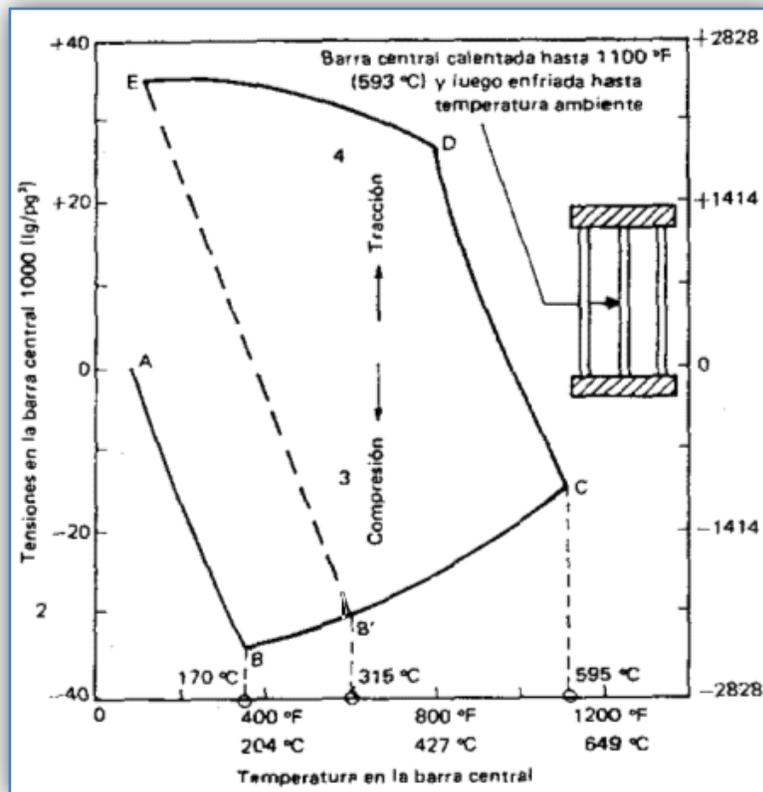


Figura 2.2 Historia de las tensiones y temperaturas para la barra central en el sistema de las tres barra. Fuente: Metal Univers. (2006). Publicación de Metal Univers (Nº 38). España: Nova Ágora, S.L, 2

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.

El curso de los acontecimientos térmicos y movimientos de expansión contracción se puede dividir en 4 secciones lo cual Masubushi K. analiza, según la Figura 2.2.

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.

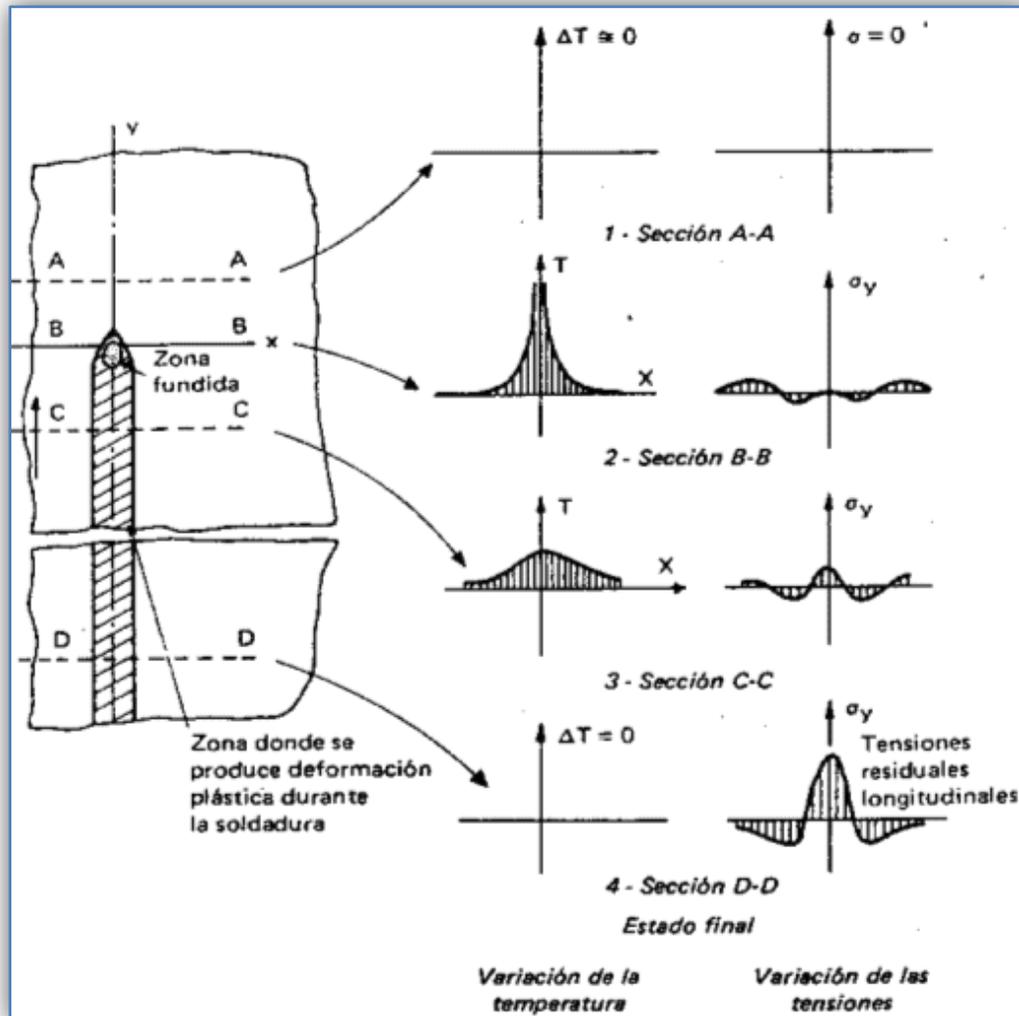


Figura 2.3. Estados transitorios y finales durante la soldadura. Fuente: Metal Univers. (2006).

Publicación de Metal Univers (Nº 38). España: Nova Àgora, S.

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. (Fuente: Bello E., Marchena M., (2008). *Determinación de los esfuerzos residuales en uniones soldadas a tope a través de la teoría de Masubuchi*. Trabajo Especial De Grado. Universidad de Carabobo, Carabobo-Venezuela).

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 se alejan de la línea de fusión de soldadura ambas disminuyen. (Ver figura 2.4).

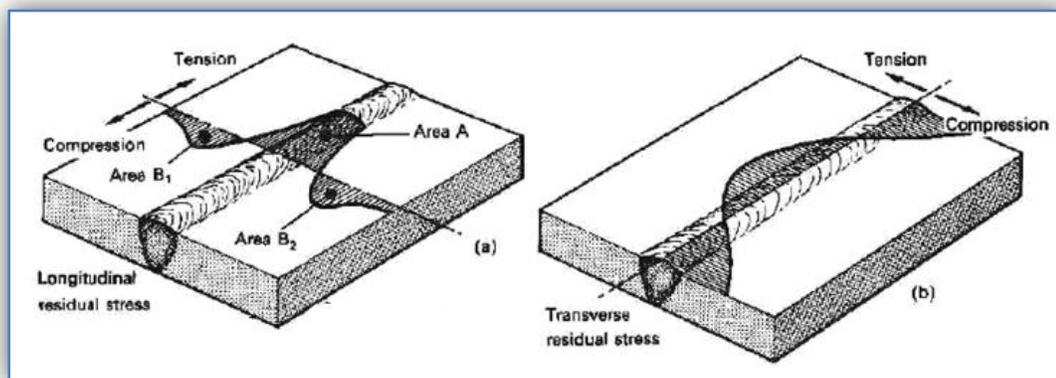


Figura 2.4. Distribución de tensiones residuales longitudinales y transversales de soldadura. Fuente: Metal Univers. (2006). Publicación de Metal Univers (Nº 38). España: Nova Àgora, S.

La figura 2.5 muestra la deflexión que le ocurre a una barra de metal rectangular cuando se somete a un aporte de calor ya sea por el movimiento de una soldadura por arco o una antorcha de oxicorte, en la curva AB ocurre



el calentamiento del material este se expande, si los esfuerzos residuales que se generan después de la expansión del metal desaparecieran se obtiene la curva B'C'D', pero como estos quedan incluidos dentro de la finalización del ciclo se obtiene la curva BCD.

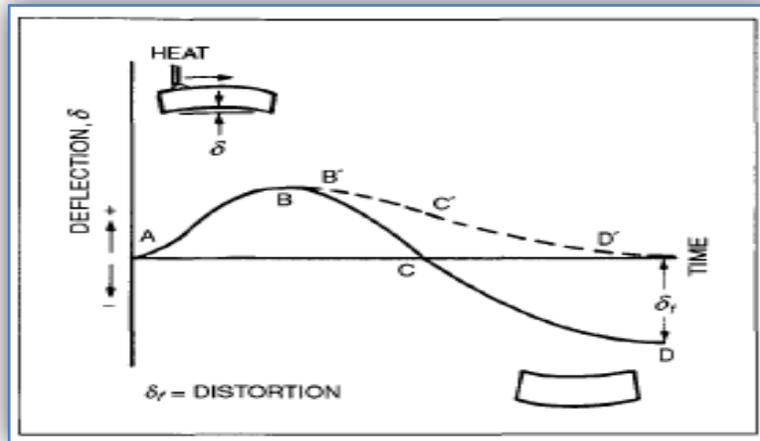


Figura 2.5 Tiempo de cambio del centro de deflexión de una barra de metal bajo la influencia del movimiento longitudinal de una fuente de calor. Fuente: AWS Welding Handbook 9na Edición vol. 1, science and techno.

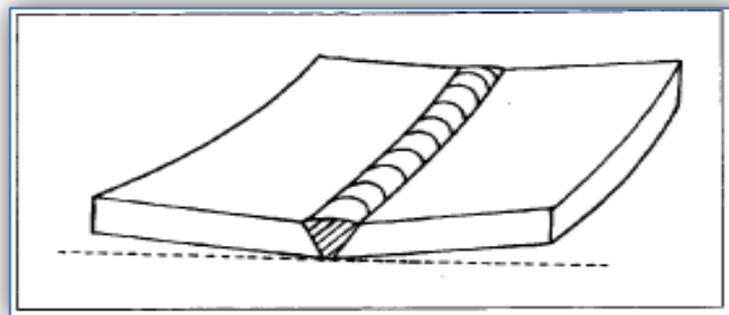


Figura 2.6 Representación esquemática de la distorsión ocurrida en una junta soldada en V. Fuente: AWS Welding Handbook 9na Edición vol. 1, science and techno.

Al igual que en la figura 2.6 se observa que el metal más cercano a la fuente de calor se expande y el más lejano se contrae generándose así en el momento del enfriamiento a temperatura ambiente esfuerzos residuales.



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

- Fractura frágil.
- Fisuración por tenso corrosión.
- Carga crítica de piezas expuestas a colapso elástico.

Estabilidad dimensional después del mecanizado.

Según estudios realizados por Toprac A, 1990. La secuencia de soldadura tiene un efecto poco significativo en las tensiones residuales, pero si influyen en mayor magnitud en las distorsiones, lo cual no coincide con el autor de este trabajo, 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:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad \text{E.2.1}$$

Donde:

P: Fuerza de tracción total, N.

A: Área de la sección transversal, mm².

σ : Esfuerzo, MPa.

E: Módulo de Elasticidad, MPa.

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

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{L_0} \quad \text{E.2.2}$$



Donde:

ΔL : Variación de longitud, mm.

L_0 : Longitud inicial, mm.

ε : Deformación.

En los análisis de tensiones se acostumbra asumir que el material es puramente elástico, homogéneo e isotópico (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 muestra:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{1}{E} \left[\sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_z) \right] \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} \left[\sigma_y - \nu (\sigma_z + \sigma_x) \right] \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} \left[\sigma_z - \nu (\sigma_x + \sigma_y) \right]\end{aligned}\tag{E.2.3}$$

Donde:

E: Módulo de elasticidad longitudinal (en tensión) o módulo de Young, MPa

ν : Coeficiente de Poisson.

Quedando de esta forma demostrado que la tensión residual va a ser proporcional a la deformación del material y viceversa, al igual que lo plantean Glizmanenko y Masubuchi ,1980.

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

Para el proceso de soldadura GMAW podemos tomar en cuenta que la magnitud del flujo de calor está dada por la potencia eléctrica, considerando la eficiencia de la transferencia de calor entre el electrodo y el material base, η viene dado por:

$$Q = \eta . U . I\tag{E.2.4}$$



Donde:

Q: [W] es la entrada neta de calor;

η : es el coeficiente de eficiencia del arco;

U: [V] es el voltaje del arco

I: [A] es la corriente.

(Fuente: Metal Univers. (2006). Publicación de Metal Univers (Nº 38). España: Nova Àgora).

2.2.4 Clasificación de las tensiones residuales

Se clasifican de acuerdo al mecanismo que la producen:

1. Las producidas por diferencias estructurales.
2. Las producidas por una desigual distribución de las tensiones no-elásticas, incluyendo las tensiones plásticas y térmicas.

Tabla 2.1 Factores que contribuyen a las tensiones residuales. Fuente: Origen de las tensiones residuales en la soldadura y sus consecuencias. [on line]. Disponible en: <http://www.mg.com/trabajos36/tensiones-residuales/tensiones-residuales2.shtml>

Parámetros	Descripción
Estructurales	*Geometría de la estructura *Espesor de la Chapa *Tipo de junta
del Material	*Material de metal base *Material del metal aporte
de Fabricación	*Procesos de soldadura *Parámetros del proceso *Parámetros de las piezas

Lo anteriormente expuesto demuestra que cuando se utiliza el proceso de soldadura, ya sea para construir o reparar puede traer alteraciones en los materiales y/o estructuras y que numerosos autores coinciden con sus análisis



de la problemática al igual que en este trabajo por lo que es considerar sus consecuencias nocivas

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

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

(Fuente: Origen de las tensiones residuales en la soldadura y sus consecuencias. [on line]. Disponible en: <http://www.mg.com/trabajos36/tensiones-residuales/tensiones-residuales2.shtml>).

2.2.5 Detección de las tensiones residuales

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

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

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

Estos grupos a su vez tienen diferentes campos de aplicación y utilizan diferentes elementos sensibles para la medición como muestra la tabla 2.2.

En las técnicas de relajación de tensiones, los esfuerzos residuales son determinados midiendo las deformaciones elásticas liberadas. Esto ocurre



cuando los esfuerzos residuales son liberados mediante el corte de la muestra en pedazos o por la extracción de un pedazo de la muestra.

En la mayoría de los casos se utilizan para medir la deformación liberada galgas eléctricas. Existe una variedad de técnicas que dependen del seccionamiento de las muestras para determinar los esfuerzos residuales. Algunas técnicas se aplican principalmente a cilindros, tuberías o sólidos tridimensionales (Ver tabla 2.2).

Las deformaciones elásticas en los metales que tienen estructuras cristalinas pueden ser determinadas por la medición de sus parámetros reticulares utilizando técnicas de difracción por rayos-x. Puesto que el parámetro reticular de un metal en estado no tensionado es conocido o puede ser determinado de forma separada, las deformaciones elásticas en el metal pueden ser determinadas no destructivamente sin maquinar o barrenar.

En la actualidad se tienen disponibles dos técnicas: la de película de rayos-x y la del difractómetro por rayos-x. Con la técnica de difracción de rayos-x, la deformación superficial puede ser determinada en un área pequeña, a una profundidad y diámetro de 0,003 mm. Las técnicas de difracción de rayos-x son las únicas técnicas aplicables para medir tales esfuerzos residuales como los de cajas de bolas (rodamientos) y dientes de engranes y esfuerzos residuales superficiales posterior al maquinado o rectificado.

Sin embargo, estas técnicas por rayos-x tienen varias desventajas. Primero, son procesos más bien lentos. En cada punto de medición debe hacerse esta en dos direcciones requiriendo cada una de 15 a 30 minutos de tiempo de exposición para la técnica de película. Segundo, la medición no es



muy precisa, especialmente cuando se aplica a materiales tratados térmicamente en los cuales la estructura se distorsiona.

Tabla 2.2 Clasificación de las técnicas para la medición de tensiones residuales.

Fuente: Origen de las tensiones residuales en la soldadura y sus consecuencias. [on line].

Disponible en: <http://www.mg.com/trabajos36/tensiones-residuales/tensiones-residuales2.shtml>

A-1 Relajacion de Tensiones utilizando galgas eléctricas.	Aplicable principalmente a chapas	1. Técnica de seccionado utilizando resistencias eléctricas (strain gauges). 2. Técnica de Gunnet. 3. Técnica de barrenado de Mathar-Soete. 4. Técnica de fresado sucesiva de Stablein.
	Aplicable principalmente a cilindros sólidos y tubos.	5. Técnica de maquinado sucesivo de Heyn-Bauer. 6. Técnica de trepanación de Mesnager-Sachs.
	Aplicable principalmente a sólidos tridimensionales.	7. Técnica de barrenado de Gunnert. 8. Técnica de seccionado de Rosenthal-Norton.
A-2 Relajación de tensiones utilizando aparatos diferente a los anteriores.		9. técnica utilizando sistema divisor de retícula. 10. Técnica de barrenado con capa frágil. 11. Técnica de barrenado con capa fotoelástica.
B- Difracción por rayos X.		12. Técnica de película de rayos X. 13. Técnica de difractor de rayos X.
C- Utilización de propiedades sensibles a los	Técnicas ultrasónicas	14. Técnica de ondas ultrasónicas polarizadas. 15. Técnica de atenuación ultrasonica.
D- Técnica de Agrietamiento.		16. Técnica de durezas. 17. Técnica de agrietamiento Hidrógeno-Inducido. 18. Técnica de agrietamiento Esfuerzo-Corrosión.

Se han hecho intentos de determinar los esfuerzos residuales en los metales mediante la medición de propiedades sensibles a los esfuerzos. Las



técnicas propuestas de medición de esfuerzos incluyen los métodos ultrasónicos y el de dureza.

Las técnicas ultrasónicas pueden utilizar las ondas ultrasónicas polarizadas y hacer uso del cambio inducido por esfuerzos en el ángulo de polarización de las ondas ultrasónicas polarizadas (de forma semejante a las técnicas fotoelásticas) o hacer uso de los cambios inducidos por esfuerzos en la absorción de ondas ultrasónicas es decir, atenuación ultrasónica. Ninguna de estas técnicas ha sido desarrollada mas allá de la etapa de laboratorio y ninguna ha sido utilizada con éxito para la medición de esfuerzos residuales en las construcciones soldadas. Se han desarrollado técnicas para el estudio de los esfuerzos residuales observando las grietas producidas por estos en las muestras. Las grietas pueden ser inducidas por el hidrógeno o por el esfuerzo corrosión (*stress-corrosión*). Las técnicas por agrietamiento son útiles para el estudio de los esfuerzos residuales en modelos de estructuras complejas los cuales tienen una distribución complicada de esfuerzos residuales. (Fuente: Origen de las tensiones residuales en la soldadura y sus consecuencias. [on line]. Disponible en: <http://www.mg.com/trabajos36/tensiones-residuales/tensiones-residuales2.shtml>).

2.2.6 Ensayo a tracción

El ensayo de tracción de un material consiste en someter a una probeta normalizada realizada con dicho material a un esfuerzo axial de tracción creciente hasta que se produce la rotura de la probeta. Este ensayo mide la resistencia de un material a una fuerza estática o aplicada lentamente.

En un ensayo de tracción pueden determinarse diversas características de los materiales elásticos:



- **Módulo de elasticidad o Módulo de Young**, que cuantifica la proporcionalidad anterior.
- **Coefficiente de Poisson**, que cuantifica la razón entre el alargamiento longitudinal y el acortamiento de las longitudes transversales a la dirección de la fuerza.
- **Límite de proporcionalidad**, valor de la tensión por debajo de la cual el alargamiento es proporcional a la carga aplicada.
- **Límite de fluencia o límite elástico aparente**, valor de la tensión que soporta la probeta en el momento de producirse el fenómeno de la cedencia o fluencia. Este fenómeno tiene lugar en la zona de transición entre las deformaciones elásticas y plásticas y se caracteriza por un rápido incremento de la deformación sin aumento apreciable de la carga aplicada.
- **Límite elástico (límite elástico convencional o práctico)**, valor de la tensión a la que se produce un alargamiento prefijado de antemano (0,2%, 0,1%, etc.) en función del extensómetro empleado.
- **Carga de rotura o resistencia a la tracción**, carga máxima resistida por la probeta dividida por la sección inicial de la probeta.
- **Alargamiento de rotura**, incremento de longitud que ha sufrido la probeta. Se mide entre dos puntos cuya posición está normalizada y se expresa en tanto por ciento.

- **Estricción**, es la reducción de la sección que se produce en la zona de la rotura.

En la figura 2.7 se ilustran las características antes descritas.

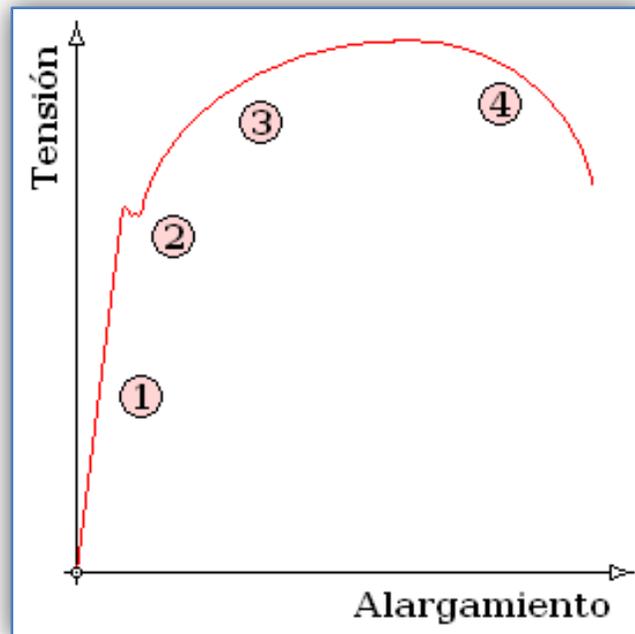


Figura 2.7 Gráfica obtenida por computadora en el ensayo de tensión. Fuente:
Timoshenko S.,(1991).Mecánica de materiales, 2da Edición

En el ensayo se mide la deformación (alargamiento) de la probeta entre dos puntos fijos de la misma a medida que se incrementa la carga aplicada, y se representa gráficamente en función de la tensión (carga aplicada dividida por la sección de la probeta). En general, la curva tensión-deformación así obtenida presenta cuatro zonas diferenciadas:

1. **Deformaciones elásticas:** En esta zona las deformaciones se reparten a lo largo de la probeta, son de pequeña magnitud y, si se retirara la carga aplicada, la probeta recuperaría su forma inicial. El coeficiente de proporcionalidad entre la tensión y la deformación se



denomina módulo de elasticidad o de Young y es característico del material. Así, todos los aceros tienen el mismo módulo de elasticidad aunque sus resistencias puedan ser muy diferentes. La tensión más elevada que se alcanza en esta región se denomina límite de fluencia y es el que marca la aparición de este fenómeno. Pueden existir dos zonas de deformación elástica, la primera recta y la segunda curva, siendo el límite de proporcionalidad el valor de la tensión que marca la transición entre ambas. Generalmente, este último valor carece de interés práctico y se define entonces un límite elástico (convencional o práctico) como aquél para el que se produce un alargamiento prefijado de antemano (0,2%, 0,1%, etc.). Se obtiene trazando una recta paralela al tramo proporcional (recto) con una deformación inicial igual a la convencional.

2. Fluencia o cedencia: Es la deformación brusca de la probeta sin incremento de la carga aplicada. El fenómeno de fluencia se da cuando las impurezas o los elementos de aleación bloquean las dislocaciones de la red cristalina impidiendo su deslizamiento, mecanismo mediante el cual el material se deforma plásticamente. Alcanzado el límite de fluencia se logra liberar las dislocaciones produciéndose la deformación bruscamente. La deformación en este caso también se distribuye uniformemente a lo largo de la probeta pero concentrándose en las zonas en las que se ha logrado liberar las dislocaciones (bandas de Lüders). No todos los materiales presentan este fenómeno, en cuyo caso la transición entre la deformación elástica y plástica del material no se aprecia de forma clara.

3. Deformaciones plásticas: Si se retira la carga aplicada en dicha zona, la probeta recupera sólo parcialmente su forma quedando deformada permanentemente. Las deformaciones en esta región son más acusadas que en la zona elástica.



4. **Estricción:** Llegado un punto del ensayo, las deformaciones se concentran en la parte central de la probeta apreciándose una acusada reducción de la sección de la probeta, momento a partir del cual las deformaciones continuarán acumulándose hasta la rotura de la probeta por esa zona. La estricción es la responsable del descenso de la curva tensión-deformación; realmente las tensiones no disminuyen hasta la rotura, sucede que lo que se representa es el cociente de la fuerza aplicada (creciente) entre la sección inicial y cuando se produce la estricción la sección disminuye, efecto que no se tiene en cuenta en la representación gráfica. Los materiales frágiles no sufren estricción ni deformaciones plásticas significativas, rompiéndose la probeta de forma brusca. Terminado el ensayo se determina la carga de rotura, carga última o resistencia a la tracción: la máxima resistida por la probeta dividida por su sección inicial, el alargamiento en (%) y la estricción en la zona de la rotura. (Fuente: Timoshenko S.,(1991).Mecánica de materiales, 2da Edición).

2.2.7 Tratamientos térmicos

Se conoce como tratamiento térmico el proceso al que se someten los metales u otros sólidos con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas, especialmente la dureza, la resistencia y la tenacidad. Los materiales a los que se aplica el tratamiento térmico son, básicamente, el acero y la fundición, formados por hierro y carbono. También se aplican tratamientos térmicos diversos a los sólidos cerámicos.

Las características mecánicas de un material dependen tanto de su composición química como de la estructura cristalina que tenga. Los tratamientos térmicos modifican esa estructura cristalina sin alterar la



composición química, dando a los materiales unas características mecánicas concretas, mediante un proceso de calentamientos y enfriamientos sucesivos hasta conseguir la estructura cristalina deseada. Entre estas características están:

- **Resistencia al desgaste:** Es la resistencia que ofrece un material a dejarse erosionar cuando está en contacto de fricción con otro material.
- **Tenacidad:** Es la capacidad que tiene un material de absorber energía sin producir fisuras (resistencia al impacto).
- **Maquinabilidad:** Es la facilidad que posee un material de permitir el proceso de mecanizado por arranque de viruta.
- **Dureza:** Es la resistencia que ofrece un acero para dejarse penetrar.

Las propiedades mecánicas de las aleaciones de un mismo metal, y en particular de los aceros, residen en la composición química de la aleación que los forma, y el tipo de tratamiento térmico a los que se les somete. Los tratamientos térmicos modifican la estructura cristalina que forman los aceros sin variar la composición química de los mismos.

Esta propiedad de tener diferentes estructuras de grano con la misma composición química se llama polimorfismo y es la que justifica los tratamientos térmicos. Técnicamente el polimorfismo es la capacidad de algunos materiales de presentar distintas estructuras cristalinas, con una única composición química, el diamante y el grafito son polimorfismos del carbono. La α -ferrita, la austenita y la δ -ferrita son polimorfismos del hierro. Esta propiedad en un elemento químico puro se denomina alotropía.



El tratamiento térmico en el material es uno de los pasos fundamentales para que pueda alcanzar las propiedades mecánicas para las cuales está creado. Este tipo de procesos consisten en el calentamiento y enfriamiento de un metal en su estado sólido para cambiar sus propiedades físicas. Con el 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. La clave de los tratamientos térmicos consiste en las reacciones que se producen en el material, tanto en los aceros como en las aleaciones no férricas, y ocurren durante el proceso de calentamiento y enfriamiento de las piezas, con unas pautas o tiempos establecido.

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–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. Los principales tratamientos térmicos son:

- **Temple:** Su finalidad es aumentar la dureza y la resistencia del acero. Para ello, se calienta el acero a una temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior A_c (entre $900-950^{\circ}\text{C}$) y se enfría luego más o menos rápidamente (según características de la pieza) en un medio como agua, aceite, etcétera.

- **Revenido:** Sólo se aplica a aceros previamente templados, para disminuir ligeramente los efectos del temple, conservando parte de la dureza y



aumentar la tenacidad. El revenido consigue disminuir la dureza y resistencia de los aceros templados, se eliminan las tensiones creadas en el temple y se mejora la tenacidad, dejando al acero con la dureza o resistencia deseada. Se distingue básicamente del temple en cuanto a temperatura máxima y velocidad de enfriamiento.

- **Recocido:** Consiste básicamente en un calentamiento hasta temperatura de austenitización (800-925°C) seguido de un enfriamiento lento. Con este tratamiento se logra aumentar la elasticidad, mientras que disminuye la dureza. También facilita el mecanizado de las piezas al homogeneizar la estructura, afinar el grano y ablandar el material, eliminando la acritud que produce el trabajo en frío y las tensiones internas.

- **Normalizado:** Tiene por objeto dejar un material en estado normal, es decir, ausencia de tensiones internas y con una distribución uniforme del carbono. Se suele emplear como tratamiento previo al temple y al revenido. (Fuente: Timoshenko S., (1991). *Mecánica de Materiales*, Segunda Edición, Stanford University, grupo editorial Iberoamérica).

2.2.8 Ley de Hooke o Ley de elasticidad

En la mayoría de los materiales, una relación proporcional se encuentra entre la deformación y el esfuerzo aplicado, siempre y cuando el límite elástico no sea superado. El límite de esfuerzo a la que un material mantiene esta relación proporcional entre la deformación y el esfuerzo se llama límite "proporcional" (cada material tiene un límite de proporcional y límite elástico diferente). La mayoría de los cálculos teóricos de hoy en día de la resistencia de los materiales se basan en esta ley y son aplicados en el diseño de máquinas y estructuras.



A continuación se presenta la ecuación de la Ley de Hooke.

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad \text{E.2.5}$$

Donde:

σ : Esfuerzo.

ε : Deformación unitaria.

E : Módulo de Young.

(Fuente: Bello E., Marchena M., (2008). *Determinación de los esfuerzos residuales en uniones soldadas a tope a través de la teoría de Masubuchi*. Trabajo Especial De Grado. Universidad de Carabobo, Carabobo-Venezuela).

2.2.9 Galgas extensométricas

La extensometría es una técnica utilizada para el análisis experimental de tensiones y deformaciones en estructuras mecánicas. Estas estructuras presentan deformaciones debido a que son sometidas a estados de carga o por efecto de temperatura. Es importante cuantificar la extensión o magnitud de estas deformaciones y muchas veces requieren ser monitoreadas constantemente a través de diversas maneras. Algunos de las herramientas utilizadas para cuantificar las deformaciones son relojes comparadores o detectores electrónicos de deslizamiento, por fotoelasticidad y por Galgas extensométricas, entre otros. Siendo las galgas extensométricas y los medidores de deformaciones los métodos más versátiles de los mencionados anteriormente debido a su relación de costo-precisión.

Los extensómetros eléctricos son ampliamente utilizados para medir deformaciones en estructuras como puentes, maquinarias, locomotoras, embarcaciones y para el análisis de elementos de maquinas como pernos, tornillos y juntas soldadas.



En 1856 William Thomson, mejor conocido como Lord Kelvin, presentó ante la Sociedad Filosófica Real de Londres los resultados de un experimento envolviendo una resistencia eléctrica de hierro y cobre mientras era sometida a esfuerzos combinados de flexión, corte y torsión. Las observaciones de Kelvin fueron consistentes con una relación entre la resistencia eléctrica y algunas propiedades físicas del conductor, según la ecuación:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad \text{E.2.6}$$

Donde:

R: Resistencia eléctrica.

ρ : Constante de conductividad.

L: Longitud del conductor.

A: Área de la sección transversal.

La resistencia es directamente proporcional a la longitud e inversamente proporcional al área de la sección transversal.

Cuando una barra metálica es estirada, sufre un alargamiento en su longitud inicial, conservando su volumen, este alargamiento se manifiesta en una reducción del área de la sección transversal. La resistencia eléctrica de la barra aumenta como consecuencia de este cambio geométrico. De la misma manera cuando dicha barra es comprimida, la resistencia disminuye debido al aumento de la sección transversal y a la reducción de su longitud inicial. La relación entre este alargamiento y la variación de la sección transversal puede ser expresada a través del coeficiente de Poisson (ν).

$$\nu = - \frac{dD/D}{dL/L} = \frac{\epsilon_L}{\epsilon_a} \quad \text{E.2.7}$$

Donde:

ν : Coeficiente de Poisson



D: Dimensión de la sección transversal.

L: Longitud.

ϵ_L : Deformación lateral.

ϵ_a : Deformación axial.

Esta relación demuestra básicamente que cuando la longitud disminuye para un material en compresión la sección transversal aumenta, y viceversa para un aumento de la longitud (tracción) la sección transversal disminuye.

Una relación básica entre deformación y la variación de la resistencia del extensómetro eléctrico puede ser expresada como:

$$\epsilon = \frac{1}{F} \frac{\Delta R}{R} \quad \text{E.2.8}$$

Donde:

ϵ : Deformación.

F: Valor de medición.

R: Resistencia del medidor. (Para un medidor típico, R es 120 Ω).

En su forma más completa, una galga extensométrica, strain gage o simplemente extensómetro, es un resistor compuesto de una muy delgada capa de material conductor, depositado sobre un compuesto aislante. Éste entre tanto es colocado sobre la estructura a probar con la ayuda de adhesivos. Pequeñas variaciones de dimensiones de la estructura son transmitidas mecánicamente a la galga extensométrica, y por consiguiente son transformadas en variaciones equivalentes a su resistencia eléctrica (es ésta la razón por la cual las mencionadas galgas son conocidas también como transductores).

Las galgas extensométricas son usadas para medir variaciones de carga, presión, torque, deslizamiento, tensión, compresión, aceleración y vibración entre otras magnitudes. La selección del extensómetro adecuado para determinada aplicación es orientada por las siguientes características: material del filamento metálico y su construcción, material del soporte aislante, material del adhesivo, tratamiento y configuración del medidor. Los diseños de las galgas incorporan varias características como: factor de medición, resistividad, insensibilidad a la temperatura, estabilidad eléctrica, resistencia mecánica, facilidad de manipulación e instalación, baja histéresis y durabilidad. La sensibilidad a la temperatura es un punto fundamental en el uso de la strain gage, y frecuentemente un circuito de medición consta de un compensador de temperatura. De la misma forma el tipo de adhesivo usado para fijar la galga a la estructura es de suma importancia, ya que el adhesivo debe permitir el paso de las deformaciones de la estructura analizada con un mínimo nivel de interferencia. (Fuente: Definición y Tipos de galgas extensométricas. (2009). [on line]. Disponible en: Marcos Potrnoi <http://www.geocities.com/ResearchTriangle/4480/academic-files/extensometria.html>).

2.2.10 Tipos de extensómetros eléctricos (strain gages)

- **Extensómetro axial único:** Utilizado cuando la deformación ocurre en un solo sentido.

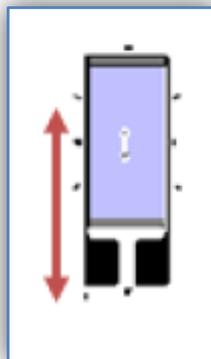


Figura 2.8 Galga Uniaxial. Fuente: Definición y Tipos de galgas extensométricas. (2009). [on line]. Disponible en: Marcos Potrnoi <http://www.geocities.com/ResearchTriangle/4480/academic-files/extensometria.html>.

- **Extensómetro axial múltiple:** Utilizado cuando la deformación ocurre en más de una dirección. (Cuando se sabe que la deformación ocurrirá en dos direcciones, la configuración es dada por dos extensómetros montados sobre una misma base, sensibles a dos direcciones diferentes. Cuando la(s) dirección(es) de la(s) deformación(es) es (son) desconocida(s), se emplea una configuración dada por tres extensómetros montados sobre una misma base, sensible a tres direcciones).

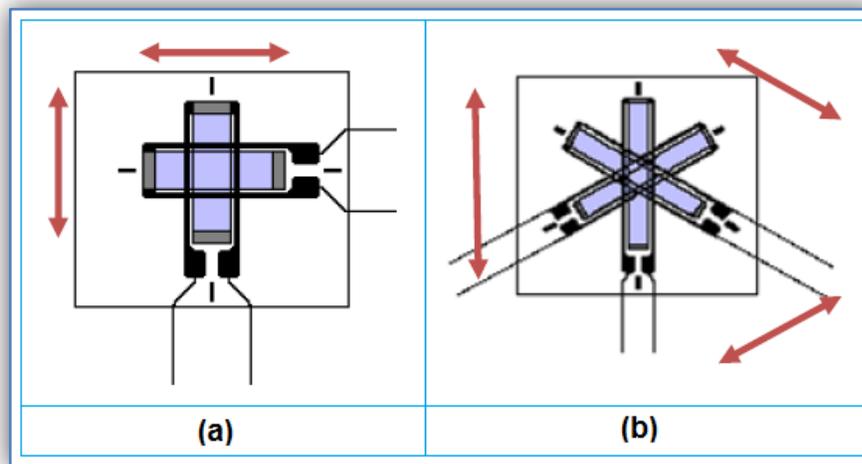


Figura 2.9 Configuración Multiaxial. (a) Biaxial. (b) Triaxial. Fuente: Definición y Tipos de galgas extensométricas. (2009). [on line]. Disponible en: Marcos Potrnoi <http://www.geocities.com/ResearchTriangle/4480/academic-files/extensometria.html>.

- **Otros tipos de Configuraciones Extensométricas Multi-axiales:**
 - **Tipo diafragma:** Se crea utilizando cuatro extensómetros sobre una misma base, colocados en dos posiciones diferentes. Es muy utilizado como transductores de presión.
 - **Para tensiones residuales:** Son tres extensómetros sobre una base debidamente posicionados para la utilización en el método de medida de tensión residual.



- **Para transductores de carga:** Son dos extensómetros dispuestos lado a lado, sobre una misma base, para la utilización en celdas de carga (para medición de tensión y compresión).

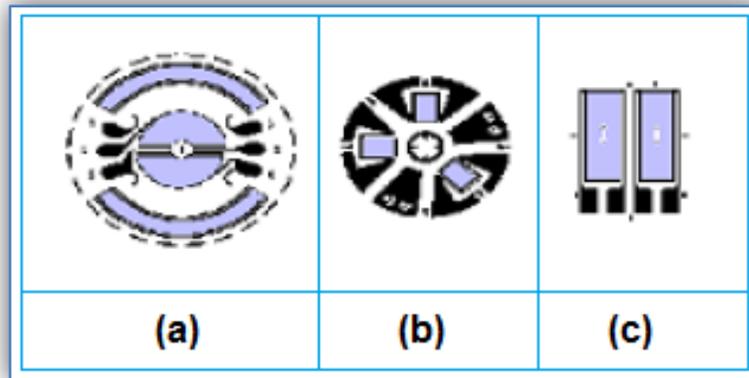


Figura 2.10 Otras Configuraciones Extensométricas. (a) Tipo diafragma. (b) Para tensiones residuales. (c) Para transductores de carga. Fuente: Definición y Tipos de galgas extensométricas. (2009). [on line]. Disponible en: Marcos Potrnoi <http://www.geocities.com/ResearchTriangle/4480/academic-files/extensometria.html>.

2.2.11 Puente de Wheatstone

Se presenta la descripción ilustrativa del puente de Wheatstone:

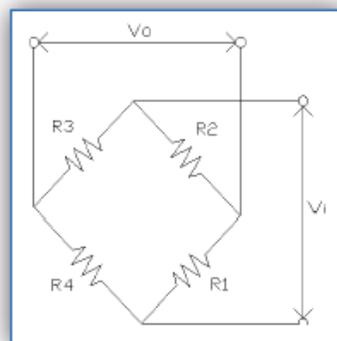


Figura 2.11 Puente de Wheastone. Fuente: Definición y Tipos de galgas extensométricas. (2009). [on line]. Disponible en: Marcos Potrnoi <http://www.geocities.com/ResearchTriangle/4480/academic-files/extensometria.html>.

Es un circuito eléctrico adecuado para la detección de cambios en la resistencia. Por lo tanto, es utilizado para medir las variaciones de resistencia de una galga extensométrica. El puente se configura mediante la combinación de cuatro resistencias (R_1 , R_2 , R_3 y R_4), voltaje de excitación y voltaje de salida del puente; como se muestra en la figura 2.11.

De donde se obtiene que:

$$V_0 = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \times V_i \quad \text{E.2.9}$$

Y para que V_0 sea Cero, con cualquier voltaje de excitación (voltaje de entrada) y ocasionando el estado de equilibrio del puente de Wheatstone; tenemos entonces que:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 \quad \text{E.2.10}$$

Cabe resaltar que cuando el puente pierde dicho equilibrio, se genera una diferencia de potencial, correspondiente a la variación de resistencias.

Ahora, sustituyendo una de las resistencias por una galga extensométrica.

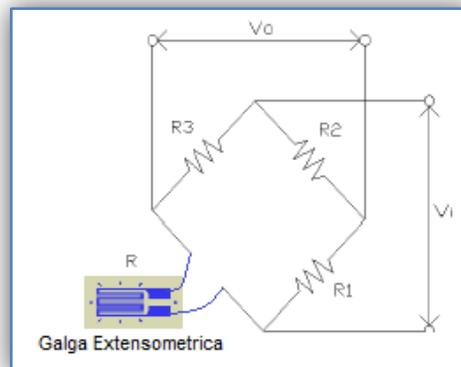


Figura 2.12 Puente de Wheatstone con una galga sustituyendo una resistencia.



Entonces, la ecuación referente al voltaje de salida queda de la siguiente forma:

$$V_0 = \frac{(R_1 + \Delta R)R_3 - R_2R_4}{(R_1 + \Delta R + R_2)(R_3 + R_4)} \times V_i \quad \text{E.2.11}$$

Permaneciendo la condición de equilibrio del puente, se tiene:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R \quad \text{E.2.12}$$

Donde:

R: Valor de la resistencia que presenta la galga extensométrica.

Entonces se obtiene:

$$V_0 = \frac{R^2 + R\Delta R - R^2}{(2R + \Delta R)2R} \times V_i \quad \text{E.2.13}$$

Dado que $R \gg \Delta R$.

$$V_0 = \frac{k \cdot \varepsilon \cdot V_i}{4} \quad \text{E.2.14}$$

Despejando ε .

$$\varepsilon = \frac{4V_0}{K \cdot V_i} \quad \text{E.2.15}$$

Obteniendo con la ecuación 2.15; una correlación entre la deformación unitaria que se produce en un material, utilizando galgas extensométricas como instrumento de medida. (Fuente: Definición y Tipos de galgas extensométricas. (2009). [on line]. Disponible en: Marcos Potrnoi <http://www.geocities.com/ResearchTriangle/4480/academic-files/extensometria.html>).



CAPÍTULO III

Marco Metodológico



3.1 Nivel de la investigación

La presente investigación posee un carácter explorativo y descriptivo, ya que se aplican técnicas experimentales basada en la teoría de Masubichi, en donde se determina el esfuerzo residual de un metal mediante la diferencia de los esfuerzos obtenidos por ensayos de tracción.

En otras palabras, se intenta caracterizar un fenómeno físico poco estudiado con la finalidad de obtener resultados que representen aproximadamente un comportamiento.

3.2. Diseño de la investigación

Este trabajo de investigación pretende determinar los esfuerzos residuales que se presentan en el acero ASTM A-36 después de someterlo a un proceso de soldadura a tope por arco eléctrico con electrodo revestido, para distintos espesores de cordón, a través del cumplimiento de los objetivos.



3.2.1. Determinación experimental de los esfuerzos residuales

Es necesario el cumplimiento de cierta metodología para lograr la determinación de los esfuerzos residuales experimentales, a continuación se presenta un diagrama con los pasos a seguir:



Figura 3.1 Diagrama, pasos a realizar para determinar esfuerzos residuales.

3.2.1.1. Material de las probetas

El material seleccionado para la fabricación de las probetas, es Acero ASTM A-36, cuyas propiedades mecánicas son: Límite de Fluencia de 250 MPa (36.000 psi), Resistencia a tracción 400-550 MPa (58.000-80.000 psi) y elongación en 8" y 2", 20% min y 23% min respectivamente, además de contar con un Módulo de Elasticidad (Young) de 200 GPa (29.007 ksi). (Datos Obtenidos del Compendio de Normas para Productos de Acero. (2002). Gerdau AZA S.A.).

3.2.1.2. Cortado de las láminas y biselado de las mismas

Se consiguió una lamina de amplia dimensión, de la cual se cortaron 12 láminas de trabajo de 250x125x6 mm (figura 3.2); para posteriormente realizarle el biselado correspondiente según norma ANSI/AWS A2.4-98; y así unir las mediante el proceso de soldadura (figura 3.3), (se obtuvieron 6 uniones, de ese grupo de 6, cada par que lo conformaba concordaban en grosor de cordón de soldadura, se lograron 3 pares con esa característica).

A continuación se ilustra el proceso:

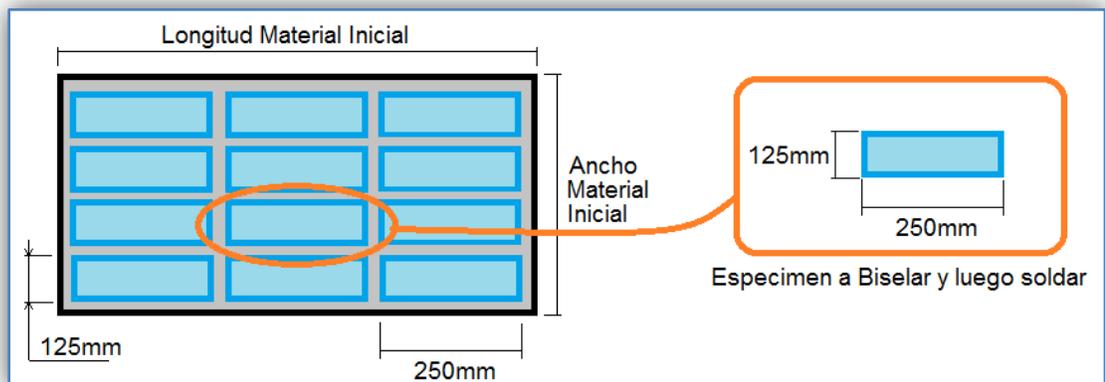


Figura 3.2 Obtención de las laminas de trabajo.

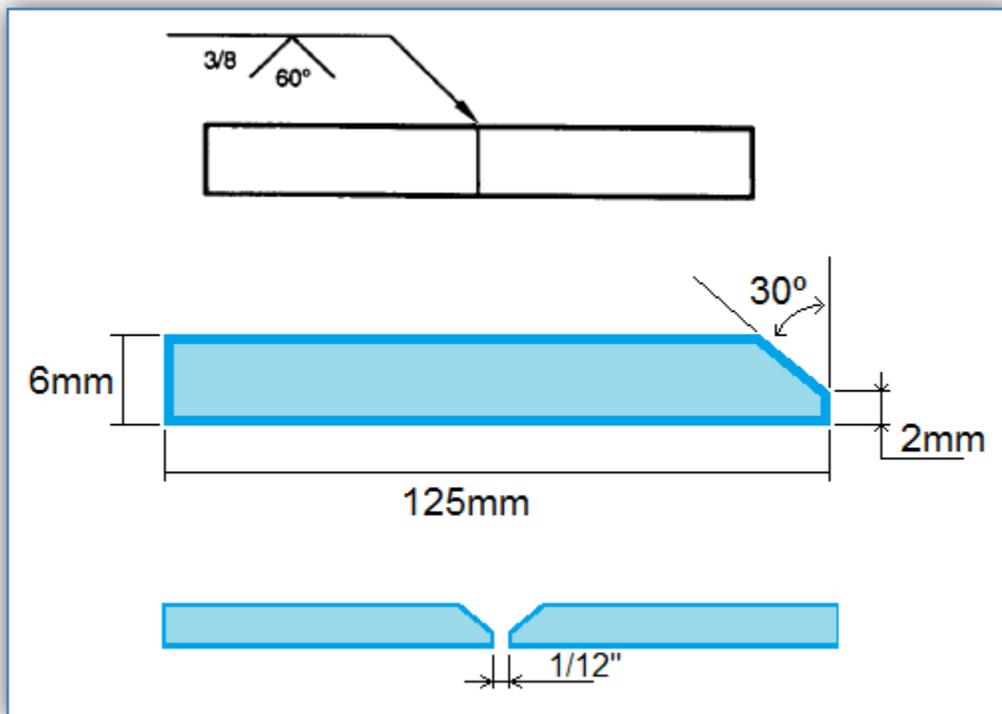


Figura 3.3 Biselado correspondiente según norma ANSI/AWS A2.4-98. Fuente: ANSI/AWS A2.4-98 Standard symbols for welding and brazing examination.

Se biseló uno de los lados más largo de cada lámina de trabajo (lado de longitud igual a 250mm); para lograr el diseño de junta a tope con bordes en “V”, ángulo de 60° y separación de raíz de 1/12” (equivalente a 2 mm). En el diseño de la junta, se consideró el espesor de la chapa, así como el proceso de soldeo establecido, según las especificaciones AWS.

3.2.1.3 Soldadura de las probetas

Las probetas fueron soldadas a tope, utilizando el método de soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW); además debieron permanecer sujetas a las siguientes consideraciones:



- El cordón de soldadura fue creado de una sola pasada, siguiendo una trayectoria rectilínea.
- La soldadura se realizó en un bisel de 30° como mínimo en 3/8 de la longitud del espesor de cada lámina, según indican las normas ANSI/AWS A2.4-98 (4.1.2 y 4.2.7).
- Se realizaron cordones de: 3 grosores diferentes; siendo así, existen 3 pares de láminas soldadas que compartirán el mismo grosor de cordón.
- El electrodo a utilizado se describe bajo el código: E6010

Donde:

La soldadura se realizó en la posición de plano a tope (electrodo perpendicular a la superficie de las láminas a soldar). Cabe destacar que la posición plana, es la más cómoda y con mayor rendimiento. El electrodo E-6010 fue utilizado debido a que es un electrodo de alta penetración para soldar en toda posición, y posee también una alta resistencia.

Además es uno de los electrodos recomendado por el compendio de normas para el producto de acero (Gerdau Aza – 2002), como lo indica la figura 3.4 a continuación:

Recomendaciones para soldar principales aceros estructurales.												
Norma o Especific.	Designación el Acero	Clasificación de los electrodos según AWS										Precalentamiento recomendado °C
		E6010	E6011	E6012	E6013	E6027 (*)	E7014 (***)	E7024 (*)	E7018 (**)	E7018 (**) A1	E8016 C1	
203 Of 78	A42-27ES	•	•	•	•	•	•	•	•			90-150
	A52-34ES								•		•	90-150
ASTM	A36	•	•	•	•	•	•	•	•			90-150
SAE o AISI	1010 al 1020	•	•	•	•	•	•	•	•	•		Sobre 90
	1033 al 1045								•		•	150-260

Figura 3.4 Electrodos recomendados para soldar acero al carbono ASTM A-36.

Fuente: Compendio de normas para el producto de acero (Gerdau Aza – 1ra edición, 2002).



La unidad utilizada para realizar la soldadura se describe en la tabla 3.2

Tabla 3.1 Descripción de la Máquina para soldadura SWAM. Taller St.Agustin (Valencia-Carabobo).

Nombre y Modelo	Lincoln ArcWelder IDEALARC TM 400/400	
Entrada	230 , 460 V 146 , 73 A	
Salida	400/400 A (CD/CA) 40 V	
Información Adicional	Ciclos Entrada: 60 Salida Max OCV: 76	

3.2.1.4 Mecanizado de las probetas

Para mecanizar las muestras de acero, se cumplió con el procedimiento establecido por la norma ASTM E-8, donde se indican las dimensiones establecidas para la realización del ensayo a tracción, asegurando la validez de los resultados. El método seleccionado para obtener la forma de las probetas es el de mecanizado metal-metal. Es recomendable que de poder realizarse por otro método se utilice Chorro de agua o electro-erosión, ya que son unos de los métodos que menos afectan las condiciones normales de resistencia del acero, al mecanizarlo. Para instaurar las láminas de acero se utilizó una cizalla para dimensionar las

láminas, y así otorgarles una dimensión tal, que pudo facilitar su mecanizado en la fresadora al momento de obtener su forma final.

A continuación se presenta las dimensiones de las probetas según norma ASTM E-8.

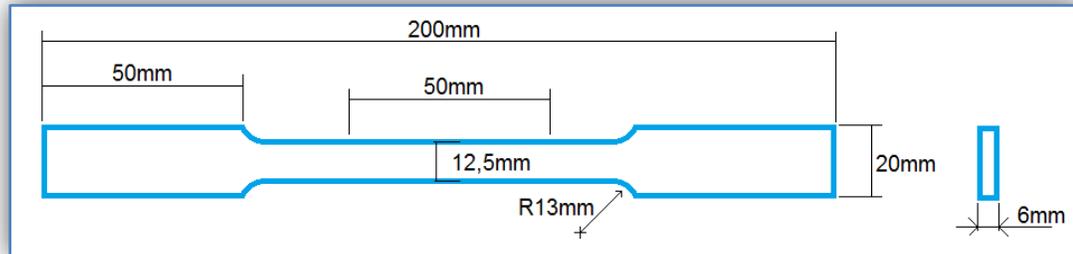


Figura 3.5 Dimensiones de probeta de tracción plana, según norma ASTM E-8.

Fuente: ASTM E- 8M – 01. (2001) Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.

Ya conociendo la forma y dimensiones de la probeta para los ensayos, se ilustra la misma con el cordón de soldadura y los tres tipos de grosores (figura 3.6).

La diferencia entre los grosores de cordones de soldadura se logró debido a la menor o mayor contribución de material de aporte al momento de soldar gracias a variaciones de velocidad a la hora de realizar los cordones.

Cabe destacar que existen variaciones de grosor en el mismo cordón, por lo cual se asignaron tres rangos de grosor de cordón de soldadura y así asignar cada probeta a un rango. Los tres grosores de los que se hablará en este informe son el promedio de cada rango, para así facilitar el entendimiento y referencias de este trabajo.

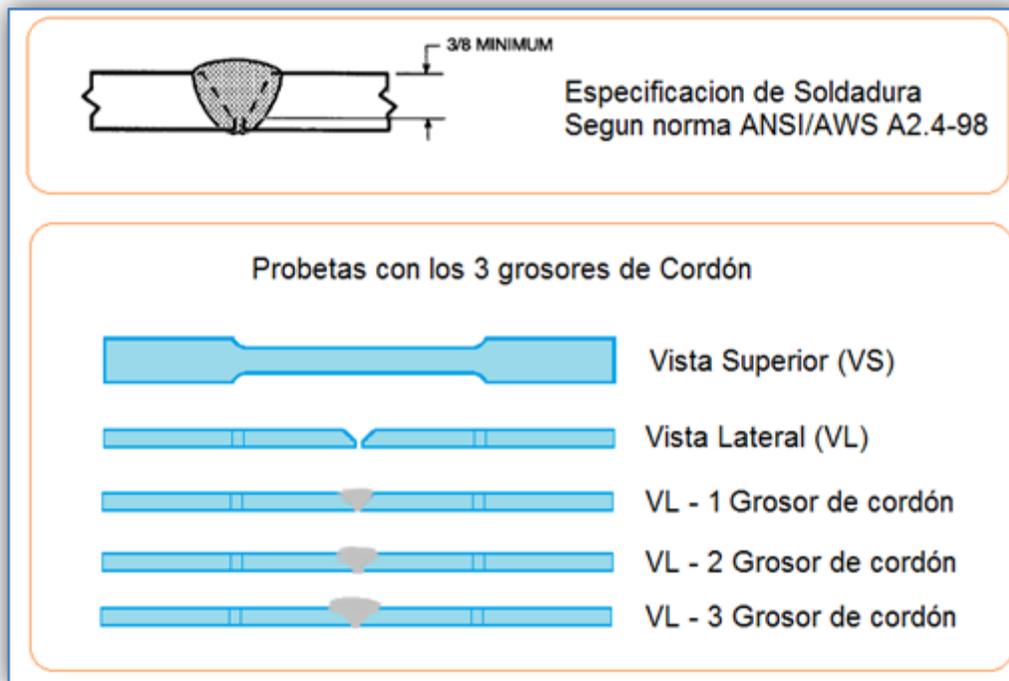


Figura 3.6 Especificación de soldadura a tope con bisel, según norma ANSI/AWS A2.4-98 y Representaciones ilustradas de las probetas para ensayo a tracción con los tres grosores de cordón de soldadura. Fuente: ANSI/AWS A2.4-98 Standard symbols for welding and brazing examination.

Grosores de cordón de soldadura:

- Grosor 1: Alto= 6 mm. Ancho= 8 mm.
- Grosor 2: Alto= 7 mm. Ancho= 10 mm.
- Grosor 3: Alto= 8 mm. Ancho= 12 mm.

3.2.1.5 Tratamiento de recocido

Luego de obtener las probetas con las características adecuadas (dimensiones y diferentes grosores de cordón de soldadura). Se separaron según el grosor de su cordón de soldadura, obteniendo tres grupos, de los cuales se seleccionaron una muestra igual a la mitad de sus integrantes (la



mitad de las probetas que conforman al grupo) para aplicarles el tratamiento de recocido, generando así, unas probetas libres de tensiones residuales que fueron llamadas probetas “Tipo A” (tratamiento aplicado solo al 50% de las probetas).

Se llamaron probetas “Tipo B”, a las probetas que no recibieron tratamiento térmico de normalizado después de haberse realizado el cordón de soldadura, con el fin de que permanezcan presentes en ellas los esfuerzos generados al realizar dicho cordón.

Entonces se tiene que 50% de las probetas son tipo A, libres de esfuerzos residuales y entre ellas se encuentran probetas del grupo 1, grupo 2 y grupo 3; y las probetas restantes son de tipo B, aun con esfuerzos residuales y también conformadas con probetas de los grupos 1, 2 y 3.

El tratamiento térmico post-soldadura se realizó calentando el material base hasta la temperatura de 595°C, según la tabla UCS-56: Requerimientos para el tratamiento post-soldadura para aceros bajo carbono de la Norma ASME, sección VIII división 1 (Rules for construction of pressure vessels), para el tratamiento post-soldadura de aceros con bajo carbono.

La especificación del material se obtiene de la tabla 3.2, para el acero A-36 cuyo N° de P y N° de grupo es 1 y 2 respectivamente, se sugiere un calentamiento a la temperatura antes mencionada, durante un periodo de tiempo establecido según el espesor de la lámina; y debido a que las probetas poseen un espesor menor al especificado por la norma, por sugerencia de los expertos encargados del manejo de hornos y tratamientos térmicos de la empresa Sumindu C.A. (empresa donde se llevó a cabo el tratamiento de las probetas “Tipo A”), se dejaron por 1h a una temperatura de 595°C para que así surta efecto el alivio de tensiones.



Tabla 3.2 Rango de temperatura para Aceros al carbono según Requerimientos para el tratamiento post-soldadura para aceros bajo carbono. Fuente: Norma ASME, sección VIII división 1, Rules for construction of pressure vessels, 2007.

Base de metal P-No. and Group y el Grupo		Metal Rango de temperatura (° C)		
P-No.	Base Metal Group	ASME B31.3 cuadro 331.1.1	ASME B31.1 Tabla 132	ASME UCS Cuadro VIII-56
1	De acero de carbono	593-649	600-650	650 min

Las probetas sufrieron el proceso de calentamiento y enfriamiento tal como lo describe la Figura 3.7; Inicialmente se encontraban a temperatura ambiente, entraron al horno precalentado a la temperatura estimada (595°C) y comenzaron a calentarse hasta alcanzar la temperatura deseada, se mantuvieron en esa temperatura por el tiempo anteriormente mencionado (1h), una vez transcurrido este tiempo, se apaga el horno y las probetas (junto con el horno) comienzan a nivelar su temperatura con la temperatura ambiente.

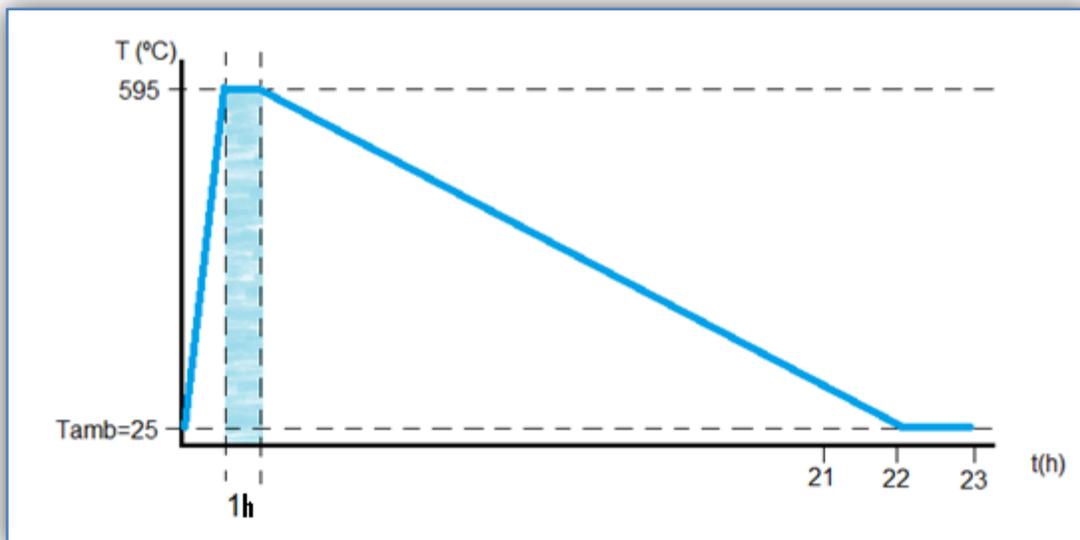


Figura 3.7 Calentamiento y enfriamiento sufrido por las probetas a través del tiempo.



El tratamiento de recocido es lento, pero es uno de los mejores en cuanto a recuperación de las propiedades mecánicas del material, y según las estandarizaciones de la norma ASME, se puede contar con que los esfuerzos residuales generados por el proceso de soldadura se encuentran totalmente eliminados de estas probetas.

3.2.1.6 Ensayo de tracción según Masubuchi

Ya que el ensayo a tracción según Masubuchi, no tiene variaciones en el ensayo de tracción usualmente practicado, sino en la aplicación que él le otorga, fue llamado: ensayo de tracción puro; para diferenciarlo con mayor facilidad del ensayo de tracción por extensómetro (el cual si genera variantes al ensayo de tracción común).

El ensayo de tracción puro se realizará en la máquina para ensayos de tracción perteneciente al laboratorio de materiales de la facultad de ingeniería, de la Universidad de Carabobo.

Tabla 3.3 Equipo para ensayo de tracción. Universidad de Carabobo. Facultad de Ingeniería, laboratorio de materiales. (Naguanagua-Carabobo).

Nombre del Producto	Galdabini	
Capacidad	20 Toneladas	
Apreciación	1 (N)	
Rango de velocidad del equipo	1-200 (mm/min)	



Dicho ensayo fue aplicado a cada probeta (Tipo A, con tratamiento térmico de recocido post-soldadura y Tipo B sin tratamiento térmico post-soldadura) y se tomaron los valores de carga y esfuerzo utilizados en el proceso de hacer que la probeta rompa por tracción.

Para realizar el ensayo de tracción se debieron seguir los siguientes pasos:

- Marcar la probeta para medir una longitud inicial (En el área que se encuentra entre los extremos de la probeta). Con un Vernier de precisión.
- Medir el ancho y espesor de la probeta. Con un vernier de precisión.
- Estriar los extremos de las probetas para evitar posibles deslizamientos en las mordazas de la prensa.
- Aprisionar firmemente los extremos de la probeta en las mordazas de la máquina de tracción.
- Proceder con la aplicación de carga, estirando la probeta hasta hacer que esta rompa.
- Obtener datos como: Gráfico carga vs deformación y/o esfuerzo vs deformación.
- Tomar nuevamente medidas de la longitud entre las marcas realizadas al principio; y el ancho y espesor de la probeta en las cercanías del punto donde ocurrió la falla (ruptura).

Se compararon los resultados obtenidos para cada tipo (A y B) y la diferencia de estos resultados representa el esfuerzo residual a causa del proceso de soldadura.

$$\sigma_{res} = \sigma_A - \sigma_B \quad \text{E.3.1}$$

Donde:

σ_{res} : Esfuerzo residual.

σ_A : Esfuerzo soportado por la probeta tipo A.



σ_B : Esfuerzo soportado por la probeta tipo B.

3.2.1.7 Comprobación del ensayo de tracción por extensometría

3.2.1.7.1. Preparación de la probeta

Para preparar la probeta con las galgas extensométricas, se debieron seguir los siguientes pasos:

- Marcar en la probeta, con una cuchilla (exacto): el eje principal, paralelo a la deformación y en la mitad del ancho de la probeta; y el eje auxiliar, paralelo al cordón de soldadura y en la mitad de este. Generando así, la región de localización de la galga.
- Limpiar con un solvente a base de acetona la superficie de colocación de la galga, para eliminar cualquier impureza presente en la superficie de colocación. Es recomendable limpiar en un solo sentido ya que disminuye la probabilidad de que regresen las impurezas.
- Adherir la galga a una cinta plástica adhesiva transparente, y se fija en la región delimitada por las marcas hechas con el exacto, para evaluar la posición adecuada, se despega la cinta adhesiva (junto con la galga); se procede a agregar algún tipo de resina exposídica (en este caso se utilizó: el adhesivo comúnmente conocido como “Pega loca”), a la cara libre de la galga y se coloca nuevamente en la región determinada en la probeta. Es importante mencionar que es necesario que sean eliminadas todas las burbujas de aire que puedan estar presente en la zona de fijación, pues serían un factor de aporte de error al momento de las mediciones, por lo tanto, se recomienda utilizar el dedo pulgar para hacer un poco de presión sobre la cinta adhesiva e intentar extraer el aire que pudiera estar presente.



- Para proteger la galga de factores ambientales no se le retira la cinta adhesiva utilizada al principio, y para seguridad de los cables también son fijados con cinta adhesiva a la probeta.

A continuación se muestra una imagen que ilustra los pasos mencionados para la preparación de la probeta:

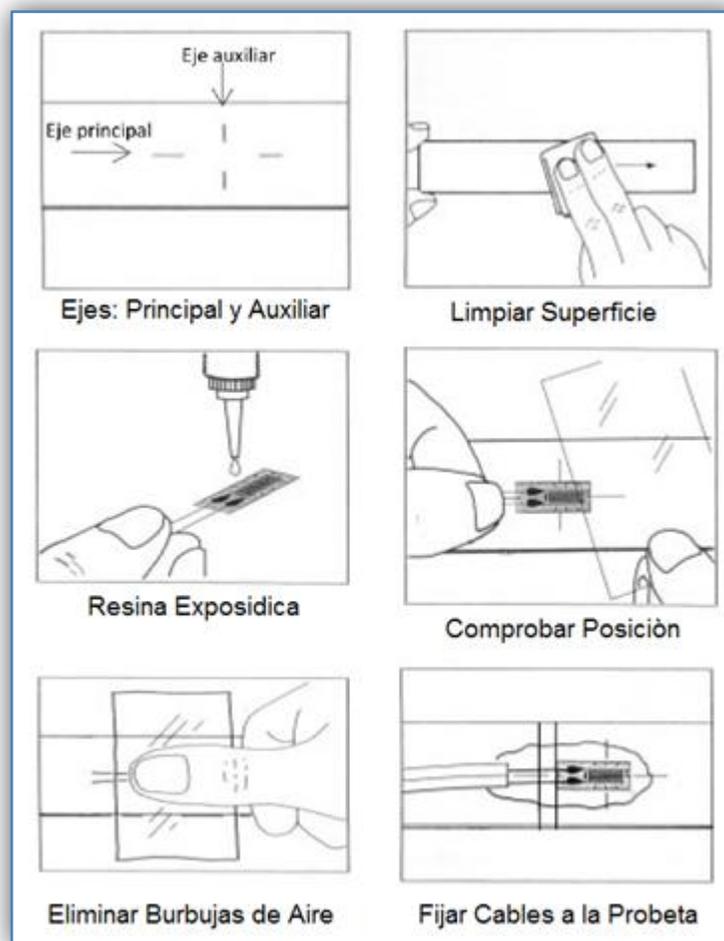


Figura 3.8 Pasos para preparar la probeta para extensómetro por tracción. Fuente:

Gadgets úteis. (2009). [on line]. Disponible en:

<http://www.gdhpress.com.br/blog/page/32/>

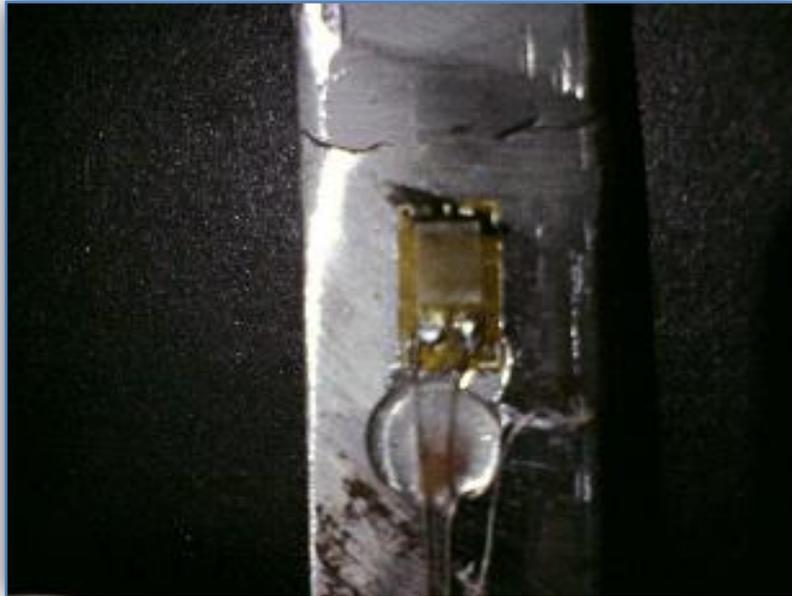


Figura 3.9 Galga adherida a la probeta (punto de silicón para evitar contacto entre los cables).

3.2.1.7.2. Circuito para lectura de la señal de la galga

Cabe Resaltar que la señal que emitía la galga a medida que se iba realizando el ensayo correspondiente, no es una medida que se pudiera tomar directamente de ella, ya que la señal que emite es una señal eléctrica (señal no cuantitativamente apreciable por el ojo humano) y se debe a un circuito conformado por: la galga, un sub-circuito (cuya base es un puente de Wheastone con modificaciones), un voltímetro con alta sensibilidad y una fuente de poder (la cual otorga la energía necesaria al circuito).

A continuación se presentan figuras que representan el diagrama del circuito y el circuito en físico, empleado para obtener la lectura de la señal de las galgas extensométricas (figuras 3.9 y 3.10 respectivamente):

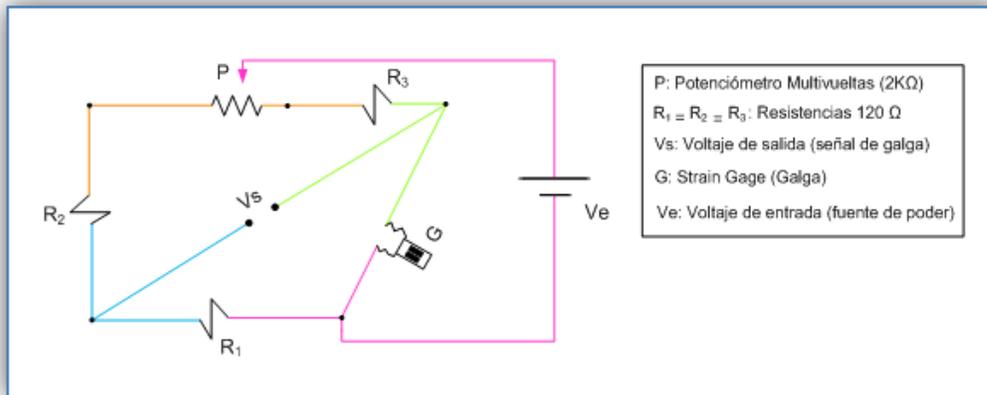


Figura 3.10 Diagrama del circuito para lectura de la señal de voltaje de la galga en el ensayo extensométrico por tracción.

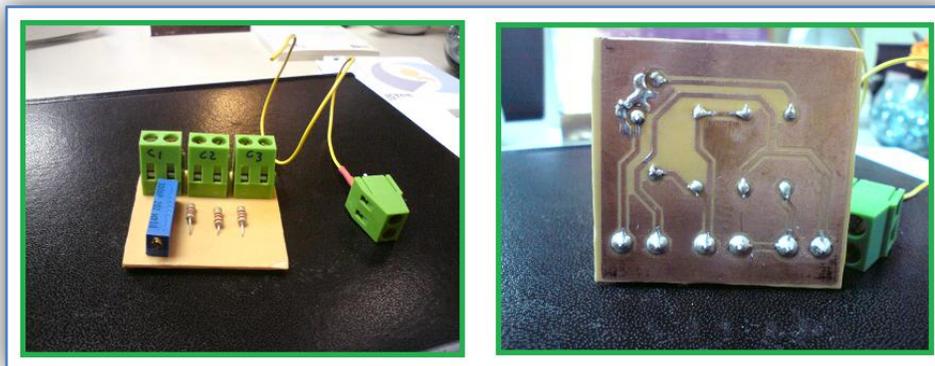


Figura 3.11 Circuito en bakelita para la lectura de señal de galga. Vista de elementos (Izq); Vista de conexiones entre elementos del circuito (Drch).

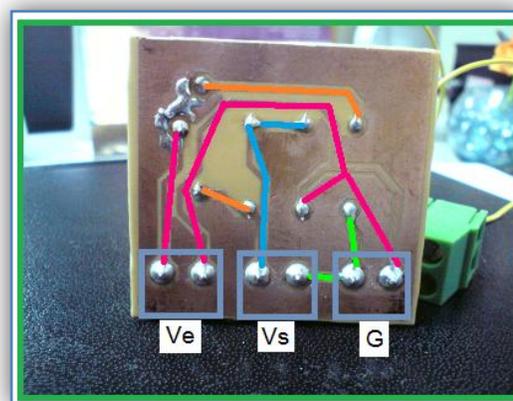


Figura 3.12 Guía para el Circuito (Diagrama – Circuito en Bakelita).



3.2.1.7.3. Extensometría por ensayo de tracción

El procedimiento para realizar este ensayo de tracción es prácticamente el mismo al que se describe en el punto 3.2.1.6 con las siguientes diferencias:

- Adherir a las probetas la galga y los cables.
- Conectar los cables al circuito descrito en el punto 3.2.1.7.2 por el puerto “Vs”.
- La aplicación de la carga se hizo por tramos; es decir:
 - En la primera etapa la carga aplicada es de 0 kg y se mide la voltaje presente para dicha carga, aquí se demarca el cero mecánico a partir del cual se van a contabilizar la variación del voltaje en función del incremento de carga.
 - Al alcanzar el cero mecánico, calibrando el equipo para aproximar la lectura de la señal en el momento que alcance el límite elástico.
 - Se comienza a aplicar la carga determinada, al llegar a ella, se detiene el estiramiento de la probeta y se procede a capturar los datos instantáneos para esa condición de carga específica y así obtener el valor de voltaje de salida; este paso se repite para cada carga determinada.

Mediante la ecuación 2.10 y los datos obtenidos en el ensayo de tracción con galgas extensométricas, se calcularon las deformaciones para las probetas tipo A y B.

Una vez obtenidas las deformaciones, se utiliza la ley de Hooke (ecuación E.3.1.) para calcular el esfuerzo que soporta cada tipo de probeta (tipo A y B).

$$\sigma = \varepsilon \times E$$



Con los esfuerzos que soportan cada probetas, tipo A y tipo B; a una misma carga preestablecida, se obtienen los esfuerzos residuales de la misma manera a como se hace con el ensayo a tracción determinado según la ecuación E.3.1.

$$\sigma_{res} = \sigma_A - \sigma_B$$

El patrón que se genere mediante extensómetro por ensayo de tracción deberá asemejarse al determinado a través del método por ensayo a tracción puro para poder validar los resultados de ambos.

3.2.2 Determinación de la relación entre el espesor de cordón y el esfuerzo residual

Agrupando a los distintos espesores de cordón y los valores de esfuerzo residual obtenidos del ensayo en el laboratorio, se elabora para cada caso, una tabla de datos y se procede a graficar para determinar el modelo matemático que rige el proceso.



CAPÍTULO IV

Desarrollo de la Investigación



4.1. Determinación de los esfuerzos residuales mediante ensayo de tracción puro

Calculados por la diferencia entre los esfuerzos que soporta una probeta libre de esfuerzos gracias a un alivio de tensiones producido por un tratamiento térmico; y una probeta con esfuerzos agregados (sin alivio de tensiones por tratamiento térmico) debido al proceso de soldadura.

A continuación se muestran las tablas que corresponden a las fuerzas bajo las cuales fueron sometidas las probetas A y B en sus puntos: Límite de Fluencia, Límite de Resistencia a la Tracción y Límite de Ruptura (Tablas 4.1, 4.2 y 4.3).

Adicionalmente se obtuvieron los promedios de fuerza soportada y de elongación según grupos de tipo de probeta para cada grosor de cordón de soldadura, los cuales se encuentran representados en las tablas 4.4 y 4.5 para así conseguir una representación gráfica que generalice los tres grosores de cordón para cada tipo de probeta (graficas 4.1, 4.2 y 4.3).



Tabla 4.1 Fuerzas resistidas por los grupos de probetas A y B (Con y sin tratamiento térmico respectivamente) en el límite de elasticidad.

	Fuerzas Aplicadas (N)					
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	
Grosor 1	20.610,00	21.345,00	20.880,00	21.502,50	21.855,00	Fluencia Probetas A
Grosor 2	23.452,50	24.067,50	25.957,50	24.907,50	24.405,00	
Grosor 3	26.040,00	26.857,50	24.907,50	26.092,50	25.965,00	
Grosor 1	20.917,50	20.107,50	20.257,50	19.852,50	21.262,50	Fluencia Probetas B
Grosor 2	23.647,50	23.227,50	23.467,50	22.837,50	22.560,00	
Grosor 3	23.992,50	24.277,50	23.460,00	21.780,00	21.990,00	

Tabla 4.2 Fuerzas resistidas por los grupos de probetas A y B (Con y sin tratamiento térmico respectivamente) en el límite de resistencia a la tracción.

	Fuerzas Aplicadas (N)					
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	
Grosor 1	35.722,50	34.785,00	35.167,50	35.100,00	35.407,50	Fluencia Probetas A
Grosor 2	35.970,00	36.517,50	35.745,00	37.027,50	35.872,50	
Grosor 3	40.807,50	37.380,00	37.320,00	36.517,50	37.020,00	
Grosor 1	33.045,00	32.782,50	32.985,00	32.760,00	32.902,50	Fluencia Probetas B
Grosor 2	33.435,00	32.902,50	34.155,00	33.922,50	33.480,00	
Grosor 3	35.587,50	34.777,50	32.430,00	34.890,00	34.612,50	

Tabla 4.3 Fuerzas resistidas por los grupos de probetas A y B (Con y sin tratamiento térmico respectivamente) en el límite de ruptura.

	Fuerzas Aplicadas (N)					
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	
Grosor 1	25.876,80	25.279,20	25.876,80	25.048,80	25.761,60	Fluencia Probetas A
Grosor 2	25.747,20	26.272,80	26.589,60	26.769,60	25.840,80	
Grosor 3	25.480,80	25.783,20	26.092,80	25.747,20	26.625,60	
Grosor 1	24.631,20	23.529,60	23.572,80	23.652,00	23.889,60	Fluencia Probetas B
Grosor 2	23.918,40	23.299,20	24.112,80	24.379,20	24.379,20	
Grosor 3	23.378,40	17.740,80	25.120,80	23.716,80	24.228,00	



Tabla 4.4 Promedio de elongaciones para cada grosor de cordón de soldadura según grupos muestra de cada tipo de probeta.

Promedio de Elongaciones (mm)		Probetas A Con T.T.	Probetas B Sin T.T.
Grosor 1 (Cordón de soldadura)	Inicio	0,00	0,00
	Limite Fluencia	5,98	4,87
	Resistencia Tracción	18,00	15,00
	Resistencia Ruptura	23,45	20,04
Grosor 2 (Cordón de soldadura)	Inicio	0,00	0,00
	Limite Fluencia	5,02	4,43
	Resistencia Tracción	17,34	14,12
	Resistencia Ruptura	22,89	19,50
Grosor 3 (Cordón de soldadura)	Inicio	0,00	0,00
	Limite Fluencia	4,50	3,50
	Resistencia Tracción	16,00	13,00
	Resistencia Ruptura	22,25	18,00

Tabla 4.5 Promedio de fuerzas resistidas en los puntos: límite de fluencia, resistencia a la tracción y límite de ruptura, para cada grosor de cordón de soldadura según grupos muestra de cada tipo de probeta.

Promedio de Fuerza Aplicada (N)		Probetas A Con T.T.	Probetas B Sin T.T.
Grosor 1 (Cordón de soldadura)	Inicio	0,00	0,00
	Limite Fluencia	21.238,50	20.479,50
	Resistencia Tracción	35.236,50	32.895,00
	Resistencia Ruptura	25.568,64	23.855,04
Grosor 2 (Cordón de soldadura)	Inicio	0,00	0,00
	Limite Fluencia	24.558,00	23.148,00
	Resistencia Tracción	36.226,50	33.579,00
	Resistencia Ruptura	26.244,00	24.017,76
Grosor 3 (Cordón de soldadura)	Inicio	0,00	0,00
	Limite Fluencia	25.972,50	23.100,00
	Resistencia Tracción	37.809,00	34.459,50
	Resistencia Ruptura	25.945,92	22.836,96

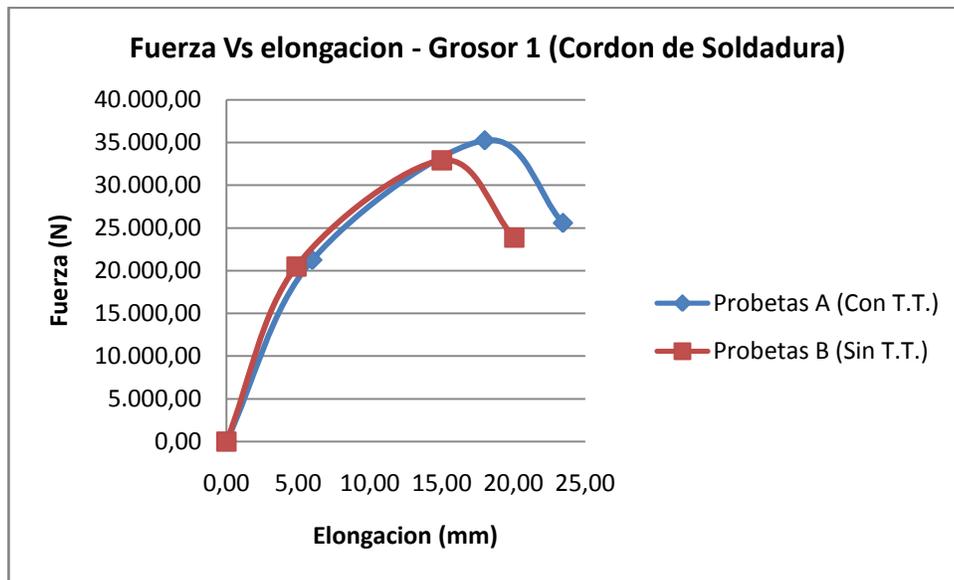


Figura 4.1 Representación gráfica Fuerza vs Elongación. Cordón de soldadura, grosor 1

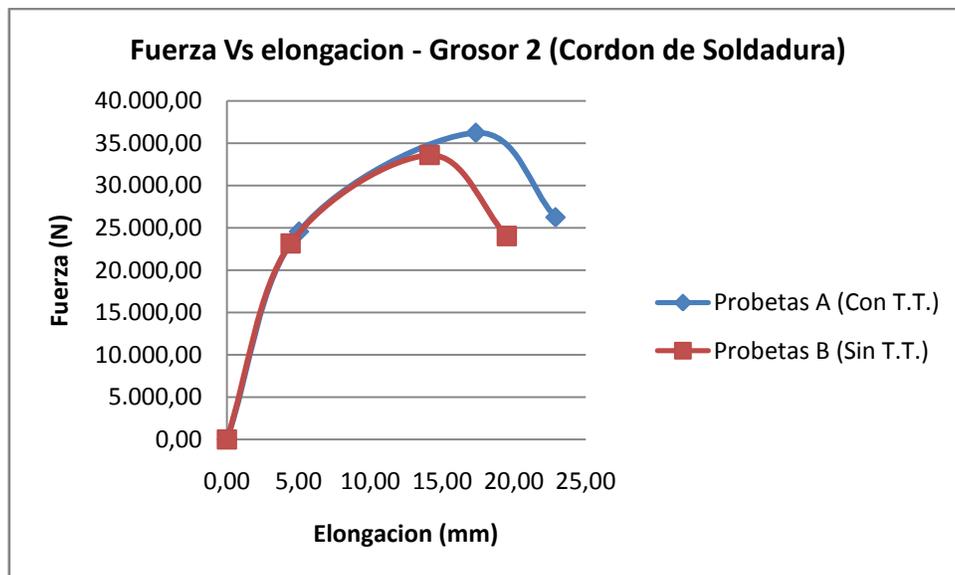


Figura 4.2 Representación gráfica Fuerza vs Elongación. Cordón de soldadura, grosor 2.

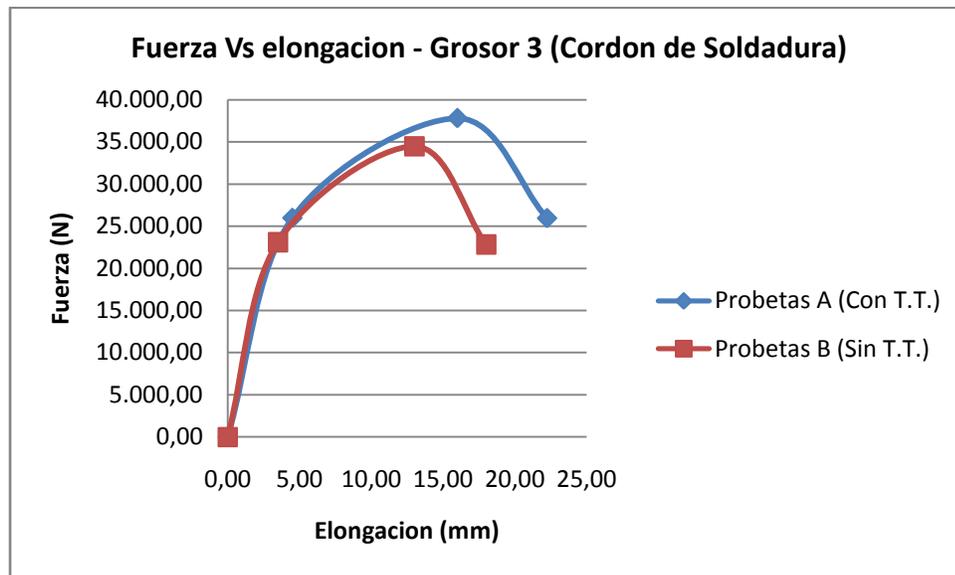


Figura 4.3 Representación gráfica Fuerza vs Elongación. Cordón de soldadura, grosor 3.

Con los valores de fuerza obtenidos por el ensayo a tracción se lograron calcular los Esfuerzos que las probetas soportan en los puntos mencionados (Fluencia, Resistencia a Tracción y Ruptura). Dichos valores se presentan a continuación:

Tabla 4.6 Esfuerzo que soportan las probetas tipo A en su límite elástico.

Probetas Tratadas Térmicamente (Ensayo Tracción Puro) - Limite de Fluencia (MPa)						
Cordón de Soldadura	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	PROMEDIO
Grosor 1	274,80	284,60	278,40	286,70	291,40	283,18
Grosor 2	312,70	320,90	346,10	332,10	325,40	327,44
Grosor 3	347,20	358,10	332,10	347,90	346,20	346,30

Tabla 4.7 Esfuerzo que soportan las probetas tipo B en su límite elástico.

Probetas NO Tratadas Térmicamente (Ensayo Tracción Puro) - Limite de Fluencia (MPa)						
Cordón de Soldadura	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	PROMEDIO
Grosor 1	278,90	268,10	270,10	264,70	283,50	273,06
Grosor 2	315,30	309,70	312,90	304,50	300,80	308,64
Grosor 3	319,90	323,70	312,80	290,40	293,20	308,00



Tabla 4.8 Esfuerzo que soportan las probetas tipo A en su límite de resistencia a la tracción.

Probetas Tratadas Térmicamente (Ensayo Tracción Puro) - Limite a la Tracción (MPa)						
Cordón de Soldadura	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	PROMEDIO
Grosor 1	476,30	463,80	468,90	468,00	472,10	469,82
Grosor 2	479,60	486,90	476,60	493,70	478,30	483,02
Grosor 3	544,10	498,40	497,60	486,90	493,60	504,12

Tabla 4.9 Esfuerzo que soportan las probetas tipo B en su límite de resistencia a la tracción.

Probetas NO Tratadas Térmicamente (Ensayo Tracción Puro) - Limite a la Tracción (MPa)						
Cordón de Soldadura	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	PROMEDIO
Grosor 1	440,60	437,10	439,80	436,80	438,70	438,60
Grosor 2	445,80	438,70	455,40	452,30	446,40	447,72
Grosor 3	474,50	463,70	432,40	465,20	461,50	459,46

Tabla 4.10 Esfuerzo que soportan las probetas tipo A en su límite de ruptura.

Probetas Tratadas Térmicamente (Ensayo Tracción Puro) - Limite de Ruptura (MPa)						
Cordón de Soldadura	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	PROMEDIO
Grosor 1	359,40	351,10	359,40	347,90	357,80	355,12
Grosor 2	357,60	364,90	369,30	371,80	358,90	364,50
Grosor 3	353,90	358,10	362,40	357,60	369,80	360,36

Tabla 4.11 Esfuerzo que soportan las probetas tipo B en su límite de ruptura.

Probetas NO Tratadas Térmicamente (Ensayo Tracción Puro) - Limite de Ruptura (MPa)						
Cordón de Soldadura	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	PROMEDIO
Grosor 1	342,10	326,80	327,40	328,50	331,80	331,32
Grosor 2	332,20	323,60	334,90	338,60	338,60	333,58
Grosor 3	324,70	246,40	348,90	329,40	336,50	317,18

A continuación se presentan las graficas que representan el promedio de esfuerzos obtenidos versus la elongación que presento la cada probeta según su cordón de grosor de soldadura.

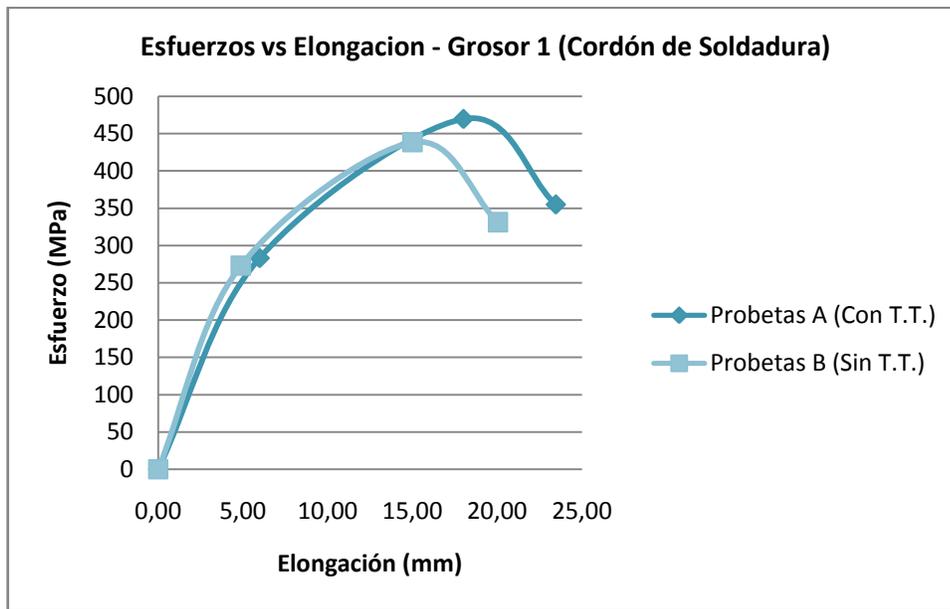


Figura 4.4 Representación gráfica Esfuerzo vs Elongación. Cordón de soldadura, grosor 1.

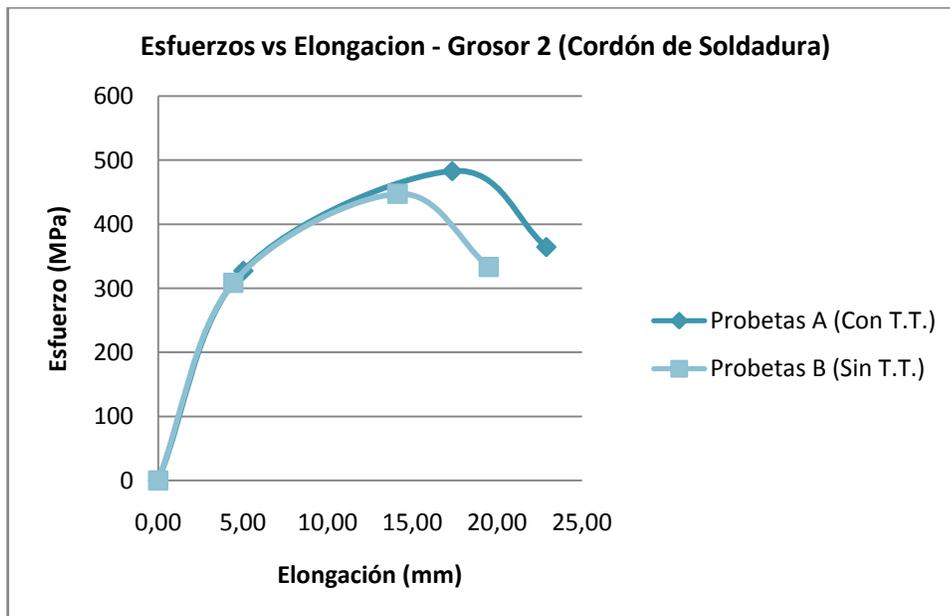


Figura 4.5 Representación gráfica Esfuerzo vs Elongación. Cordón de soldadura, grosor 2.

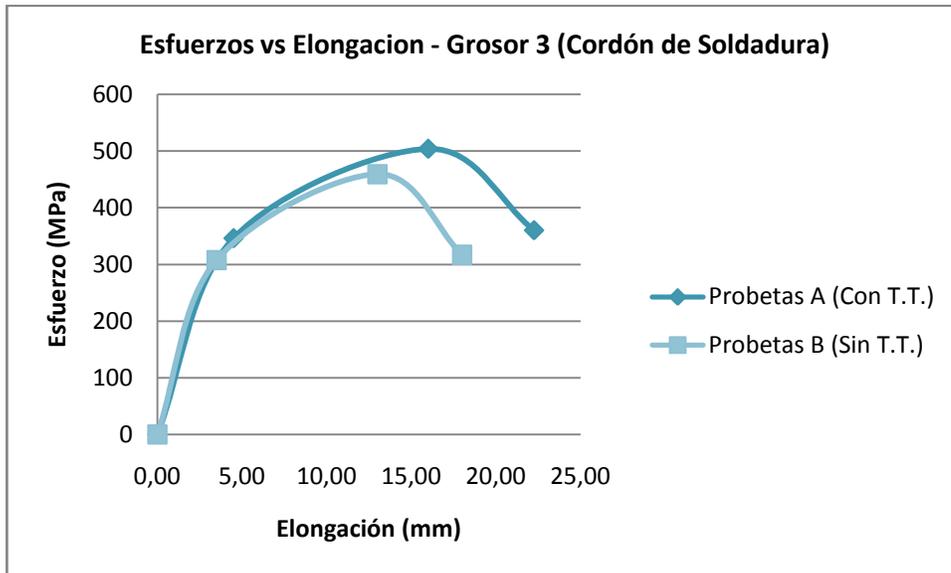


Figura 4.6 Representación gráfica Esfuerzo vs Elongación. Cordón de soldadura, grosor 3.

Los esfuerzos Residuales fueron calculados con la ecuación E.3.1:

$$\sigma_{res} = \sigma_A - \sigma_B$$

Ejemplo de cálculo para límite de fluencia del grupo de probetas cuyo grosor de cordón de soldadura es 1:

$$\sigma_A = 283,18 \text{ (MPa)}$$

$$\sigma_B = 273,06 \text{ (MPa)}$$

$$\sigma_{res} = 283,18 - 273,06$$

$$\sigma_{res} = 10,12 \text{ (MPa)}$$

El gráfico que sigue es una representación gráfica que ilustra el comportamiento de las probetas según el esfuerzo residual que reside en ellas según el grosor del cordón de soldadura que las caracteriza:

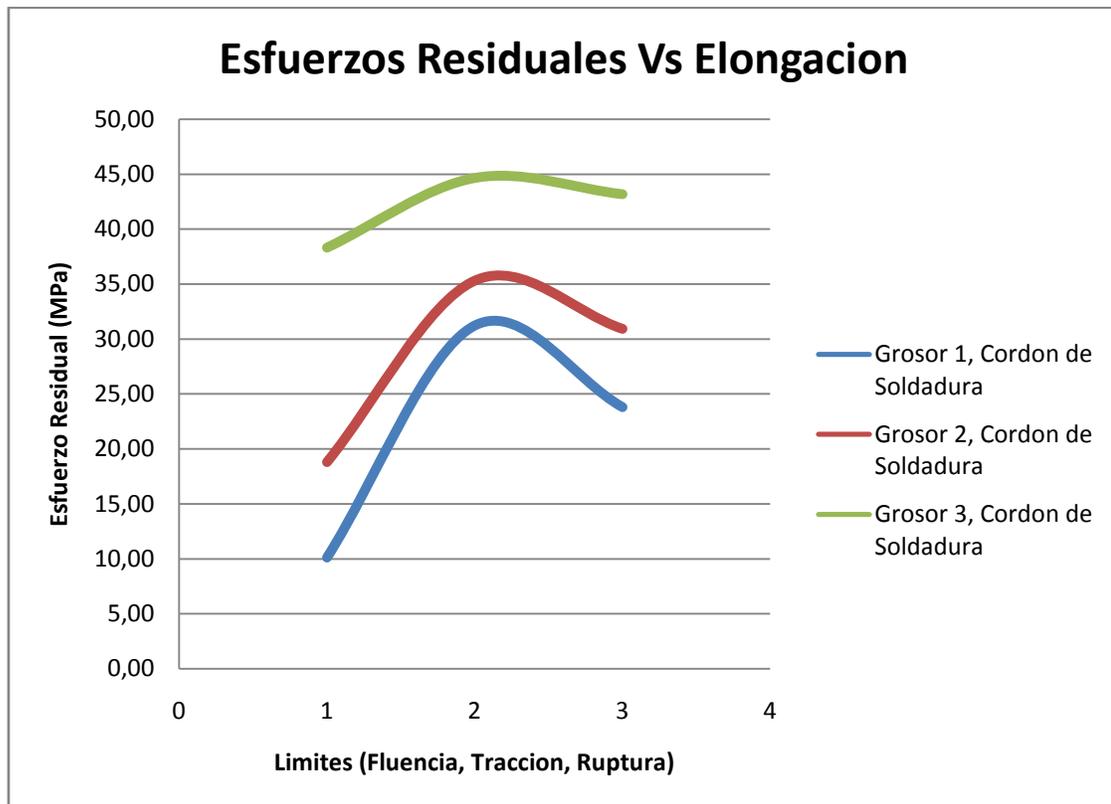


Figura 4.7 Representación gráfica esfuerzos residuales según grosor de cordón de soldadura.

Obteniendo entonces, los siguientes resultados:

Tabla 4.12 Esfuerzos residuales en el límite de fluencia para los tres tipos de grosores de soldadura.

Esfuerzo Residual - Límite de Fluencia	Cordón de Soldadura	(MPa)
	Grosor 1	10,12
	Grosor 2	18,80
	Grosor 3	38,30



Tabla 4.13 Esfuerzos residuales en el límite de resistencia a la tracción para los tres tipos de grosores de soldadura.

Esfuerzo Residual - Límite de Resistencia a la Tracción	Cordón de Soldadura	(MPa)
	Grosor 1	31,22
	Grosor 2	35,30
	Grosor 3	44,66

Tabla 4.14 Esfuerzos residuales en el límite de ruptura para los tres tipos de grosores de soldadura.

Esfuerzo Residual - Límite de Ruptura	Cordón de Soldadura	(MPa)
	Grosor 1	23,80
	Grosor 2	30,92
	Grosor 3	43,18

Y estos, son entonces, los valores de los esfuerzos residuales obtenidos por ensayo a tracción según la teoría de Masubuchi; generados en el acero estructural ASTM A-36, debido a un proceso de soldadura a tope por arco eléctrico con electrodo revestido, de una pasada, según el grosor del cordón de soldadura.

4.2 Determinación de los esfuerzos residuales mediante ensayo extensométrico por tracción

Esfuerzos que al igual a los calculados por el ensayo de tracción puro, se obtienen a partir de la diferencia de esfuerzos que soportan una probeta que ha sufrido un tratamiento térmico después de soldar (aliviando sus tensiones residuales) y una probeta sin tratamiento térmico aplicado (conservando sus tensiones residuales).



Este ensayo (ensayo extensométrico por tracción) sirve para corroborar el ensayo de tracción puro siempre y cuando ambos posean la misma tendencia.

A continuación se muestra la tabla 4.15, la cual corresponde a los valores de voltaje medidos por el circuito según la señal que emita la galga extensométrica al estar adherida a la probeta a la cual se le practicaba el ensayo de tracción, a la deformación promedio y al esfuerzo soportado. Cabe resaltar que debido a la limitante que se presenta por calcular el esfuerzo por Ley de Hooke, los esfuerzos calculados solo tendrán cabida en el rango elástico.

Tabla 4.15 Señales de voltaje emitidas por las galgas extensometricas, promedio de voltaje, deformación promedio y esfuerzo soportado por las probetas A y B (con y sin tratamiento térmico respectivamente) según su grosor de cordón de soldadura.

Probetas	Cordón de Soldadura	Vs = Vo (V)	Vs = Vo (V)	Vs = Vo (V)	Vs = Vo Promedio (V)	Deformación Promedio (ε) (mm)	Esfuerzo (MPa)
A (Con T.T.)	Grosor 1	0,0022	0,0024	0,0018	0,0021	0,000509524	101,905
	Grosor 2	0,0047	0,0054	0,0046	0,0049	0,001159524	231,905
	Grosor 3	0,0073	0,0083	0,0090	0,0082	0,001953175	390,635
B (Sin T.T.)	Grosor 1	0,0017	0,0018	0,0018	0,0018	0,000421429	84,424
	Grosor 2	0,0043	0,0041	0,0041	0,0042	0,000995238	199,235
	Grosor 3	0,0068	0,0066	0,0064	0,0066	0,001571429	314,245

Para ejemplificar los cálculos realizados se tomaron los valores de las probetas A y B pertenecientes al Grosor 1.

Voltaje salida promedio:

$$V_{prom} = \frac{V_1 + V_2 + V_3}{3}$$

$$V_{prom} = \frac{0,0022 + 0,0024 + 0,0018}{3}$$



$$V_{prom} = 0,0021 (V)$$

La deformación promedio se calcula con la ecuación E.2.15:

$$\varepsilon = \frac{4V_0}{K.V_i}$$

Donde, para este caso:

V_0 : Voltaje salida promedio = 0,0021(V)

K: Constante característica de la galga extensométrica = 2,8 (en este caso)

V_i : Voltaje de entrada (fuente) = 6 (V)

ε : Deformación unitaria.

Entonces

$$\varepsilon = \frac{4 * 0,0021}{2,8 * 6}$$

$$\varepsilon = 0,000509524 (mm)$$

Y ahora, conociendo la deformación unitaria; se procede a calcular el esfuerzo soportado con la ayuda de la ecuación E.2.5 (Ley de Hooke):

$$\sigma = \varepsilon . E$$

Donde:

σ : Esfuerzo

ε : Deformación unitaria

E: Módulo de elasticidad (módulo de Young); E=200(GPa)

Entonces:
$$\sigma = 0,000509524 * 200$$

$$\sigma = 101,905 (Mpa)$$

A continuación se presentan unas representaciones gráficas para ilustrar la diferencia existente entre las probetas con diferentes grosores de cordón de soldadura según estén tratadas térmicamente o no:

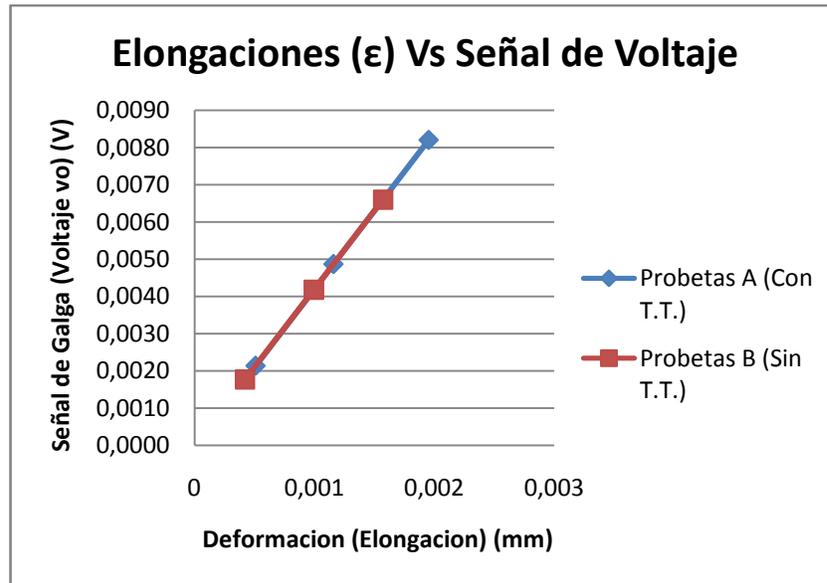


Figura 4.8 Representación gráfica Deformación Vs Señal de voltaje. Cada punto (de cada línea) representa un grosor de cordón de soldadura, el más bajo es el grosor 1 y el más alto es el grosor 3

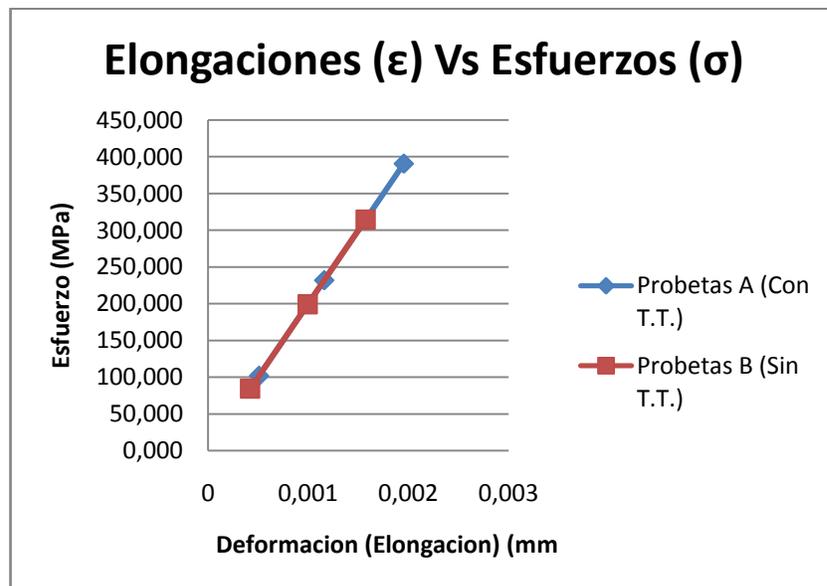


Figura 4.9 Representación gráfica Deformación Vs Esfuerzos. Cada punto (de cada línea) representa un grosor de cordón de soldadura, el más bajo es el grosor 1 y el más alto es el grosor 3



Conociendo ya los esfuerzos para cada tipo de probeta según su grosor de cordón de soldadura, es posible determinar los esfuerzos residuales, con la ecuación E.3.1:

$$\sigma_{res} = \sigma_A - \sigma_B$$

De la siguiente manera:

Para ejemplificar los cálculos realizados, se tomaran los valores del grosor 1 de probetas tipo A y B:

$$\sigma_A = 101,905 \text{ (MPa)}$$

$$\sigma_B = 84,424 \text{ (MPa)}$$

$$\sigma_{res} = 101,905 - 84,424$$

$$\sigma_{res} = 17,481 \text{ (MPa)}$$

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 4.16 Esfuerzos residuales en el límite de fluencia para los tres tipos de grosores de soldadura.

Esfuerzo Residual - Limite de Fluencia (Extensometria)	Cordón de Soldadura	(MPa)
	Grosor 1	17,481
	Grosor 2	32,670
	Grosor 3	76,390

Y estos, son entonces, los valores de los esfuerzos residuales obtenidos por ensayo extensometrico a tracción, generados en el acero estructural ASTM A-36, debido a un proceso de soldadura a tope por arco eléctrico con electrodo revestido, de una pasada, según el grosor del cordón de soldadura.

Ahora bien, a continuación se presenta una representación gráfica que indica la similitud entre el ensayo de tracción puro (según Masubuchi) y el ensayo de extensometría por tracción.

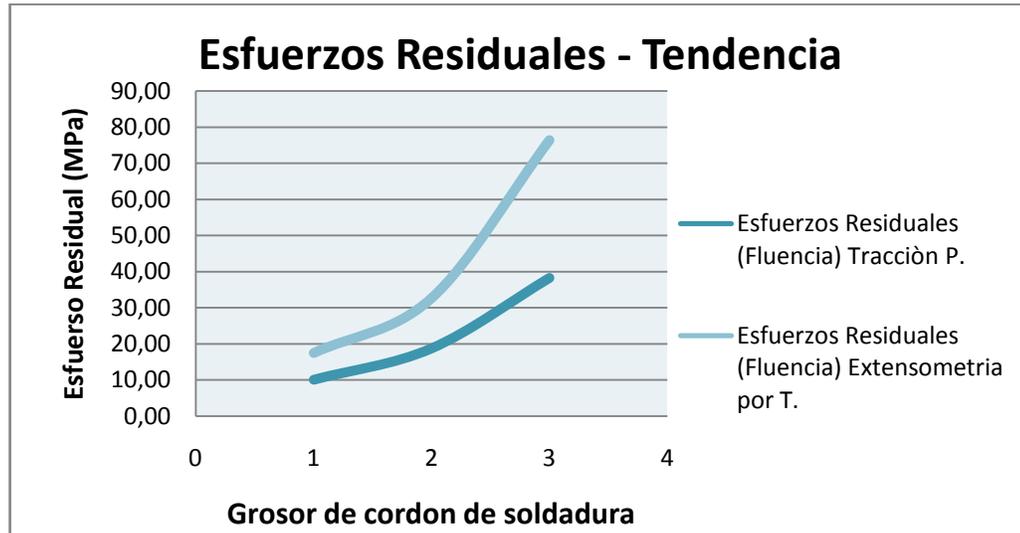


Figura 4.10 Esfuerzos residuales, Tracción vs Extensometría.

4.3 Metalografía.

Las siguientes figuras muestran la microestructura para las probetas con diferente grosor de soldadura, tratadas térmicamente (TT) y no tratadas térmicamente (NTT); en tres zonas:

- Zona 1: Material base (acero A-36).
- Zona 2: Zona térmicamente afectada (ZTA) del material.
- Zona 3: Cordón de soldadura.

Seguidamente se encuentra una tabla donde se detallan con mayor fechor las zonas anteriormente descritas a la figura perteneciente.



Probetas con cordón de soldadura grosor 3:

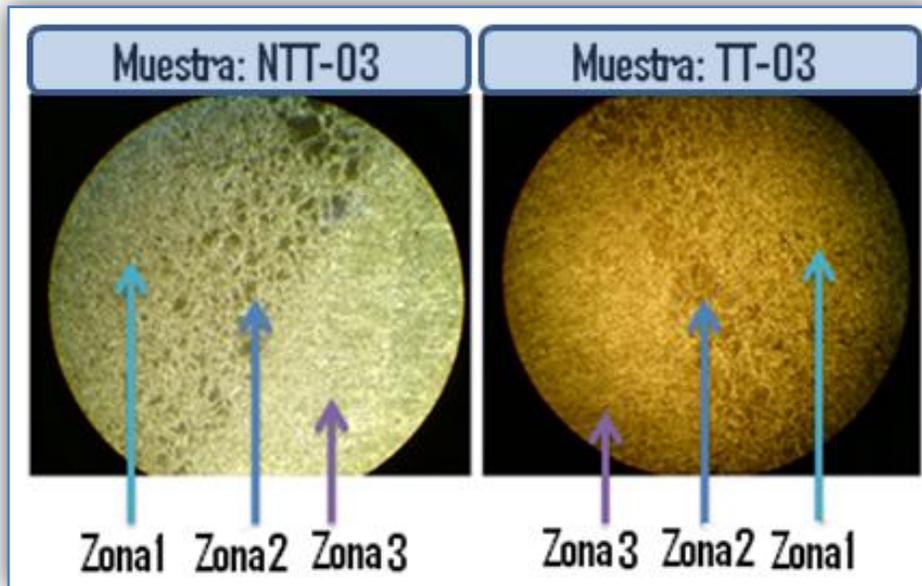


Figura 4.11 Metalografía de probetas con cordón de soldadura, grosor 3 (Zoom x100).
(NTT: No tratada térmicamente. TT: Tratada térmicamente).

Probetas con cordón de soldadura grosor 3, detalles de zonas:

Tabla 4.17 Zonas de muestra 03 (NTT y TT). Pertenece a figura 4.8.

Muestra grosor 3			
Zona	1 (A-36).	2 (ZTA)	3 (Cordón)
No Tratada Térmicamente			
Tratada Térmicamente			



Probetas con cordón de soldadura grosor 2:

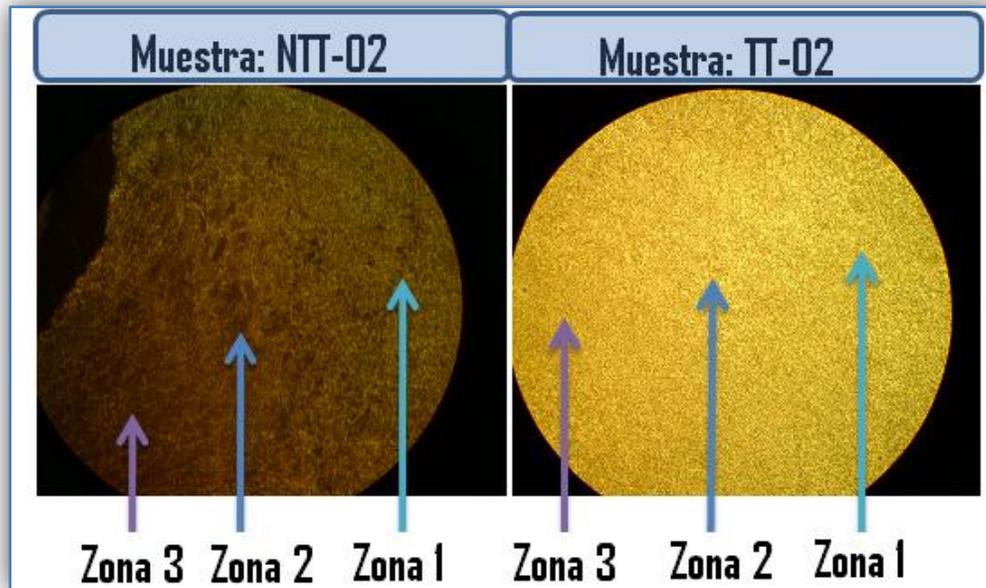


Figura 4.12 Metalografía de probetas con cordón de soldadura, grosor 2 (Zoom x100).
(NTT: No tratada térmicamente. TT: Tratada térmicamente).

Probetas con cordón de soldadura grosor 2, detalles de zonas:

Tabla 4.18 Zonas de muestra 02 (NTT y TT). Pertenece a figura 4.9.

Muestra grosor 2			
Zona	1 (A-36).	2 (ZTA)	3 (Cordón)
No Tratada Térmicamente			
Tratada Térmicamente			



Probetas con cordón de soldadura grosor 1:

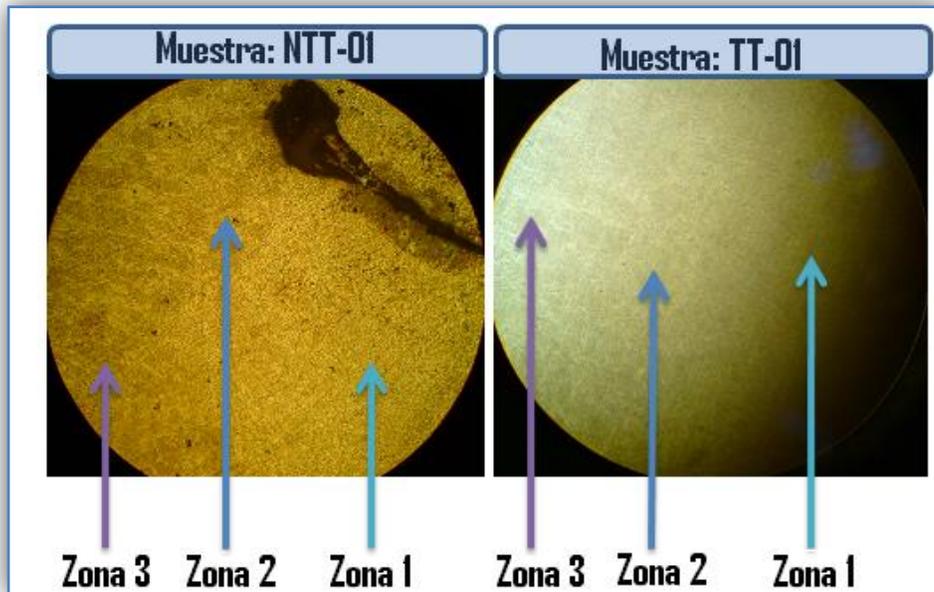


Figura 4.13 Metalografía de probetas con cordón de soldadura, grosor 1 (Zoom x100).
(NTT: No tratada térmicamente. TT: Tratada térmicamente).

Probetas con cordón de soldadura grosor 1, detalles de zonas:

Tabla 4.19 Zonas de muestra 01 (NTT y TT). Pertenece a figura 4.10.

Muestra grosor 1			
Zona	1 (A-36).	2 (ZTA)	3 (Cordón)
No Tratada Térmicamente			
Tratada Térmicamente			



CAPÍTULO V

Análisis de Resultados



Basando en los resultados obtenidos en el capítulo cuatro, se puede definir lo siguiente:

Por el ensayo metalográfico, se observa que el grano del material base, presentó aproximadamente un tamaño número 9 (este tamaño representa granos muy pequeños y unidos entre sí, para comparación a 100x, incluso supera al grano más pequeño designado por la clasificación ASTM, el cual es ASTM #8), compuesto en su mayoría de ferrita, reconocida por el color y forma (granos poligonales claros) y conociendo la composición química del material base, la cual es: Fe = 99%, Cu = 0,2%, C = 0,26%, Mn = 0,75%, P = 0,04% Max y S = 0,05% Max; debido a su contenido de Carbono se concluye que es un acero hipoeutectoide, y por estar constituido casi en totalidad por ferrita se deduce que es un acero con un comportamiento blando y dúctil.

En el análisis microestructural se observó que en las muestras NTT (No Tratadas Térmicamente) se aprecia con mayor detalle la diferencia de las zonas que la constituyen, como serían la zona 1 referida al material base (acero ASTM A-36), la zona 2 o ZTA (zona térmicamente afectada) constituida por aquella región del material base que entra en contacto directo con el cordón de soldadura, y las zonas próximas a éste; y la zona 3 descrita como el cordón de soldadura; en comparación con las probetas TT (Tratadas Térmicamente).



Lo anteriormente descrito ocurre debido a la fuente móvil de calor que permite la dilatación del grano en la zona térmicamente afectada (ya que está determinado que el tamaño del grano depende no solo al aumento de la temperatura, sino también a la permanencia en ella) y la acumulación de tensiones por el modo de enfriamiento rápido (enfriamiento a temperatura ambiente) en ambos tipos de probetas. Y el hecho de que en las probetas TT la diferencia de estas zonas sea un poco más difícil de observar se debe a la recuperación elástica, o alivio de tensiones que han sufrido debido al calentamiento y modo de enfriamiento lento (enfriamiento dentro del horno) en el tratamiento térmico recibido, regenerando con esto, en gran proporción, el grano que ha sido modificado de su condición original.

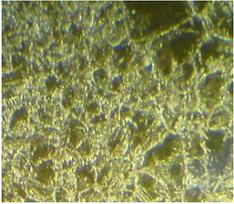
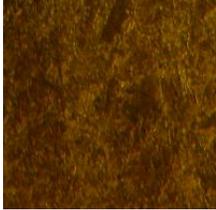
Las muestras utilizadas para el ensayo metalográfico, tienen como característica que el cordón de soldadura fue extraído de la probeta junto con un material base (a cada lado del cordón) de aproximadamente un centímetro de longitud. Y que en todas las probetas metalográficas, sin importar el cordón de soldadura, la zona del material base es la misma (tamaño de grano 9, color gris claro y grano poligonal) y la zona térmicamente afectada también es similar (presentando granos alargados debido a la distribución que sufrió el material de aporte mientras era depositado en el bisel); y lo mas resaltante es que la principal diferencia entre todas las probetas ocurre es en la zona térmicamente afectada (zona 2, o zona ZTA); estableciendo que es en esta zona donde ocurre el mayor almacenaje de esfuerzos residuales; por lo que da razón a que sea esta zona aquella con mayor atención al momento de analizar las probetas.

Ya que es en la ZTA, la región con más interés a ser evaluada, se presenta a continuación una tabla comparativa de estas zonas; pertenecientes a los diferentes tipos de probetas (A: tratadas térmicamente y B: no tratadas

térmicamente) con sus respectivos grupos (según el grosor de cordón de soldadura al cual representan).

Hay que recordar que la temperatura de recocido no llega a sobrepasar alguna temperatura crítica, por lo tanto la recristalización (indicando un acero frágil, tan duro que se rompe) queda descartada.

Tabla AR.1 Muestras ZTA. Probetas NTT y TT. Zoom 100x.

Muestras de ZTA (Zona Térmicamente Afectada). Comparación: 100x			
Cordón	Grosor 3	Grosor 2	Grosor 1
NTT (No Tratadas Térmicamente)			
TT (Tratadas Térmicamente)			

Se observa que en las probetas NTT, el grano de la ZTA es mucho menos homogéneo y de un tamaño mucho mayor a su tamaño original (tamaño del material base), y mientras el tamaño del grano sea mayor, mayor es el perímetro (límite de grano) que lo rodea, y mayor es la zona por donde puede romper (separarse de otro grano), además que la falta de simetría en el grano facilita la deformación del mismo y a su vez aumenta las probabilidades de ruptura por el área deformada. Por lo tanto, a medida que esta zona presente las características mencionadas con mayor definición y contraste, estará representando mayor acumulación de esfuerzos residuales.



En las probetas TT, el contraste entre tamaño de granos, homogeneidad de forma de los mismos, simetría de grano es mucho menor en comparación a los de las probetas NTT; debido al alivio de tensiones, los granos pueden reacomodar su forma tendiendo a la simetría y a la homogeneidad, disminuyendo posibilidades de ruptura, por desgracia no recupera sus características originales, y por consecuencia, el esfuerzo que esa zona pueda soportar, aunque será mayor al esfuerzo que pudiera soportar al no haberle tratado térmicamente, también será menor al esfuerzo en cualquier otra parte del material base que no haya sido afectado térmicamente.

Se corrobora, al observar las figuras entre diferentes grosores de cordón, y conociendo que el voltaje y amperaje no fueron variables (por lo tanto la temperatura aportada siempre fue la misma sin importar el grosor de cordón de soldadura que se hiciera), que a medida que la fuente de calor móvil permanecía más tiempo en contacto con el material de aporte, mayor era la zona térmicamente afectada y mayores eran los daños microestructurales en ésta. En las profundidades del bisel (donde comenzaba a depositarse el material de aporte del cordón) es donde la ZTA se hace más notable, pues es la zona que mayor tiempo recibe contacto con la fuente móvil de calor.

Se puede apreciar también que a medida que la ZTA almacena esfuerzos residuales, debido al calor y modo “rápido” de enfriamiento, parte de la ferrita tiende a transformarse en perlita (y por lo menos en la probeta NTT-03, se notaron también indicios de martensita, la cual se obtiene de forma casi instantánea al enfriar rápidamente la austenita); se sabe que es así, ya que el ataque químico fue hecho con Nital (ácido nítrico), el cual es utilizado para oscurecer la perlita y poner al descubierto la ferrita (entre otros). Y haciendo referencia a la figura NTT-Grosor3 de la tabla AR.1, que es la más afectada,



se denota con mayor claridad lo sucedido, esa composición de perlita le agrega sus propiedades a la ZTA, haciéndola entonces un poco más dura, ya que la perlita que se ha formado es perlita gruesa; debido a que el enfriamiento no fue excesivamente rápido.

Observando lo que ocurre en el ensayo metalográfico, se podrá corroborar completamente mediante los ensayos de tracción según teoría de Masubuchi y ensayo extensométrico por tracción, entonces:

Si bien los aceros estructurales son de uso común por todos los beneficios que traen consigo sus propiedades mecánicas, los resultados obtenidos demuestran que una fuente de calor móvil (como la generada por cualquier proceso de soldadura) provoca esfuerzos residuales en el material soldado, tanto en el área soldada como en las zonas cercanas a esta área (ya que por estar en contacto también se ve alterada por el calor de la fuente), alterando así las propiedades mecánicas originales.

Estos esfuerzos se generan debido al cambio microestructural que ocurre en el material al estar en contacto con esta fuente de calor. Esto es debido a que al estar muy caliente la fuente, el material en contacto (y el muy cercano) adquiere altas temperaturas, y por ser móvil (la fuente), no permanece mucho tiempo en contacto con una misma área, haciendo entonces que la zona del material que se encuentra caliente comience a enfriarse relativamente rápido, sufriendo un proceso de endurecimiento en las zonas de soldadura y adyacencias, generando un diferencial de esfuerzos en esos lugares en comparación a otras zonas del material más retiradas del área en contacto con la fuente móvil de calor.

Las gráficas fuerza vs elongación indican que las probetas no tratadas térmicamente tienen una menor capacidad de deformación, esto se debe a



que su ductibilidad se ve más afectada debido a los cambios microestructurales que se generaron por la fuente de calor, ya que parte de su ferrita cambio a perlita gruesa.

El hecho de que los esfuerzos calculados sean mayores para las probetas térmicamente tratadas es de esperarse, pues estas probetas también sufrieron la adquisición de los esfuerzos residuales generados por el proceso de soldadura, pero por medio de un tratamiento térmico, se les permitió calentar su microestructura y con esto reacomodar el grano que la conforma y gracias a la velocidad de enfriamiento lenta, aliviaron las tensiones contenidas sin acarrear nuevas, otorgándole una capacidad mayor de resistencia.

Esfuerzos residuales versus grosor de cordón; por medio de lo anteriormente explicado, la razón de que a medida que el grosor del cordón de soldadura sea mayor los esfuerzos residuales presentes también lo sean, tiene lógica; por lo menos, gracias a que estos cordones se generaron por una sola pasada, y tomando en cuenta que este acero cuenta con un porcentaje de carbono (que facilita el calentamiento del material), se puede decir que para hacer un cordón más grueso que el anterior de una sola pasada, la fuente de calor que aporta el material de soldadura, debe permanecer un poco más de tiempo en contacto con esa área del material que con otra donde el cordón es menos grueso; al estar más tiempo cerca, más caliente se pone el material y al dejar de estar en contacto la fuente de calor con el material, este, independientemente de si es un cordón grueso o uno delgado tiene el mismo tiempo de enfriamiento (el cual es rápido) y aquel que se calentó más, por su puesto será aquel que conlleve mayor cantidad de esfuerzos residuales consigo. Entonces, si tomo dos ejemplares de cada grosor y a uno de cada par de ellos se le aplica tratamiento térmico y éste alivia sus tensiones, al realizar las diferencias entre los esfuerzos generados, la mayor diferencia



estará entre el par de probetas cuya probeta sin tratar térmicamente sea la que mantuvo mayor tiempo de contacto con la fuente de calor y acumuló mayor esfuerzos en ella.

Deformación entre diferentes cordones de soldadura: según los resultados obtenidos (refiérase a la tabla 4.15) mientras mayor sea el grosor de cordón de soldadura, mayor será la capacidad que tenga para deformarse (comparando las probetas entre su mismo tipo, térmicamente tratadas con térmicamente tratadas y no tratadas con no tratadas). Esto ocurre porque a medida que la probeta comienza a elongarse, el material de aporte sujeto a ella la sostiene y no deja que parta.

Los esfuerzos de residuales fluencia serán mayor en aquellas probetas con el cordón de soldadura más grueso, simplemente porque es mayor área de material a vencer, sin embargo se debe tomar en cuenta que sin el tratamiento térmico adecuado, la resistencia (aunque sea mayor que la de un cordón menos grueso), será menor a la que sería si no existiera en ella esfuerzos residuales (mientras más grueso el cordón de soldadura, menor es la resistencia de la probeta sin tratar térmicamente en comparación a lo que debería ser); pues esto se debe, a que ya ha sufrido cambios a nivel microestructural, luego del proceso de soldadura, que causaron la pérdida de propiedades mecánicas en la ZTA.

Las probetas al practicarle el ensayo de tracción, rompieron por donde se tenía estimado (por la ZTA, y/o sus cercanías), ya que los esfuerzos resistidos siempre serán mayores en la zona del material base, debido a que los granos poseen un tamaño menor, y sus límites de grano anclan las dislocaciones y además producen una discontinuidad en los planos de deslizamiento.



Los esfuerzos residuales obtenidos por el ensayo de tracción pura pueden obtener el carácter de correctos, ya que la tendencia que se obtuvo de los mismos es similar a la resultante por los ensayos extensométricos; La extensometría (ya que es la técnica más utilizada para el análisis experimental de tensiones, debido a que su fundamento básico es la variación de resistencia producida por el alargamiento o contracción de un hilo conductor).

Volviendo al ensayo metalográfico, la importancia de que los granos sean simétricos, homogéneos entre sí radica en que mientras más deformes se encuentren su capacidad elástica no es la misma en cualquier punto de él, entonces por el punto donde su capacidad sea menor se corre el riesgo de que sea por allí que falle. También tenemos que un tamaño de grano grande aumenta la maleabilidad, ductilidad, es por eso que las probetas con mayor material de aporte (cordón más grueso) pudieron elongarse más que aquellas que no tenían tanto electrodo aportado (cordón menos grueso).



CONCLUSIONES



Por medio de los Análisis de resultado se concluye lo siguiente:

El ensayo de tracción aporta:

- Las probetas no tratadas térmicamente presentan las siguientes características respecto a las probetas térmicamente tratadas:
 - ❖ Menor capacidad para elongarse, debido a los cambios microestructurales que afectan su ductilidad (como lo es la tendencia de la ferrita a transformarse en perlita gruesa).
 - ❖ Los esfuerzos serán menores, debido a la pérdida de resistencia que conlleva el almacenar esfuerzos residuales (debido a la falta de simetría de grano, forma indefinida del mismo y no homogeneidad en la zona térmicamente afectada).
- Las probetas tratadas térmicamente presentan las siguientes características respecto a las no térmicamente tratadas:
 - ❖ Los esfuerzos de fluencia siempre serán mayores, pues al tratarlas térmicamente liberan los esfuerzos residuales generados por el proceso de soldadura y recupera una buena parte de su capacidad de resistencia inicial (antes de la soldadura).



- Grosor de cordón de soldadura:
 - ❖ Mientras más grueso sea el cordón de soldadura, los esfuerzos de resistencia que se registren (al menos los de fluencia) seguro serán mayores en comparación a un grosor inferior. Y es una diferencia notable.
 - ❖ A mayor grosor de cordón de soldadura, mayor será la elongación que se registre.
 - ❖ Una probeta con un grosor de cordón de soldadura soportará un mayor esfuerzo en comparación a una probeta con un grosor de cordón de soldadura menor. Pero la misma probeta resistirá menos esfuerzo en comparación a una probeta similar que haya sido tratada térmicamente (Para corroborar esto, por comparación; el punto donde se determine el esfuerzo deberá ser el mismo para ambas probetas: Fluencia, Tracción o Ruptura).

El ensayo de extesometría aporta:

La capacidad de deformación de las probetas es proporcional al grosor de cordón de soldadura (debido al aumento del tamaño del grano que compone el material por el contacto con la fuente de calor móvil al momento de soldar) y por consecuencia el esfuerzo que estos soportan son mayores.

Las probetas tratadas térmicamente tienen mayor capacidad de deformación que las no tratadas térmicamente, ya que (evaluando un mismo grosor de cordón) ambas probetas poseen el grano crecido relativamente de igual tamaño pero a diferencia de las probetas tipo B, las probetas tipo A están libres de tensiones residuales y por consiguiente pueden soportar un esfuerzo mayor.

Comparando los ensayos de tracción puro y extensometría por tracción:

El ensayo extensométrico, certifica lo descrito por el ensayo a tracción, pues, aunque este solo es válido para el límite elástico (debido a que se aplica la Ley de Hooke) igual indica que a medida que el cordón de soldadura es mayor, los esfuerzos residuales en las cercanías de este cordón también lo serán.

Con el análisis metalográfico en conjunto con las experiencias de los ensayos aportan:

- Los esfuerzos residuales ocurren cuando una fuente de calor cambia la microestructura de los aceros (tamaño de grano, simetría y forma de los mismos, entre otras características). Generalmente porque éste es calentado hasta una alta temperatura y se deja enfriar rápidamente.
- Existen varios tipos de zonas afectadas por la fuente móvil de calor en el material, la primera es la zona que se calienta directamente por contacto con la fuente, la segunda es la zona que se calienta por conducción al estar en contacto con la primera zona, y la última es el resto del material que poco se ve afectado por la transferencia de calor.
- Debido al punto anterior se puede concluir que la adquisición de esfuerzos residuales por parte del material es directamente



proporcional a la cercanía y/o el contacto (y tiempo de contacto) que tenga cierta zona con la fuente móvil de calor.

- La comparación de todos los análisis realizados respecto a un modelo teórico sería ideal, mas la Teoría de Masubuchi por ensayos a tracción no es más que la que el establece como la diferencia entre los esfuerzos calculados para dos probetas que presentan las mismas características, exceptuando que una fue tratada térmicamente y la otra no, y es debido a que los ensayos realizados en este trabajo investigativo fueron hechos del modo que propone el modelo teórico, se toman los resultados obtenidos como el mismo modelo a comparación, entonces se verifica la credibilidad de estos, consiguiendo una tendencia del objeto de estudio (comportamiento de los esfuerzos residuales según grosor de cordón de soldadura) comparándolos con un ensayo comúnmente practicado y de fiabilidad mayor, como lo es el ensayo por extensometría, ambos obtuvieron la misma tendencia; e incluso las características presentadas por los datos conseguidos mediante el ensayo de tracción concuerdan con los análisis realizados según ensayo metalográfico, haciendo más veraz los resultados.
- Generar un cordón de soldadura grueso resulta más resistente, pero se debe tomar en cuenta que mientras más se aumente el cordón de soldadura más se está exponiendo el metal a altas temperaturas, pudiendo además de agregar esfuerzos residuales, ocasionar deformaciones en el material.



RECOMENDACIONES



Si bien los aceros estructurales son de uso común por todos los beneficios que traen consigo sus propiedades mecánicas, los resultados obtenidos demuestran que una fuente de calor móvil (como la generada por cualquier proceso de soldadura) provoca esfuerzos residuales, tanto en el área soldada como en su cercanía, y estos deben ser tomados en cuenta, pues sobreestimarlos podría ser causa de algún accidente o fallo de diseño.

De ser posible, pudiera realizarse un trabajo sobre los esfuerzos residuales según impacto a probetas que han sufrido alivio de tensiones, y probetas que no lo han sufrido.

Si se realizara un cordón de soldadura grueso, se deben tomar las precauciones necesarias para controlar la temperatura, y así no deformar el material ni activar alguno de sus componentes que pudiera dañarlo.

Referencias Bibliográficas

- [1] ASTM E- 8M – 01. (2001) **Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.**
- [2] **AWS Welding Handbook.** Eighth Edition volume 2, Welding Process.
- [3] **AWS Welding Handbook.** Ninth Edition volume 1, science and techno.
- [4] ASME section VIII, division 1. (2007), **Rules for construction of pressure vessels.**
- [5] Bello E., Marchena M., (2008). ***Determinación de los esfuerzos residuales en uniones soldadas a tope a través de la teoría de Masubuchi.*** Trabajo Especial De Grado. Universidad de Carabobo, Carabobo-Venezuela.
- [6] Bejarano A., (2007). ***Consideraciones De Diseño Y Factores Que Afectan El Desempeño De Las uniones Soldadas Bajo Carga Cíclica.*** 8° Congreso Iberoamericano De Ingeniería Mecánica. Bogotá-Colombia.
- [7] Burgos Sola J., Cruz Crespo A., Álvarez Luna M., García Arteaga J. (2008). ***Reducción de esfuerzos residuales en uniones soldadas usando tratamiento con explosivo.*** Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 12-1, pp. 5-12, ISSN: 1665-529X.

- [8] **Compendio de Normas para Productos de Acero.** (2002). Gerdau AZA S.A.
- [9] García Rodríguez, Y., Burgos Sola, J., (2006) ***Procedimiento para la obtención mediante MEF de los campos térmicos, deformaciones y tensiones residuales en uniones soldadas.*** Centro de Investigaciones de Soldadura. Facultad de Ingeniería Mecánica. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. Carretera a Camajuaní Km. 5 ½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba. p.p. 3
- [10] Horioka J., Alencastre J., (2002). ***Estudio de los esfuerzos en uniones soldadas por el método de los elementos finitos.*** Grupo de Métodos Computacionales. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima-Perú.
- [11] Jacobino J., (2006). ***Tensiones Residuales en la Soldadura y Métodos para su Atenuación.*** Centro de Investigación de Soldadura, Facultad de Ingeniería Mecánica. Universidad Central de Las Villas, Santa Clara-Cuba.
- [12] Luengo C., Cardona A., Risso J., (2006). ***Determinación De Tensiones Residuales En Discos Sometidos A Grandes Gradientes Térmicos Durante El Servicio.*** Centro Internacional de Métodos Computacionales en Ingeniería (CIMEC-INTEC). Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe-Argentina.
- [13] Mousavi A., Miresmaeili R., (2007). ***Experimental and numerical analyses of residual stress distributions in TIG welding process for 304L stainless steel.*** University of Tehran, Tehran-Iran.

- [14] Pérez C., Ortiz A., Moglioni M., Vedia L., (2003). ***Evaluación De Tensiones Residuales En Soldadura De Aluminio Aa6061-T6 Obtenida Por El Método De Fricción - Agitación (Fsw)***. Jornadas Conamet Simposio de Materiales, Santiago de Chile-Chile.
- [15] **Proceso de soldadura**. (2009). [on line]. Disponible en: <http://es.wikipedia.org/wiki/Soldadura>.
- [16] Riveros S., Castillo R., Bermont V., Laffertte J., (2003). ***Influencia De Los Tratamientos Térmicos Post-Soldadura En Las Propiedades Mecánicas En Fundiciones Nodulares***. Jornadas Conamet Simposio de Materiales, Santiago de Chile-Chile.
- [17] **Random Imagens**. Oración clave: “Tipos de Soldadura”. (2010). [on line]. Disponible en: <http://www.google.co.ve/imghp?hl=es&tab=wi>
- [18] Richter-Trummer V., Tavares S., Moreira P., Figueiredo M., Castro P., (2008). **Residual Stress Measurement Using The Contour And The Sectioning Methods In A Mig Weld: Effects On The Stress Intensity Factor**. J Ciencia e Tecnologia dos Materiais, 20 – 1
- [19] Serna-Giraldo, C., Rodríguez Padovese, L. (2007) ***Monitoreo de uniones soldadas de acero estructural utilizando ruido magnético de Barkhausen***. IV Conferencia Panamericana de END Buenos Aires. p.p. 7.
- [20] Timoshenko S., (1991). ***Mecánica de Materiales***, Segunda Edición, Stanford University, grupo editorial Iberoamérica.