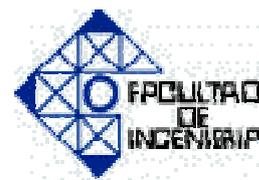




UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Determinación de los esfuerzos residuales en uniones soldadas a tope a través de la teoría de Masubushi.

Proyecto de grado presentado ante la ilustre Universidad de Carabobo para optar al título
de Ingeniero Mecánico

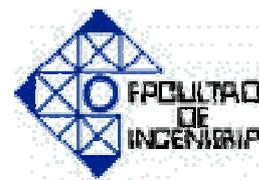
Profesor Guía:
MSc. Ing. Edwin Peña

Realizado por:
Elisa Bello.
Mariangélica Marchena.

Octubre 2008.



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**Determinación de los esfuerzos residuales en uniones soldadas
a tope a través de la teoría de Masubushi.**

DEDICATORIA.

A mis padres. A mi mamá Saida por su inmenso amor, su apoyo incondicional y su dedicación abnegada, porque gracias a ella estoy aquí. A mi papá Andrés, por ser un padre ejemplar, por ayudarme siempre y por todos sus conocimientos brindados. Los amo.

A mis hermanos. Carmen, Andrés N., Nabor y Andrés E., por su amor, por todo el cariño y porque son un regalo. Los quiero mucho.

A mis abuelos, Elisa y Andrés, por su gran cariño y sus consejos, por ayudarme en todo momento. En especial a la memoria de mi abuelo, que desde el cielo me guía.

A Jesús José, por ser una persona maravillosa y estar a mi lado a lo largo de estos 5 años brindándome todo su apoyo y su gran amor. Te amo demasiado.

A mi madrina Magdiel, que aunque no esta ahora con nosotros, siempre estuvo allí dándome lo mejor de ella, por todas sus enseñanzas y porque siempre estará en mi corazón.

A mis tíos, Yelitza, Yaquelin, Nabor, Francisco y en especial Yajaira, por su cariño, sus consejos y su colaboración.

A mis amigos. Carlos, Luis C., José, Luis A., que siempre han estado a lo largo de esta carrera, por su compañerismo y amistad.

Elisa del Carmen Bello Parra.

DEDICATORIA.

Este trabajo se lo dedico con mucho amor y cariño:

A ti DIOS que me distes la oportunidad de vivir y de regalarme una familia maravillosa.

*A mis padres **Haydee** y **Cruz** por su colaboración, amor y apoyo infinito que me han brindado durante todo el transcurso de mi vida, gracias por todo papá y mamá por darme una carrera para mi futuro y por creer en mí, los quiero con todo mi corazón y este trabajo que me llevó un año hacerlo es para ustedes, por ser la mas chica de sus hijas aquí esta lo que ustedes me brindaron, solamente les estoy devolviendo lo que ustedes me dieron en un principio.*

A mis hermanos Rafael, Mariangel y Eliel, por estar siempre conmigo apoyándome en todo momento.

*A mis abuelas **Efigenia** y **Rita** por haberme regalado esos padres maravillosos; y aunque no están aquí, se que están felices porque su nieta cumplió su sueño.*

Mariangelica Marchena.

AGRADECIMIENTOS.

Este trabajo se lo agradecemos:

A ti DIOS que nos ayudaste en todo momento a superar los obstáculos que se nos presentaron.

*A nuestro excelente guía el Profesor **Edwin Peña** por su colaboración, confianza, apoyo y amistad brindada durante el desarrollo de este trabajo. Nunca lo vamos a olvidar.*

A la Universidad de Carabobo.

A la Escuela de Ingeniería Mecánica.

Al Ing. Andrés Bello por su grandiosa ayuda.

A Jesús Álvarez por su colaboración incondicional.

RESUMEN.

La mayoría de los elementos de máquinas poseen detalles geométricos en los que el valor del esfuerzo se incrementa ante la presencia de una muesca o en cualquier cambio brusco de sección; esto se complicaría si los elementos necesitaran ser ensamblados o reparados por soldadura, ya que está demostrado que cuando se utiliza algún proceso de soldadura; como el de soldadura a tope, de arco eléctrico con electrodo revestido como material de aporte, que es uno de los métodos industriales más comunes, puede traer alteraciones en los materiales. Numerosos autores coinciden en sus análisis de la problemática al igual que en este trabajo por lo que es importante considerar sus consecuencias nocivas. Lo que se desea con la realización de este estudio es predecir los esfuerzos residuales teóricamente, experimentalmente y mediante el método de los elementos finitos (MEF), aplicando la teoría de Masubushi, para aumentar los niveles de confiabilidad funcional de tales elementos, asegurando que los mismos no sean susceptibles a fallas bajo condiciones de operación que puedan preverse en forma razonable. Aunque está claro que los cordones de soldadura en la realidad no sólo están sometidos a cargas de tracción, en esta investigación se consideró sólo la presencia de este tipo de carga, debido a que estadísticamente está demostrado que las cargas de tracción es la mayor causa de falla de estos elementos. De las consideraciones hechas en este estudio [6], se puede concluir que los esfuerzos residuales serán iguales al límite de fluencia del material, una vez que el elemento ha sido sometido a un proceso de soldadura a tope (SMAW). Con este estudio se ofrece una herramienta útil que permite realizar diseños confiables, seguros, duraderos, económicos y eficientes de juntas soldadas sometidas a cargas estáticas de tracción.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
INTRODUCCIÓN.	1
CAPÍTULO I. EL PROBLEMA.	4
1.1 Planteamiento del problema.	4
1.2 Objetivos de la Investigación.	5
1.2.1 Objetivo General.	5
1.2.2 Objetivos Específicos.	5
1.3 Justificación de la investigación..	6
1.4 Limitaciones, Delimitación y/o Alcances.	7
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.	10
2.1.- Antecedentes de la Investigación.	10
2.2.- Bases Teóricas.	13
2.2.1.- Unión por Soldadura.	13
2.2.2.- Soldadura por arco Eléctrico con Electrodo Revestido.	14
2.2.2.1.- Definición y descripción general.	14
2.2.2.2.- Principios de funcionamiento.	14
2.2.2.3.- Protección del arco.	16
2.2.2.4.- Aplicaciones de la soldadura por arco.	18
2.2.3.- Esfuerzos Residuales.	20
2.2.3.1.- Clasificación de las tensiones residuales.	28
2.2.3.2.- Detección de las tensiones residuales.	30
2.2.4.- Teorema de Castigliano.	33
2.2.5.- Criterio de Von Mises.	35
2.2.6.- Ensayo de Tracción.	37
2.2.6.1.- Características de los materiales elásticos.	38
2.2.6.2.- Curva Tensión - Deformación	38

2.2.7.- Ensayo de Dureza	41
2.2.7.1.- Métodos para medir dureza	41
2.2.7.2.- Números de dureza.	44
2.2.8.- Tratamientos Térmicos.	45
2.2.9.- Método de Elementos Finitos.	48
2.2.10.- Visual Nastran 4D TM .	50
2.3.- Definición de Término Básicos.	51

CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO.

3.1.- Nivel de la Investigación.	55
3.2.- Diseño de la Investigación.	55
3.2.1.- Determinación teórica de los esfuerzos residuales.	55
3.2.2.- Determinación experimental de los esfuerzos residuales.	58
3.2.2.1.- Selección del material para las probetas.	58
3.2.2.2.- Mecanizado de las probetas.	58
3.2.2.3.- Realizar tratamiento térmico a las probetas.	59
3.2.2.4.- Soldadura de las probetas.	60
3.2.2.5.- Ensayo de tracción.	62
3.2.2.6.- Ensayo de esfuerzo superficial.	63
3.2.3.- Determinación de los esfuerzos residuales mediante método de elementos finitos.	65
3.2.3.1.- Diseño de la probeta 3D.	65
3.2.3.2.- Simulación de Visual Nastran 4D TM .	65

CAPÍTULO IV. CÁLCULOS Y RESULTADOS.

4.1.- Determinación de la Magnitud de los Esfuerzos Residuales a través de Modelos teóricos en Soldaduras a Tope.	71
4.1.1.- Cálculo del esfuerzo máximo y esfuerzo nominal.	71

4.1.2.- Cálculo del esfuerzo residual teórico.	77
4.1.2.1.- Cálculo del esfuerzo residual teórico partiendo de la relación con la intensidad de corriente de la soldadura.	77
4.1.2.1.- Cálculo del esfuerzo residual teórico partiendo del método de corrimiento.	77
4.2.- Determinación de la Magnitud de los Esfuerzos Residuales a través de Ensayos Realizados a Probetas en Función de las tensiones Aplicadas.	79
4.2.1.- Ensayo de tracción.	79
4.2.1.1.- Resultados ensayo de tracción a probetas testigos.	79
4.2.1.2.- Resultados ensayo de tracción a probetas no testigos.	79
4.2.1.3.- Cálculo de esfuerzo residual en ensayo de tracción.	80
4.2.2.- Ensayo de tensión superficial.	82
4.3.- Determinación de los Esfuerzos Residuales Mediante el Método de Elementos Finitos.	84
4.3.1.- Resultados obtenidos en la simulación usando Visual Nastran 4D™.	84
4.3.1.1.- Resultados obtenidos en la simulación de probetas no testigos.	84
4.4.- Validación del Modelo Computarizado por medio de la Comparación de los Resultados Obtenidos en el Análisis Teórico y Experimental.	91
CAPÍTULO V. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.	94
CONCLUSIONES.	100
RECOMENDACIONES.	102
BIBLIOGRAFÍA.	104
APÉNDICES.	106



INTRODUCCIÓN.

Generalmente los elementos de máquinas se componen del ensamble o unión de varias piezas para satisfacer las necesidades requeridas. El proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido como material aporte en uniones soldadas a tope, es uno de los métodos mas utilizados para este fin. Sin embargo, es importante destacar que durante este proceso de soldadura se puede generar la aparición de tensiones internas y deformaciones, debido a los grandes desprendimientos de calor originados en dicho proceso y a las posteriores contracciones durante el enfriamiento.

En muchos casos estas tensiones internas no son consideradas para el diseño de una junta soldada, lo que ocasiona que se les asigne una resistencia que no corresponde con la realidad. Por todo esto nuestro estudio plantea la determinación de estos esfuerzos usando la teoría de Masubushi, previamente validada por un ensayo experimental real y un modelo computarizado. Lo que genera una alternativa para obtener un resultado más confiable en el diseño de este tipo de unión soldada.

Este trabajo de investigación está estructurado de la siguiente manera:

Capítulo I: El Problema. En este capítulo se explica el planteamiento del problema; además se presentan los objetivos que se formulan para lograr dicho propósito, así como también la justificación Limitaciones, Delimitación y/o Alcances del problema.

Capítulo II: Marco Teórico. En este capítulo se presentan los antecedentes de la investigación y todos aquellos fundamentos teóricos necesarios para la realización de este trabajo especial de grado.



Capítulo III: Marco Metodológico. Este capítulo plantea el nivel de la investigación y la metodología a seguir durante el desarrollo del proyecto. Se presenta de forma detallada el procedimiento requerido para cumplir con las etapas propuestas.

Capítulo IV: Cálculos y Resultados. Este capítulo contiene todos los cálculos realizados y los resultados obtenidos para cumplir con el objetivo general y los objetivos específicos de este trabajo especial de grado.

Capítulo V: Análisis y Discusión de Resultados. En el capítulo V se realiza un análisis de los resultados obtenidos en el capítulo IV y se establecen comparaciones con algunos autores de trabajos similares al caso de estudio.

1.- EL PROBLEMA.

1.1.- Planteamiento del problema.

El proceso de diseño se inicia con la identificación de las necesidades, para luego plantear el problema en concreto. Para lograr un diseño adecuado de soldadura se debe garantizar la calidad de la misma, y así mantener la integridad física de las uniones soldadas.

Durante los procesos de soldadura a tope, existen grandes desprendimientos de calor, que dan lugar a dilataciones de la pieza y a las posteriores contracciones durante el período de enfriamiento, impedida por el resto del material base, lo cual origina la aparición de tensiones internas y deformaciones.

Los esfuerzos residuales son habitualmente identificados como uno de los factores que influyen en el deterioro de las uniones soldadas. Estos son consecuencia de la interacción de los siguientes procesos separados: expansión impedida y contracción resultante de una distribución de temperatura no-homogénea, efectos de enfriamiento rápido (temple) y, transformaciones de fase. La composición química del material, la resistencia a la cedencia y el grado de rigidez son factores decisivos en la formación de los esfuerzos residuales.

La relación entre los cambios complejos de temperatura que tienen lugar en la soldadura y las deformaciones plásticas, obligan a seguir determinados pasos, como son, el análisis del flujo de calor, de los desplazamientos, de las deformaciones y por último las tensiones térmicas residuales. En las uniones soldadas se pueden encontrar diferentes tipos de tensiones residuales fundamentalmente, las tensiones transversales y longitudinales (o también llamadas de alargamientos), a lo largo del cordón o en toda



su longitud, en las secciones transversales al cordón y las tensiones longitudinales y transversales en espesor.

Las tensiones térmicas que se originan en los procesos de soldadura, pueden ser de tracción y de compresión. Las altas tensiones residuales a tracción son conocidas por promover fractura y fatiga. Esta adversidad afecta la fabricación, el ensamblaje, y la vida de servicio de las estructuras.

Todo esto ocasiona una deficiencia en la confiabilidad, crea incertidumbre y establece según las aplicaciones de las uniones soldadas un nivel de riesgo mayor al necesario, al momento de realizar diseños y/o análisis de uniones soldadas.

Por lo tanto, la predicción y control de las tensiones residuales y la deformación a partir del proceso de soldadura es extremadamente importante, para poder optimizar el proceso de diseño de juntas soldadas a tope y garantizar la vida útil esperada así como el incremento de la confiabilidad.

1.2.- Objetivos.

1.2.1.- General.

Determinar la magnitud de los esfuerzos residuales en uniones soldadas a tope de acero AISI 1045 realizada por arco eléctrico con electrodo revestido como material de aporte, mediante la teoría de Masubushi.

1.2.2.- Específicos.

- Determinar la magnitud de los esfuerzos residuales a través de modelos teóricos en soldaduras a tope.

- Realizar ensayos a probetas para obtener valores reales de esfuerzos residuales en función de las tensiones aplicadas.

- Desarrollar un modelo computarizado a través del Método de los Elementos Finitos, que permita simular el cordón de soldadura a tope.

- Validar el modelo computarizado por medio de la comparación de los resultados obtenidos a través de la simulación y el análisis teórico.

- Validar el modelo computarizado por medio de la comparación de los resultados obtenidos a través de la simulación y el ensayo con las probetas.

- Analizar y discutir los resultados obtenidos.

1.3.- Justificación.

En todo diseño se debe garantizar la seguridad de que sus creaciones no sufran fallas antes de lo esperado. Cuando un elemento de máquina es sometido a cargas, se produce una distribución de esfuerzos en su interior que debe ser considerada para obtener los mejores resultados en el diseño y construcción del mismo.

Los procesos de soldaduras no son la excepción, por lo que se requiere analizar y determinar la resistencia que poseen las uniones soldadas para generar una gran confiabilidad, la cual es necesaria para cumplir con el funcionamiento óptimo del acople.

Debido a que la soldadura a tope por arco con electrodo revestido es ampliamente utilizada en la fabricación de numerosos productos, desde grandes fabricaciones como barcos, locomotoras, automóviles o grandes depósitos, a pequeños instrumentos de uso



domésticos y en la actualidad las instalaciones de soldadura por arco eléctrico permiten el soldeo de toda la gama de espesores, desde los más finos hasta los más gruesos, es seleccionado este método para realizar las uniones soldadas en este estudio.

Se emplea el Método de los Elementos Finitos, porque este permite transformar un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado y así poder conocer lo que sucede en el interior del cuerpo de este modelo a partir del conocimiento de un número determinado y finito de puntos.

Por todo lo expuesto se verifica la importancia que tiene determinar los esfuerzos residuales en las uniones soldadas sometidas a una determinada carga, ya que predecirá con mayor exactitud el factor de seguridad para el cual estarán diseñadas las uniones soldadas.

1.4.- Limitaciones, Delimitación y/o Alcances.

- No se tiene disponibilidad absoluta de los laboratorios para realizar las pruebas correspondientes, ya que son utilizados para efectuar actividades programadas de la cátedra de Materiales y Procesos de Fabricación.

- No se dispone de estudios previos a la realización de este trabajo relacionado con la determinación de los esfuerzos residuales en uniones soldadas a tope.

- Los estados de carga a los cuales se someterá el modelo serán de tracción.

- El trabajo de investigación se efectuará para determinar los esfuerzos residuales globales en uniones soldadas a tope de acero AISI 1045.



- Para la determinación de los esfuerzos residuales no se considerarán los efectos ambientales, solo se tomará en cuenta la geometría de la unión soldada y los efectos térmicos.

- El análisis de los esfuerzos residuales se llevará a cabo mediante el programa Visual Nastran 4DTM.

- El tipo de cordón de soldadura utilizado será simple a tope.

- El análisis se efectuará para soldaduras por arco eléctrico con electrodo revestido como material de aporte.





2.- MARCO TEÓRICO.

2.1.- Antecedentes de la Investigación.

“Obtención De Tensiones Residuales A Lo Largo De Un Cordón De Soldadura Mediante Métodos Analíticos Y Experimentales.”

Yenei García Rodríguez, José Burgos Sola, Francisco Gil Juan Rivalta
Centro de Investigaciones de Soldadura, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Planta Mecánica “Fabric Aguilar Noriega”, Santa Clara, Villa Clara, Cuba, 2006.

En el presente trabajo se muestra parte de los resultados logrados en la investigación que se está realizando, basado en los parámetros tecnológicos del proceso de soldadura por arco sumergido (SAW) aplicando la modelación mediante MEF. Los campos de temperaturas provocados por la soldadura se basaron en las propiedades de juntas de acero ASTM A-36, en condiciones de fuerte embridamiento. Se tomaron en consideración aspectos de la transferencia de calor, así como la variación de las propiedades del material en función de la temperatura (no lineal). Se efectuaron comparaciones de las tensiones residuales (longitudinales y transversales) a lo largo del cordón de soldadura, obtenidos entre métodos analíticos, experimentales y con aplicación del MEF en casos similares.

“Numerical Study Of The Residual Stress Field During Arc Welding With A Trailing Heat Sink.”

F. A. Soul & Z. Yanhua

Wessex Institute of Technology, USA, 2005.

En esta investigación se analizaron las tensiones y las distorsiones inducidas por el proceso de arco, ya que son altas en comparación con otros procesos de soldaduras por



fusión tales como LBW o EBW; además presenta de forma numérica los resultados obtenidos en cuanto a la distribución de la temperatura, la distorsión y el campo de tensiones residuales desarrollado durante el proceso convencional de soldaduras. En este estudio se consideró el Método de los Elementos Finitos y el programa ANSYS.

Al analizar los resultados se obtuvo que esta técnica mejora firmemente el proceso de soldadura minimizando la tensión residual y la distorsión, especialmente cuando se aplicaron pequeños espesores. Se comprobó que la distancia entre el arco de soldadura y el enfriamiento es un factor importante para mejorar los resultados.

“Determinación De Tensiones Residuales En Discos Sometidos A Grandes Gradientes Térmicos Durante El Servicio”.

César Luengo, Alberto Cardona, José Risso

Centro Internacional de Métodos Computacionales en Ingeniería (CIMEC-INTEC).

CONICET – Universidad Nacional del Litoral

Güemes 3450, (3000) Santa Fe, Argentina, 2006.

En este trabajo se propone un método para determinar el valor de dichas tensiones residuales en piezas axisimétricas, utilizando instrumental de metrología dimensional de uso corriente en la industria de autopartes, en conjunto con un programa de computación de cálculo numérico. Considerando la importancia de la magnitud de las tensiones residuales para conocer la aptitud de las piezas para el servicio al que serán sometidas, sobre todo en elementos vitales para el funcionamiento de equipos, sujetos a cargas térmicas importantes y esfuerzos mecánicos severos.



“Estudio De Los Esfuerzos En Uniones Soldadas Por El Método De Los Elementos Finitos”.

José E. Horioka Osaka y Jorge Alencastre Miranda

Grupo de Métodos Computacionales

Facultad de Ciencias e Ingeniería. Sección Ingeniería Mecánica

Pontificia Universidad Católica del Perú. Av. Universitaria cuadra 18 s/n. San Miguel.

Lima. Perú, 2002. Gmc@pucp.edu.pe

El siguiente trabajo se centra en el estudio de la distribución de esfuerzos en uniones soldadas típicas sometidas a cargas estáticas de diseño, teniendo en consideración la variación de algunos parámetros geométricos, utilizando para ello el método de los elementos finitos (MEF).

Los tipos de uniones simuladas en esta investigación son las recomendadas por la AWS. A demás se utilizaron las propiedades correspondientes a un acero estructural ASTM A36.

En este trabajo se consideró que los parámetros geométricos que afectan principalmente a una unión soldada son la sobre monta y las socavaciones, estos dos factores pueden variar significativamente el valor de los esfuerzos en comparación con el resultado del cálculo analítico.

2.2.- Bases Teóricas.

2.2.1.- Unión por Soldadura.

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

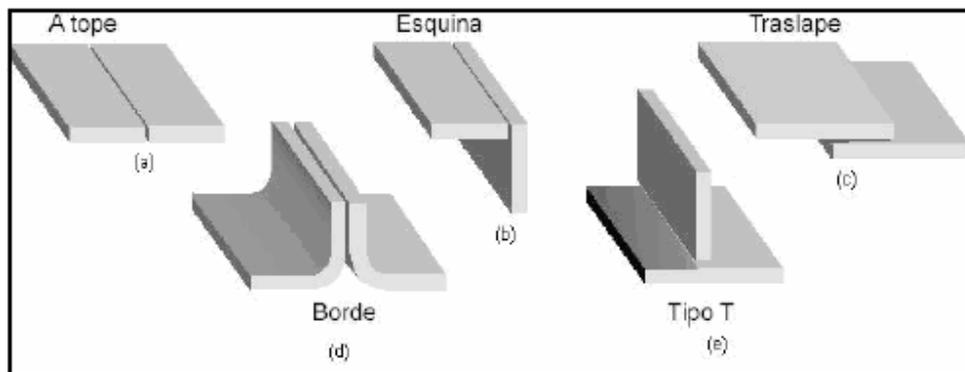


Figura 1.- Tipos de uniones por soldadura.

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

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

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

c) Unión traslape. Esta unión consiste en dos partes que se superponen.

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



e) Unión en T. En la unión en T, una parte es perpendicular a la otra en una forma parecida a la letra T. [1]

2.2.2.- Soldadura por arco Eléctrico con Electrodo Revestido.

2.2.2.1.- Definición y descripción general.

La soldadura por arco con electrodo revestido (Shielded metal arc welding, SMAW) es un proceso de soldadura por arco en el que se produce coalescencia de metales por medio del calor de un arco eléctrico que se mantiene entre la punta de un electrodo cubierto y la superficie del metal base en la unión que se está soldando. El núcleo del electrodo cubierto consiste en una varilla de metal sólida de material estirado o colado, o bien una varilla fabricada encerrando metal en polvo en una funda metálica. La varilla del núcleo conduce la corriente eléctrica al arco y suministra metal de aporte a la unión. Las funciones principales de la cobertura del electrodo son estabilizar el arco y proteger el metal derretido de la atmósfera por medio de los gases que se crean cuando el recubrimiento se descompone por el calor del arco.

La protección empleada, junto con otros ingredientes de la cobertura y del alambre del núcleo, controlan en gran medida las propiedades mecánicas, la composición química y la estructura metalúrgica del metal de soldadura, así como las características de arco del electrodo. La composición de la cobertura del electrodo varía dependiendo del tipo de electrodo.

2.2.2.2.- Principios de funcionamiento.

La soldadura por arco con electrodo revestido es por mucho el más ampliamente utilizado de los procesos de soldadura por arco. Aprovecha el calor del arco para

derretir el metal base y la punta de un electrodo consumible cubierto. El electrodo y la pieza forman parte de un circuito eléctrico que se ilustra en la figura 2. Este circuito comienza con la fuente de potencia eléctrica e incluye los cables de soldadura, un portaelectrodos, una conexión con la pieza de trabajo, la pieza a soldar y un electrodo de soldadura por arco. Uno de los dos cables de la fuente de potencia se conecta a la pieza; el otro se conecta al portaelectrodos.

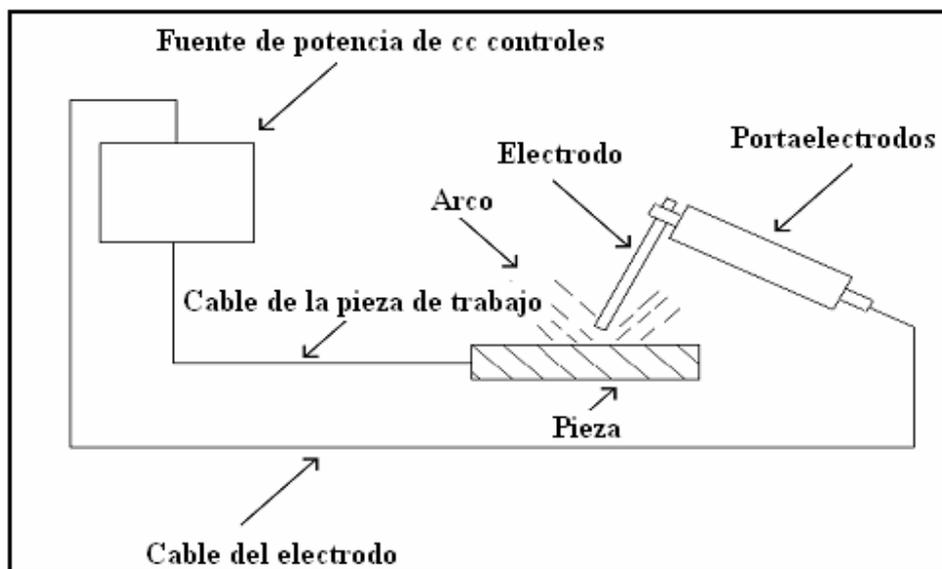


Figura 2.- Elementos de un circuito de soldadura típico para soldadura de metal protegido.

Fuente: Bazán N., C. (1998). Determinación de electrodos y cálculo de costos de soldadura al arco asistidos por computadora. Perú: Universidad de Piura.

La soldadura se inicia cuando se enciende un arco eléctrico entre la punta del electrodo y la pieza. El intenso calor del arco derrite la punta del electrodo y la superficie de la pieza. En la punta del electrodo se forman con rapidez pequeños glóbulos de metal fundido, los cuales se transfieren a través del chorro del arco hasta el charco de soldadura fundida. De esta forma se deposita metal de aporte conforme el electrodo se va consumiendo. El arco se mueve sobre la pieza con una longitud de arco y velocidad de desplazamiento apropiadas, derritiendo y fusionando una porción de



metal base y añadiendo continuamente metal de aporte. Puesto que el arco es una de las fuentes de calor que alcanzan las más altas temperaturas [se han medido temperaturas por encima de 5.000 °C (9.000 °F) en su centro], la fusión del metal base se efectúa en forma casi instantánea. Si las soldaduras se hacen en posición plana u horizontal, la transferencia de metal es inducida por la fuerza de la gravedad, la expansión del gas, fuerzas eléctricas y electromagnéticas y la tensión superficial. Si se suelda en otras posiciones, la gravedad actuará oponiéndose a las demás fuerzas.

El proceso requiere suficiente corriente eléctrica para derretir tanto el electrodo como una cantidad adecuada del metal base. También requiere un espacio apropiado entre la punta del electrodo y el metal base o el charco de soldadura. Estos requisitos son necesarios para establecer las condiciones en que se llevará a cabo la coalescencia. Los tamaños y tipos de electrodos para soldadura por arco de metal protegido definen los requerimientos de voltaje (dentro del intervalo global de 16 a 40 V) y de amperaje (dentro del intervalo global de 20 a 550 A) del arco.

La corriente puede ser alterna o continua, dependiendo del electrodo empleado, pero la fuente de potencia debe ser capaz de controlar el nivel de corriente dentro de un intervalo razonable para responder a las complejas variables del proceso de soldadura en sí.

2.2.2.3.- Protección del arco.

La acción de protección del arco, ilustrada en la figura 3, es en esencia la misma para todos los electrodos, pero el método específico de protección y el volumen de escoria producido varían de un tipo a otro. El grueso de los materiales de cobertura de algunos electrodos se convierte en gas por el calor del arco, y sólo se produce una pequeña cantidad de escoria. Los electrodos de este tipo dependen en buena medida de un escudo gaseoso para evitar la contaminación por parte de la atmósfera. El metal de

soldadura de tales electrodos puede identificarse por la capa incompleta o clara de escoria que cubre a la franja.

En los electrodos situados al otro extremo, el grueso de la cobertura se convierte en escoria por el calor del arco, y sólo se produce un volumen pequeño de gas protector. Los diminutos glóbulos de metal que se transfieren por el arco están cubiertos totalmente por una película delgada de escoria fundida, la cual flota en la superficie del charco de soldadura porque es más ligera que el metal. La escoria se solidifica después de hacerlo el metal de soldadura. Las soldaduras hechas con estos electrodos se identifican por los gruesos depósitos de escoria que cubren por completo las franjas de soldadura. Entre estos extremos hay una amplia variedad de tipos de electrodos, cada uno con una combinación diferente de protección por escoria y por gas.

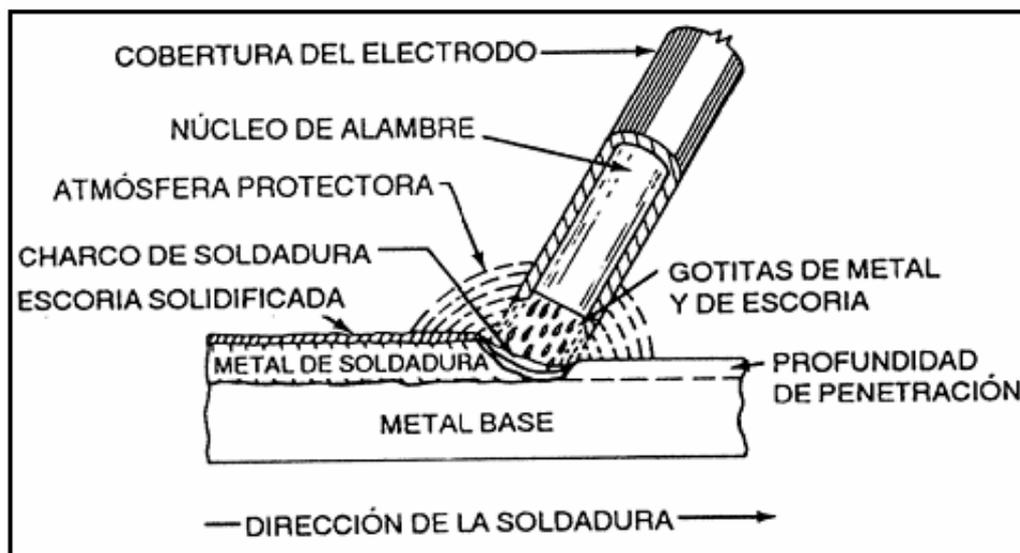


Figura 3.- Acción protectora del arco en la soldadura por arco de metal protegido.

Fuente: Bazán N., C. (1998). Determinación de electrodos y cálculo de costo de soldadura al arco asistidos por computadora. Perú: Universidad de Piura

Las variaciones en la proporción de protección por escoria y por gas también influyen en las características de soldadura de los electrodos cubiertos. Los electrodos que producen mucha escoria pueden transportar un amperaje elevado y ofrecen altas tasas de deposición, lo que los hace ideales para soldar piezas gruesas en la posición plana. Los electrodos que producen poca escoria se usan con amperajes menores y ofrecen tasas de deposición más bajas. Estos electrodos producen un charco de soldadura más chico y son apropiados para soldar en cualquier posición.

Por las diferencias en las características de soldadura, un tipo de electrodo cubierto será por lo regular el más adecuado para una aplicación dada. [2]

2.2.2.4.- Aplicaciones de la soldadura por arco.

Posición de soldadura		Clasificación
1. De plano horizontal		A
De filete horizontal		A
2. Horizontal		A
3. Vertical		A
4. De posiciones elevadas		A
5. Tubería fija		A

Figura 4.- Posiciones y aplicaciones típicas de la S.M.A.W.

Fuente: Howard, C. (1981). Modern Welding Technology (3^{ra} Ed). New Jersey: Regents/Prentice Hall



El método de aplicación manual (MA) representa el 99% de todas las aplicaciones de este proceso. El método automático (AU) es utilizado y llamado “Soldadura Grávida”, pero tiene aplicaciones limitadas. Una de las ventajas de este método es la adaptabilidad para cualquier posición (figura 4) como son soldaduras horizontales, verticales, y de posiciones elevadas, dependiendo del tipo y tamaño del electrodo, la configuración del equipo y la habilidad del soldador. Principalmente usado para unir aleaciones de acero, incluyendo aleaciones de bajo o medio carbono, aceros de baja aleación, aceros de alta resistencia, aceros templados, aceros de alta aleación, aceros inoxidables, aceros resistentes a la corrosión y hasta hierro maleable. También es utilizada para soldar Níquel y aleaciones de Níquel y en menos grado para unir Cobre y aleaciones de Cobre. Puede ser usada, aunque raramente, para unir Aluminio. No puede ser usada para soldar Magnesio, metales preciosos o metales refractarios. En la tabla 1, se encuentra una lista detallada de los materiales soldables por ese proceso. [3]

Tabla 1. Materiales soldables mediante S.M.A.W.

<i>Metal Base</i>	<i>Condición para la aplicación S.M.A. W.</i>
Aluminio	Posible pero no es popular
Bronce	Soldable
Cobre	Posible pero no es popular
Cobre-Níquel	Aceptable
Hierro Fundido y Maleable	Soldable
Hierro Forjado	Soldable
Inconel	Soldable
Níquel	Soldable
Monel	Soldable
Acero de bajo carbono	Soldable
Aceros de baja aleación	Soldable

Fuente: Howard, C. (1981). Modern Welding Technology (3^{era} Ed). New Jersey: Regents/Prentice Hall

2.2.3.- Esfuerzos Residuales.

Podemos definir las tensiones residuales como cualquier esfuerzo en un cuerpo elástico que se encuentre libre de fuerzas o restricciones externas y de cambios o gradientes de temperatura. Los esfuerzos, cuando no son iguales, pueden ocasionar deformaciones del material. Grandes esfuerzos en un lado de la pieza provocan movimiento o deformación. Si los esfuerzos son iguales a lo largo de toda la pieza, se compensan y no hay deformación. [4]



Figura 5.- Esquema de formación de los esfuerzos residuales.

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

La resistencia de una junta soldada depende en gran medida de lo bien que se controle la expansión y contracción del metal durante la operación de soldeo.

Cuando se aplica calor a una pieza metálica se originan fuerzas de expansión que tienden a aumentar las dimensiones de la misma. En el enfriamiento se invierte este fenómeno y la pieza intenta recuperar su forma y dimensiones iniciales.



Estas dilataciones y contracciones no tienen consecuencias dignas de consideración cuando se producen sobre piezas libres, es decir, cuando no hay fuerzas que restringen estos movimientos. Tampoco suelen tener consecuencias graves cuando se sueldan materiales dúctiles, pues éstos ceden y se alivian las tensiones.

Por el contrario, cuando dilataciones y contracciones no pueden producirse libremente, las piezas se deforman si el material es dúctil y maleable, o se rompen si el material es frágil. [5]

Para que se pueda comprender el fenómeno de las tensiones residuales se explica un clásico sistema de tres barras utilizado por Masubushi K [6], el cual de una forma elemental explica las variaciones que se producen en una barra central (Figura 6).

Al calentar exclusivamente la barra central aparecen tensiones de compresión en la misma, pues su dilatación está restringida por dos barras laterales, tal como muestra la curva A-B, alcanzando el límite de fluencia del metal de la barra en el punto "B" (para este caso 170 °C). Las tensiones de compresión en la barra decrecen siguiendo la variación del límite de fluencia del metal con las temperaturas crecientes, lo que se muestra en el tramo de curva B-C. Alcanzada la temperatura máxima de ≈ 600 °C correspondiente al punto "C" comienza el enfriamiento de la barra, las tensiones de compresión decaerán rápidamente y la tensión cambia de signo hasta alcanzar el punto "D" correspondiente a la tensión de fluencia, posteriores decrecimientos de la temperatura hacen que las tensiones de tracción sobre la barra se mantengan permanentemente iguales al valor del límite de fluencia a cada temperatura. De esta forma habrá quedado sometida a una tensión residual de tracción igual al límite de fluencia del metal a temperatura ambiente. Para mantener la condición de equilibrio las tensiones en las barras laterales serán de compresión y su valor será la mitad que la tensión en la barra central.

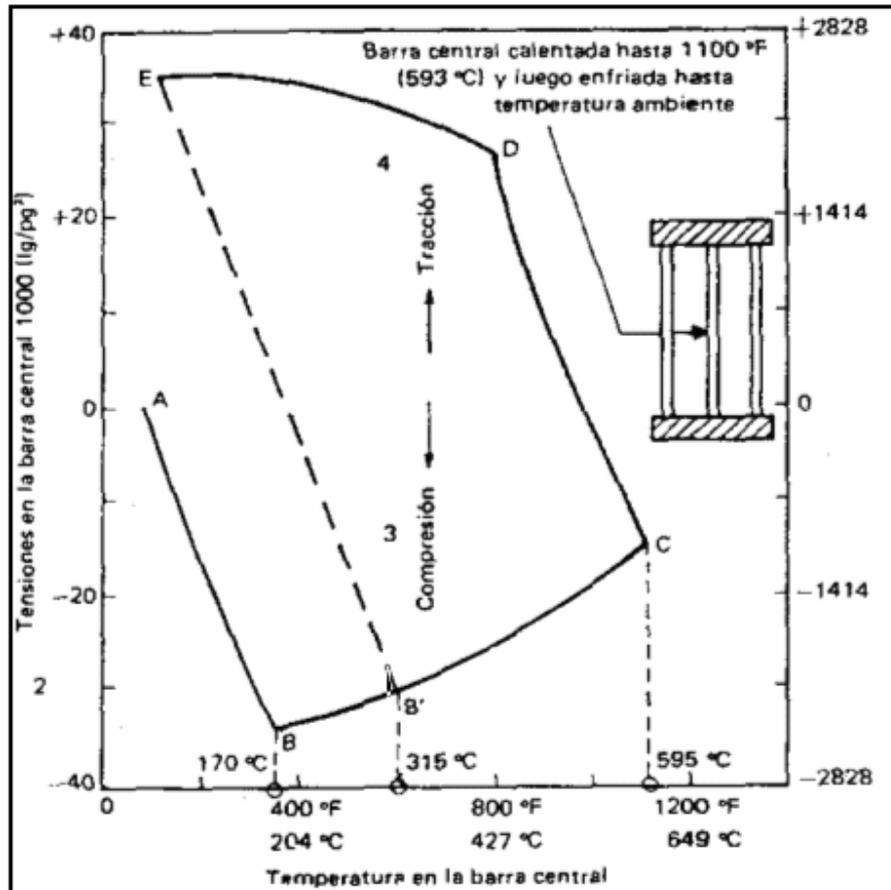


Figura 6.- Historia de las tensiones y temperaturas para la barra central en el sistema de las tres barras.

Fuente: Metal Univers. (2006). Publicación de Metal Univers (N° 38). España: Nova Àgora, S.L, 2

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.

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 7.

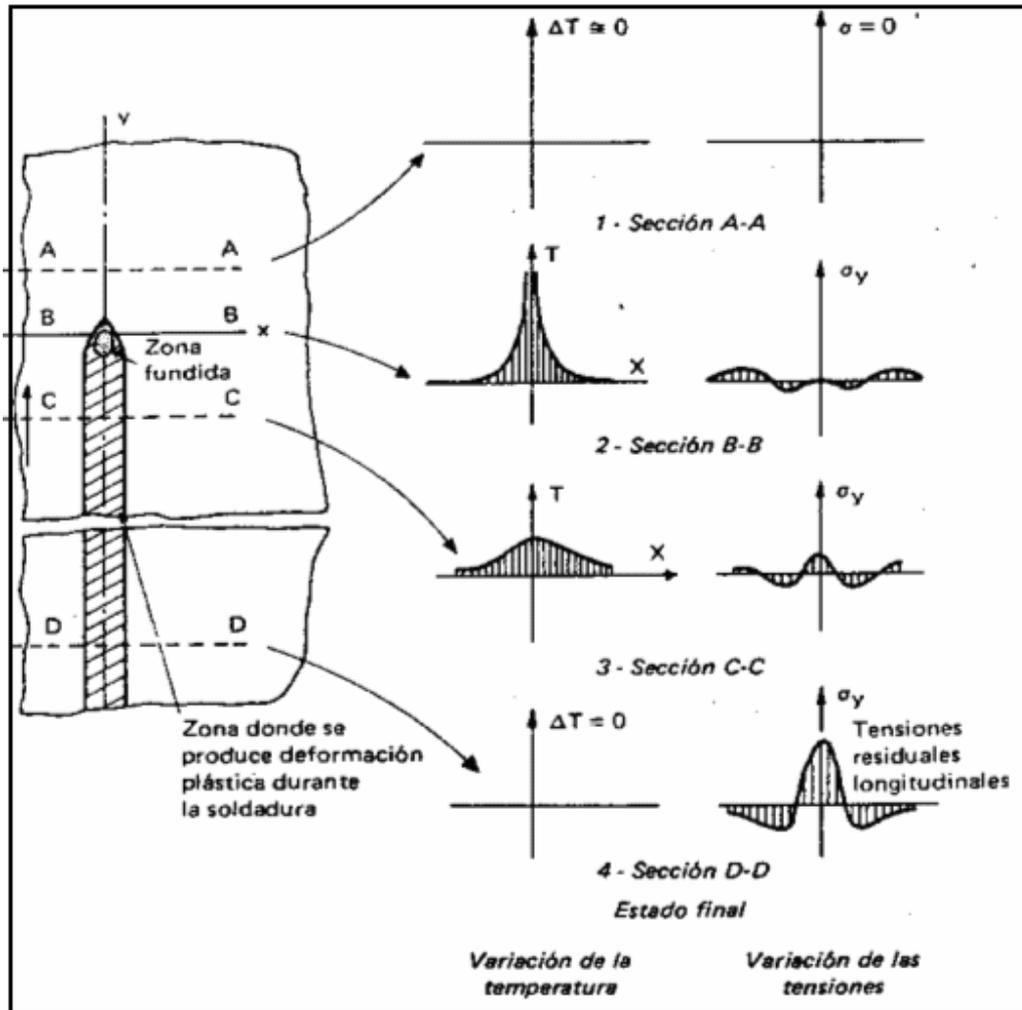


Figura 7.- Estados transitorios y finales durante la soldadura.

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

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.



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.

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.

Sección D-D.

Suficientemente alejada del arco como para que se haya producido el enfriamiento total, se encontrará nuevamente la temperatura inicial de la pieza, las tensiones

tendrán su valor máximo final que corresponde al estado permanente definitivo de las tensiones residuales.

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

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

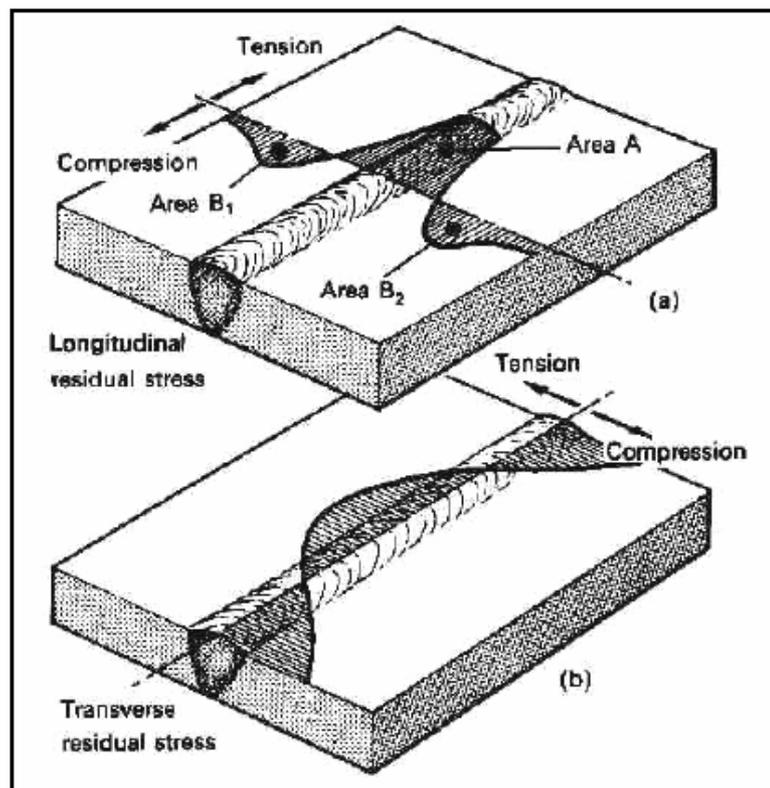


Figura 8.- Distribución de tensiones residuales longitudinales y transversales de soldadura.
Fuente: Metal Univers. (2006). Publicación de Metal Univers (Nº 38). España: Nova Àgora, S.



Según estudios realizados por Toprac A. [7] 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:

$$\sigma = \frac{P}{A} = \epsilon \times E \quad \text{Ec. II.1}$$

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.

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{L_0} \quad \text{Ec. II.2}$$

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:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{1}{E} \left[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z) \right] \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} \left[\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x) \right] \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} \left[\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y) \right]\end{aligned}\quad \text{Ec. II.3}$$

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 [8] y Masubuchi.

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.

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

Donde:

$$H = \frac{P}{V} \quad \text{Ec. II.4}$$

$P = V \times I \times \eta$, J/s.

V: Velocidad, mm/s

H = J/mm

Este parámetro tiene una gran influencia en las tensiones residuales como muestra la figura N° 9, donde varía la corriente de soldadura "I" por consiguiente varía la aportación de calor (heat input) "H".

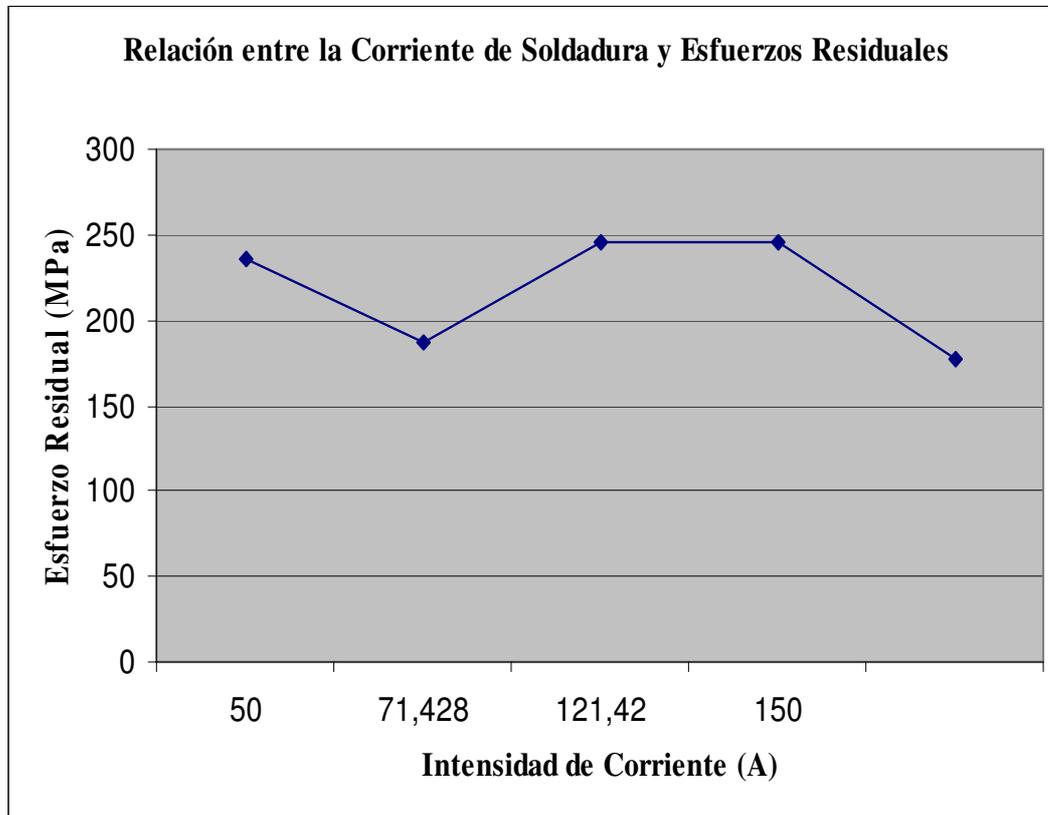


Figura 9.- Relación entre la corriente de soldadura y las tensiones residuales.

Fuente: Metal Univers. (2006). Publicación de Metal Univers (N° 38). España: Nova Àgora, S.L

La variación de las tensiones residuales en el espesor de piezas normales es insignificante. En chapas con espesores menores de 25 mm, pero pueden ser considerables en chapas gruesas, si la pieza es de gran tamaño la soldadura tiene un efecto primario de tensiones en una relativa pequeña región alrededor del cordón; y no tiene cambios bruscos de tensiones en otras partes. Este efecto de la soldadura puede ser más significativo para piezas pequeñas.

2.2.3.1.- Clasificación de las tensiones residuales.

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.

Factores que contribuyen a las tensiones residuales:

Parámetros
Estructurales

- * Geometría de la estructura
- * Espesor de la chapa
- * Tipo de junta

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:

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



Desconocer, esta influencia puede traer consecuencias fatales o daños incalculables en la utilización de un determinado mecanismo, pieza y en ocasiones plantas completas como por ejemplo se puede mencionar: lo ocurrido en la Electric Power Research Institute, Palo Alto, California donde realmente un uso inadecuado de la soldadura ocasionó graves consecuencias en una planta generadora de 500 MW . Una gotera o escape en un tubo que contenía una alteración en el metal de la soldadura, se destruye en dos días ocasionando un gasto de \$1 millón de dólares, un escape en un cabezal de la caldera ocasionó un gasto de \$1 millón de dólares, la catastrófica destrucción con la pérdida de la potencia costo poco más de \$100 millones de dólares.

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

2.2.3.2.- 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:

- Relajación de tensiones (stress-relaxation).
- Difracción de rayos-x.
- Utilización de propiedades sensibles a los esfuerzos.
- 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.



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 extensómetros o galgas eléctricas. Existe una variedad de técnicas que dependen del seccionamiento de las muestras para determinar los esfuerzos residuales. Algunas técnicas se aplican principalmente a cilindros, tuberías o sólidos tridimensionales.

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



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.

Tabla 2.- Clasificación de las técnicas para la medición de tensiones residuales.

A-1 Relajación de tensiones utilizando defórmómetros mecánicos y galgas eléctricas.	Aplicable principalmente a chapas	1. Técnica de seccionado utilizando resistencias eléctricas strain gauges. 2. Técnica de Gunnert 3. Técnica de barrenado de Mathar-Soete 4. Técnica de fresado sucesivo de Stablein
	Aplicable principalmente a Cilindros sólidos y tubos	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 diferentes a los anteriores.		9. Técnica utilizando sistema divisor de retícula. 10. Técnica de barrenado concapa 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 esfuerzos.	Técnicas ultrasónicas	14. Técnicas de ondas ultrasónicas polarizadas 15. Técnica de atenuación Ultrasónica
		16. Técnica de durezas
D Técnica de agrietamientos.		17. Técnica de agrietamiento Hidrógeno-inducido 18. Técnica de agrietamiento Esfuerzo-corrosión.

Fuente: Metal Univers. (2006). Publicación de Metal Univers (Nº 38). España: Nova Ágora, S.L



Las técnicas ultrasónicas pueden utilizar las ondas ultrasónicas polarizadas y hacer uso del cambio inducido por esfuerzos en el ángulo de polarización de las ondas ultrasónicas polarizadas (de forma semejante a las técnicas fotoelásticas) o hacer uso de los cambios inducidos por esfuerzos en la absorción de ondas ultrasónicas es decir, atenuación ultrasónica. Ninguna de estas técnicas ha sido desarrollada mas allá de la etapa de laboratorio y ninguna ha sido utilizada con éxito para la medición de esfuerzos residuales en las construcciones soldadas. Se han desarrollado técnicas para el estudio de los esfuerzos residuales observando las grietas producidas por estos en las muestras. Las grietas pueden ser inducidas por el hidrógeno o por el esfuerzo corrosión (stress-corrosion). Las técnicas por agrietamiento son útiles para el estudio de los esfuerzos residuales en modelos de estructuras complejas los cuales tienen una distribución complicada de esfuerzos residuales. [9]

2.2.4.- Teorema de Castigliano.

El Teorema de Castigliano, o el método de los trabajos virtuales establece que el desplazamiento del punto de aplicación de una fuerza exterior, en su dirección, es igual a la derivada parcial de la energía elástica de deformación respecto de esta fuerza. Para demostrarlo, consideremos el sólido elástico de la figura 10, articulado en C y apoyado sobre los rodillos A y B . Si se aplican independientemente las fuerzas P , Q , F , el trabajo realizado por ellas se almacena en el cuerpo en forma de energía elástica de deformación.

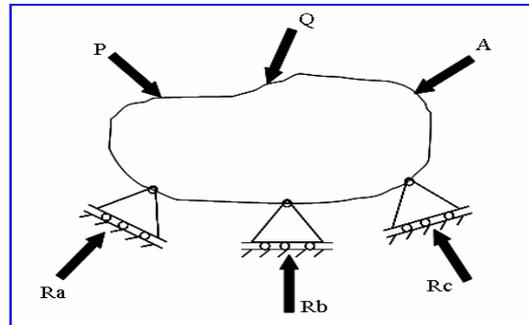


Figura 10.- Sólido elástico articulado.

Fuente: Singer.(1962) Resistencia de Materiales. New York Harla

Observemos que las reacciones no producen trabajo, ya que en las articulaciones no se tiene desplazamiento alguno, y en los apoyos, como se desplazan sobre el plano de éstos, o sea perpendicularmente a su dirección, tampoco. La energía de deformación será, pues, una función de segundo grado de las fuerzas exteriores.

Supongamos ahora que una de las fuerzas, Q , experimenta un pequeño incremento dQ . El incremento correspondiente de la energía de deformación es

$$dU = \frac{\partial U}{\partial P} dP + \frac{\partial U}{\partial Q} dQ + \frac{\partial U}{\partial F} dF + \dots \quad \text{Ec. II.5}$$

Ahora bien, como solamente Q ha sido incrementada, $dP = dF = \dots = 0$ y, por tanto, se tiene

$$dU = \frac{\partial U}{\partial Q} dQ \quad \text{Ec. II.6}$$

Si ahora se supone que dQ estuviera aplicada inicialmente al sólido, y que P , Q , F, \dots se han aplicado después, el sólido habrá almacenado la misma energía de deformación que antes. Llamando δ al desplazamiento del punto de aplicación de Q en su dirección, la fuerza ya aplicada dQ se desplazará esta distancia δ cuando se apliquen

las fuerzas reales, y producirá un trabajo $dU = \delta dQ$. Igualando este trabajo al incremento de energía potencial dado por (d) resulta:

$$dU = \delta dQ = \frac{\partial U}{\partial Q} dQ \quad \text{Ec. II.7}$$

Por tanto:

$$\delta = \frac{\partial U}{\partial Q} \quad \text{Ec. II.8}$$

Quiere esto decir que la derivada parcial de la energía de deformación respecto de una de las fuerzas exteriores es igual al desplazamiento de su punto de aplicación en la dirección de dicha fuerza. [10]

2.2.5.- Criterio de Von Mises.

El criterio de Von Mises establece que el material empezará a deformar plásticamente cuando el esfuerzo de corte octaedral (τ_{OCT}) alcanza un determinado valor, y dicho valor corresponde al que tendrá el esfuerzo de corte máximo en un ensayo de tracción cuando se alcanza la fluencia (S_y).

Según Von Mises la fluencia en un material dúctil ocurre cuando

$$\tau_{OCT} = \tau_{OCT_{(TRACCION)}} \quad \text{Ec. II.9}$$

$$\tau_{OCT} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

En tracción, cuando ocurre la fluencia:

$$\tau_{OCTy} = \frac{\sqrt{2}}{S_y} \quad \text{Ec. II.10}$$

Combinando las ecuaciones anteriores, se obtiene finalmente el Criterio de Von Mises:

$$\sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \geq S_y \quad \text{Ec. II.11}$$

A continuación se definen los esfuerzos de Von Mises, medio y alternante, como sigue

$$\begin{aligned} \sigma'_m &= \sqrt{\sigma_{1m}^2 - \sigma_{1m} \times \sigma_{2m} + \sigma_{2m}^2} \\ \sigma'_a &= \sqrt{\sigma_{1a}^2 - \sigma_{1a} \times \sigma_{2a} + \sigma_{2a}^2} \end{aligned} \quad \text{Ec. II.12}$$

para el estado de esfuerzos biaxial. En el caso de estado uniaxial los esfuerzos son:

$$\begin{aligned} \sigma'_m &= \sqrt{\sigma_{xm}^2 + 3\tau_{xym}^2} \\ \sigma'_a &= \sqrt{\sigma_{xa}^2 + 3\tau_{xya}^2} \end{aligned} \quad \text{Ec. II.13}$$

Y para el caso de los esfuerzos correspondientes de Von Mises [11] para un estado de esfuerzo triaxial se tiene:

$$\begin{aligned} \sigma'_m &= \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_{1m} - \sigma_{2m})^2 + (\sigma_{2m} - \sigma_{3m})^2 + (\sigma_{3m} - \sigma_{1m})^2} \\ \sigma'_a &= \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_{1a} - \sigma_{2a})^2 + (\sigma_{2a} - \sigma_{3a})^2 + (\sigma_{3a} - \sigma_{1a})^2} \end{aligned} \quad \text{Ec. II.14}$$

2.2.6.- Ensayo de Tracción.

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

Un esquema de la máquina de ensayo de tracción se muestra en la figura 11.

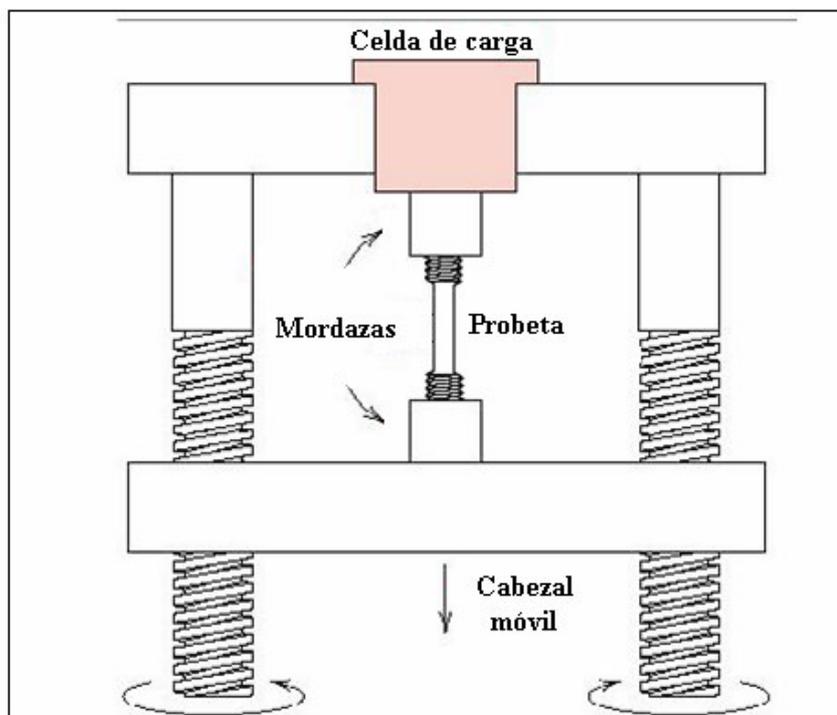


Figura 11.- Máquina de ensayo de tracción.

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



2.2.6.1.- Características de los Materiales Elásticos.

- **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.

2.2.6.2.- Curva tensión-deformación.

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

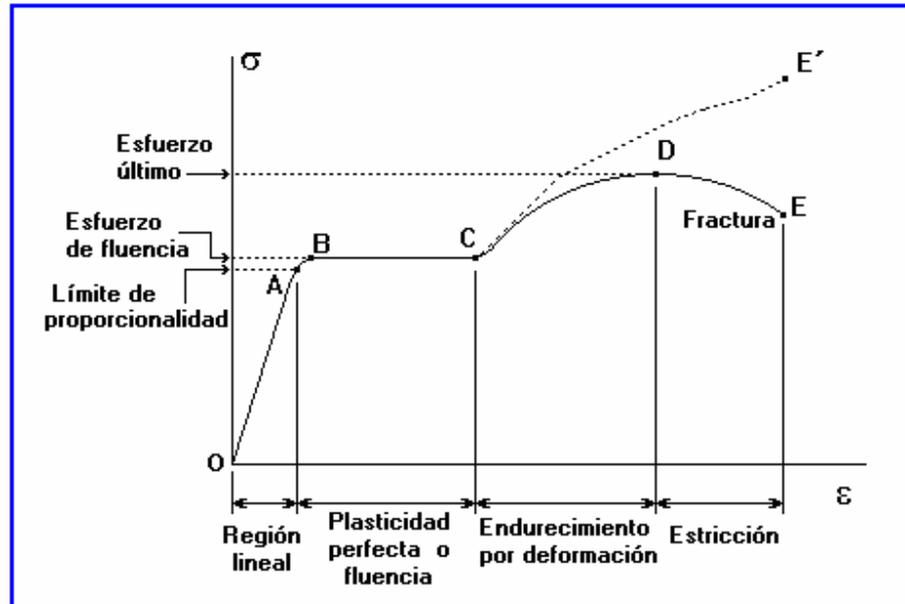


Figura 12.- Curva esfuerzo-deformación de materiales dúctiles en tensión

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

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

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 Luders). No todos los materiales presentan este fenómeno, en cuyo caso la transición entre la deformación elástica y plástica del material no se aprecia de forma clara.

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.

2.2.7.- Ensayo de Dureza.

El ensayo de dureza es, juntamente con el de tracción, uno de los más empleados en la selección y control de calidad de los metales. Intrínsecamente la dureza es una condición de la superficie del material y no representa ninguna propiedad fundamental de la materia. Se evalúa convencionalmente por dos procedimientos. El más usado en metales es la resistencia a la penetración de una herramienta de determinada geometría.

El ensayo de dureza es simple, de alto rendimiento ya que no destruye la muestra y particularmente útil para evaluar propiedades de los diferentes componentes microestructurales del material.

Los métodos existentes para la medición de la dureza se distinguen básicamente por la forma de la herramienta empleada (penetrador), por las condiciones de aplicación de la carga y por la propia forma de calcular (definir) la dureza. La elección del método para determinar la dureza depende de factores tales como tipo, dimensiones de la muestra y espesor de la misma.

2.2.7.1 Métodos para Medir la Dureza.

-. Dureza Vickers.

Este método es muy difundido ya que permite medir dureza en prácticamente todos los materiales metálicos independientemente del estado en que se encuentren y de su espesor.

El procedimiento emplea un penetrador de diamante en forma de pirámide de base cuadrada. Tal penetrador es aplicado perpendicularmente a la superficie cuya dureza se desea medir, bajo la acción de una carga P . Esta carga es mantenida durante un cierto tiempo, después del cual es retirada y medida la diagonal d de la impresión que quedó sobre la superficie de la muestra (figura 13). Con este valor y utilizando tablas apropiadas se puede obtener la dureza Vickers, que es caracterizada por HV y definida como la relación entre la carga aplicada (expresada en Kgf) y el área de la superficie lateral de la impresión.

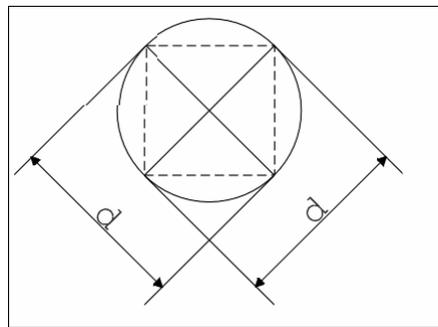


Figura 13.- Marca sobre la superficie de la muestra.

Fuente: <http://www.inoxidable.com/dureza.html>

-. Dureza Rockwell.

La medición de dureza por el método Rockwell ganó amplia aceptación en razón de la facilidad de realización y el pequeño tamaño de la impresión producida durante el ensayo.

El método se basa en la medición de la profundidad de penetración de una determinada herramienta bajo la acción de una carga prefijada.

El número de dureza Rockwell (HR) se mide en unidades convencionales y es igual al tamaño de la penetración sobre cargas determinadas. El método puede utilizar



diferentes penetradores siendo éstos esferas de acero templado de diferentes diámetros o conos de diamante. Una determinada combinación constituye una "escala de medición", caracterizada como A,B,C, etc. y siendo la dureza un número arbitrario será necesario indicar en que escala fue obtenida (HRA, HRB, HRC, etc.).

El proceso de medición con penetrador de diamante (utilizado para materiales duros, como por ejemplo los templados) está esquematizado en la figura 14.

La carga total P es aplicada sobre el penetrador en dos etapas: una previa P_0 y una posterior P_1 tal que:

$$P = P_0 + P_1$$

Ec. II.15

Inicialmente el cono penetra en la superficie una cantidad h_0 sobre la acción de la carga P_0 que se mantendrá hasta el fin del ensayo. Esta penetración inicial permite eliminar la influencia de las condiciones superficiales.

A continuación se aplica la carga P_1 y la penetración se acentúa. Finalmente la carga P_1 es retirada y la profundidad h restante (solamente actúa P_0) determina el número de dureza HR. La escala de los instrumentos de lectura empleados en las máquinas está invertida para permitir una lectura directa.

En los certificados de calidad es común utilizar la escala HRB donde el cono de diamante es reemplazado por una esfera de 1/16" y la carga P_1 vale 100 Kgf.

En casos de materiales muy finos donde la carga de 100 Kgf es muy elevada, pudiendo inclusive perforar la muestra, es utilizada la escala Vickers con una carga de 10 Kgf y luego efectuada la transformación a la escala HRB utilizando tablas de conversión adecuadas. [13]

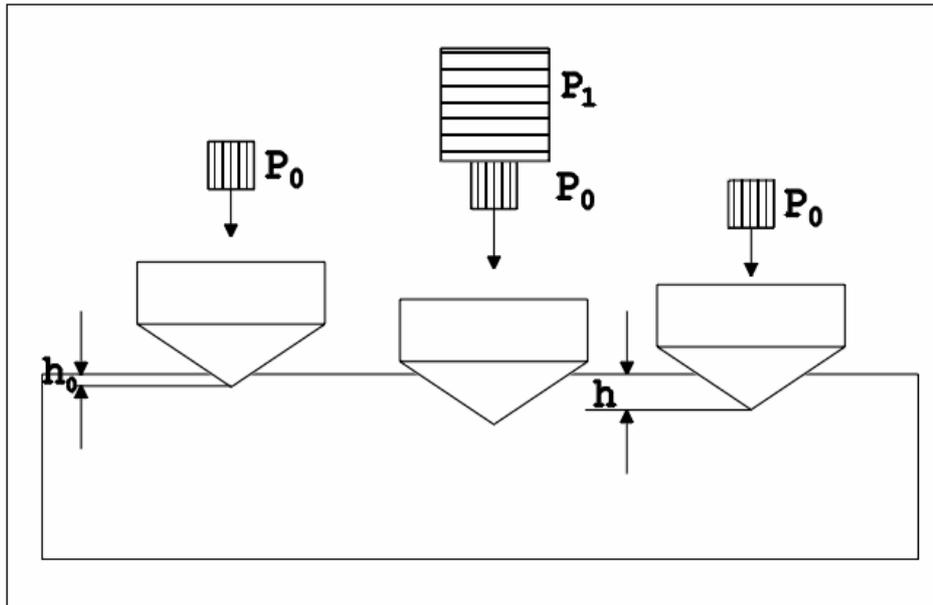


Figura 14.- Proceso de medición con penetrador de diamante.

Fuente: <http://www2.ing.puc.cl/~icm2312/apuntes/materiales/materiales6-2.html>

2.2.7.2 Números de dureza.

La clasificación y los métodos varían con cada material dando origen a los números de dureza:

- **HBN** (Hardness **B**rinell Number).
- **HRA, HRB, HRC**, ... (Hardness **R**ockwell series A, B, C, ...).
- **HVN** (Hardness **V**ickers Number). [14]



2.2.8.- Tratamientos térmicos.

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

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

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

-. Temple

Al temple se someten los aceros al carbono y aleados con contenido de carbono mayor de 0,35%, y el procedimiento en síntesis consiste en calentar la pieza a altas temperaturas, (rojo vivo) y luego enfriarla rápidamente hasta temperaturas próximas a la ambiente. Durante este proceso la pieza se endurece notablemente y adquiere mayor rigidez pero resulta muy frágil, por lo que vuelve a calentarse a temperaturas menores de 300 °C y se deja enfriar lentamente, procedimiento conocido como revenido. Este revenido, reduce notablemente la fragilidad sin afectar en mucho la dureza, haciendo finalmente la pieza dura pero que pueda soportar las cargas dinámicas sin quebrarse.



Hay en la industria muchos tipos de aceros con diferente composición y además hay muchas aplicaciones para un mismo tipo de acero, por tal motivo los fabricantes proporcionan tablas con los valores óptimos de temperatura y tiempo de permanencia a ella de la pieza, así como la velocidad de enfriamiento durante el temple y también para el revenido posterior, para obtener los diferentes valores de dureza y resistencia que el constructor de maquinaria usa según su propósito. En ocasiones (especialmente para los aceros aleados) este temple resulta un complejo proceso de calentamientos y enfriamientos a largas horas de permanencia.

-. Normalizado.

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

-. Recocido.

Se puede entender el recocido como el calentamiento del acero por encima de las temperaturas de transformación a la fase austenítica seguida de un enfriamiento lento. El resultado de este lento enfriamiento es el de obtener un equilibrio estructural y de fase en los granos del metal.

Dependiendo del porcentaje de carbono; luego del recocido se pueden obtener diversas estructuras tales como Ferrita+Cementita en los aceros Hipoeutectoides; Perlita en los aceros Eutectoide; y Perlita+Cementita en los aceros Hipereutectoides.



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

Recocido de ablandamiento.

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

Recocido de reducción de acritud o de recristalización.

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

Recocido de homogeneización.

Este recocido se usa principalmente en aceros de alto carbono y aleados y tiene el objetivo de permitir la difusión y homogeneización de los elementos aleantes y el carbono dentro de la estructura del acero. Este recocido es bastante especializado y en ocasiones toma muchas horas su ejecución.

- Revenido.

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



El tratamiento de revenido consiste en calentar al acero después de normalizado o templado, a una temperatura inferior al punto crítico, seguido de un enfriamiento controlado que puede ser rápido cuando se pretenden resultados altos en tenacidad, o lento, para reducir al máximo las tensiones térmicas que pueden generar deformaciones.

Los factores que influyen en el revenido son los siguientes: la temperatura de revenido sobre las características mecánicas, el tiempo de revenido (a partir de un cierto tiempo límite la variación es tan lenta que se hace antieconómica su prolongación, siendo preferible un ligero aumento de temperatura de revenido), la velocidad de enfriamiento (es prudente que el enfriamiento no se haga rápido) y las dimensiones de la pieza (la duración de un revenido es función fundamental del tamaño de la pieza recomendándose de 1 a 2 horas por cada 25 mm de espesor o diámetro). [15]

2.2.9.- Método de los elementos finitos.

El método de los elementos finitos (MEF en castellano o FEM en inglés) es un método numérico muy general para la resolución de ecuaciones diferenciales muy utilizado en diversos problemas de ingeniería y física.

El método se basa en dividir el cuerpo, estructura o dominio (medio continuo) sobre el que están definidas ciertas ecuaciones integrales que caracterizan el comportamiento físico del problema en una serie de subdominios no intersectantes entre sí denominados elementos finitos. El conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio también denominada discretización. Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados nodos. Dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito; además, un nodo sobre la frontera



de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos. El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se llama «malla».

Los cálculos se realizan sobre una malla o discretización creada a partir del dominio con programas especiales llamados generadores de mallas, en una etapa previa a los cálculos que se denomina pre-proceso. De acuerdo con estas relaciones de adyacencia o conectividad se relaciona el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo y denominadas grados de libertad. El conjunto de relaciones entre el valor de una determinada variable entre los nodos se puede escribir en forma de sistema de ecuaciones lineales (o linealizadas). La matriz de dicho sistema de ecuaciones se llama matriz de rigidez del sistema. El número de ecuaciones de dicho sistema es proporcional al número de nodos.

Típicamente el método de los elementos finitos se programa computacionalmente para calcular el campo de desplazamientos y, posteriormente, a través de relaciones cinemáticas y constitutivas las deformaciones y tensiones respectivamente, cuando se trata de un problema de mecánica de sólidos deformables o más generalmente un problema de mecánica de medios continuos. El método de los elementos finitos es muy usado debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos (en dos o tres dimensiones). Además el método es fácilmente adaptable a problemas de difusión del calor, de mecánica de fluidos para calcular campos de velocidades y presiones (fluidodinámica CFD) o de campo electromagnético. Dada la imposibilidad práctica de encontrar la solución analítica de estos problemas, con frecuencia en la práctica ingenieril los métodos numéricos y, en particular, los elementos finitos, se convierten en la única alternativa práctica de cálculo.

Una importante propiedad del método es la convergencia; si se consideran particiones de elementos finitos sucesivamente más finas, la solución numérica

calculada converge rápidamente hacia la solución exacta del sistema de ecuaciones. [16]

2.2.10.- Visual Nastran 4D™.

Visual Nastran 4D™, es un software que permite realizar análisis por elementos finitos y simular movimientos de los ensambles deseados, puede trabajar con un programa 3D y exportarse a Visual Nastran 4D™, que es compatible con algunos programas del mercado. [17]

Este programa es una herramienta probada y estándar en el campo del análisis estructural por más de cuatro décadas, proporciona una amplia gama de capacidades del modelado y del análisis, incluyendo la estática, dislocación, deformaciones, esfuerzos, vibraciones, transferencias de calor y más. Además Nastran puede manejar cualquier tipo de material plástico, metálico y materiales hiperelásticos. [18]

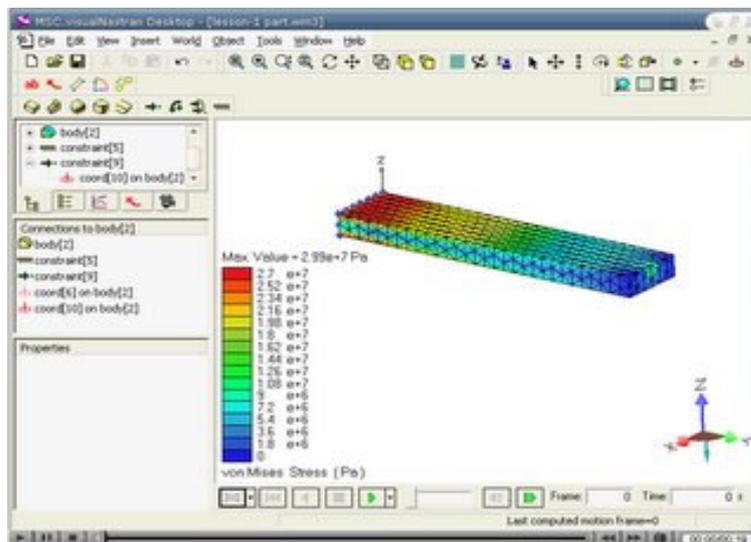


Figura 15.- Ambiente de trabajo del software Visual Nastran 4D™.

Fuente: Elaboración propia.



2.3.- Definición de Términos Básicos.

- **Acero.**

Se entiende por acero la aleación de hierro y carbono, donde el carbono no supera el 2,1% en peso[1] de la composición de la aleación, alcanzando normalmente porcentajes entre el 0,2% y el 0,3%. Porcentajes mayores que el 2% de carbono dan lugar a las fundiciones, aleaciones que al ser quebradizas y no poderse forjar (a diferencia de los aceros), se moldean.

- **Cordón de Soldadura.**

Está constituido por el metal base y el material de aportación del electrodo y se pueden diferenciar dos partes: la escoria, compuesta por impurezas que son segregadas durante la solidificación y que posteriormente son eliminadas, y el sobre espesor, formado por la parte útil del material de aportación y parte del metal base, que es lo que compone la soldadura en sí.

- **Deformación.**

Es el cambio en el tamaño o forma de un cuerpo debido a la aplicación de una o más fuerzas sobre el mismo o la ocurrencia de dilatación térmica.

- **Deformación plástica.**

Modo de deformación en que el material no regresa a su forma original después de retirar la carga aplicada. Esto sucede porque, en la deformación plástica, el material experimenta cambios termodinámicos irreversibles al adquirir mayor energía potencial elástica.



- **Dilatación.**

Se denomina dilatación al cambio de longitud, volumen o alguna otra dimensión métrica que sufre un cuerpo físico debido al cambio de temperatura que se provoca en ella por cualquier medio.

- **Dureza.**

La dureza es una propiedad mecánica de los materiales consistente en la dificultad que existe para rayar o crear marcas en la superficie mediante micropenetración de una punta.

- **Elasticidad.**

El término elasticidad designa la propiedad mecánica de ciertos materiales de sufrir deformaciones reversibles cuando se encuentra sujetos a la acción de fuerzas exteriores y de recuperar la forma original si estas fuerzas exteriores se eliminan.

- **Fatiga.**

Se refiere a un fenómeno por el cual la rotura de los materiales bajo cargas dinámicas cíclicas se produce más fácilmente que con cargas estáticas. Un ejemplo de ello se tiene en un alambre: flexionándolo repetidamente se rompe con facilidad.

- **Fluencia.**

La Fluencia o cedencia es la deformación brusca de la probeta sin incremento de la carga aplicada que se puede llegar a producir en el ensayo de tracción (depende del material, algunos experimentan fluencia, otros no).



- **Mecanizado.**

Es un proceso de fabricación que comprende un conjunto de operaciones de conformación de piezas mediante remoción de material, ya sea por arranque de viruta o por abrasión.

- **Modelado.**

Es una técnica cognitiva que consiste en crear una representación ideal de un objeto real mediante un conjunto de simplificaciones y abstracciones, cuya validez se pretende constatar.

- **Tracción.**

Es el esfuerzo al que está sometido un cuerpo por la aplicación de dos fuerzas que actúan en sentido opuesto, y tienden a estirarlo.

- **Tratamiento térmico.**

Es el proceso al que se someten los metales con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas, especialmente la dureza, la resistencia y la tenacidad.



3.- MARCO METODOLÓGICO.

3.1.- Nivel de la Investigación.

La presente investigación es de tipo descriptiva, pues plantea una combinación de técnicas experimentales con modelado a través del MEF (Método de elementos finitos), para lograr determinar como evolucionan los esfuerzos residuales en las uniones soldadas a tope cuando son sometidas a cargas de tracción.

3.2.- Diseño de la Investigación

La investigación que presentamos pretende demostrar la eficacia de un modelo computarizado, aplicado a uniones soldadas a tope para determinar los esfuerzos residuales a través del cumplimiento de los objetivos establecidos.

La estrategia planteada para dar soluciones a la problemática existente en cuanto a la acumulación de los esfuerzos residuales en piezas soldadas a tope es como sigue:

3.2.1.- Determinación Teórica de los Esfuerzos Residuales.

Para la realización de este estudio se decidió tomar un modelo geométrico referencial con las características descritas en la figura 16, donde

a : Ancho del cordón.

b : Alto del cordón de soldadura.

H: Largo del cordón.

L: Valor máximo que alcanza la variable X, cuando se encuentra al final de la zona variable.

X e Y: Ejes coordenados del plano que contienen la sección transversal de la probeta.

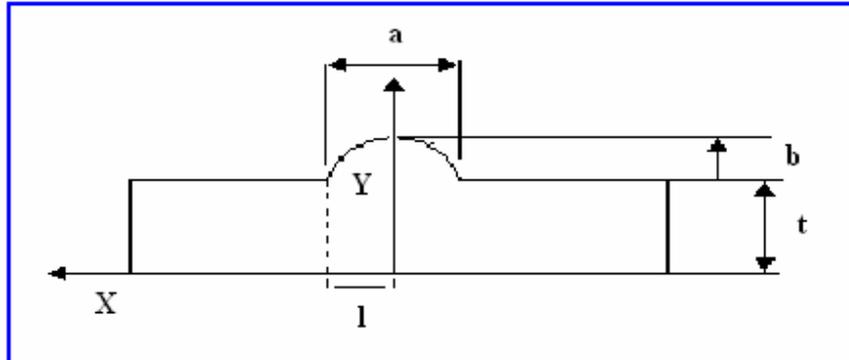


Figura 16.- Sección transversal del modelo Geométrico.

A través de la aplicación del Teorema de Castigliano se obtiene el esfuerzo máximo y el esfuerzo nominal, mediante un análisis infinitesimal considerando la acumulación de energía en dirección de una fuerza aplicada.

Para la obtención teórica de los esfuerzos residuales no existe ningún modelo establecido, por lo que se considerara como una alternativa para su determinación los esfuerzos producidos por la variación de la intensidad de corriente generada en el proceso de soldadura al momento de realizar el cordón.

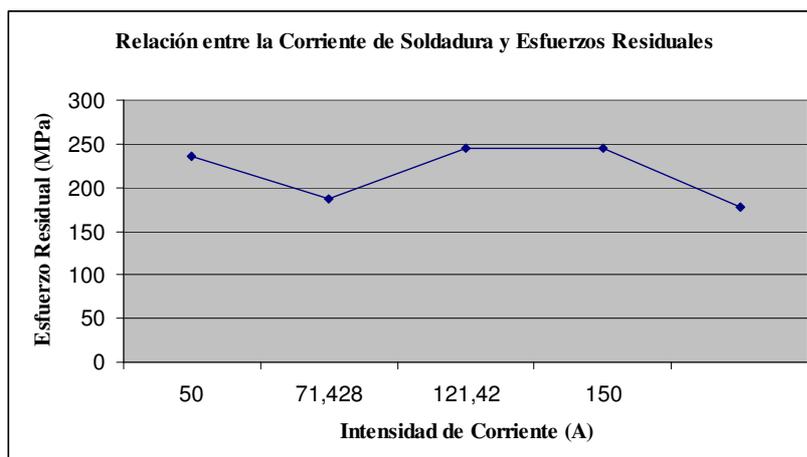


Figura 17.- Relación entre la corriente de soldadura y las tensiones residuales.

Coincidiendo con lo planteado por Glizmanenko y Masubushi, donde establecen la relación entre la intensidad de corriente en la soldadura y los esfuerzos residuales. Con el uso de estas relaciones se deben obtener los esfuerzos residuales teóricos.

Otra metodología empleada para la determinación de los esfuerzos residuales teóricos es la mencionada en el capítulo II por Masubushi, quien demostró que el esfuerzo residual de tracción será igual al límite de fluencia del material a la temperatura ambiente.

Basándose en la consideración anterior, se debe obtener el valor del límite de fluencia para cada probeta, partiendo de las gráficas obtenidas en el ensayo experimental de tracción realizado a las probetas con acumulación de esfuerzo (probetas no testigo).

Para obtener el límite fluencia se debe emplear el método del corrimiento paralelo (offset), indicado en la figura 18.

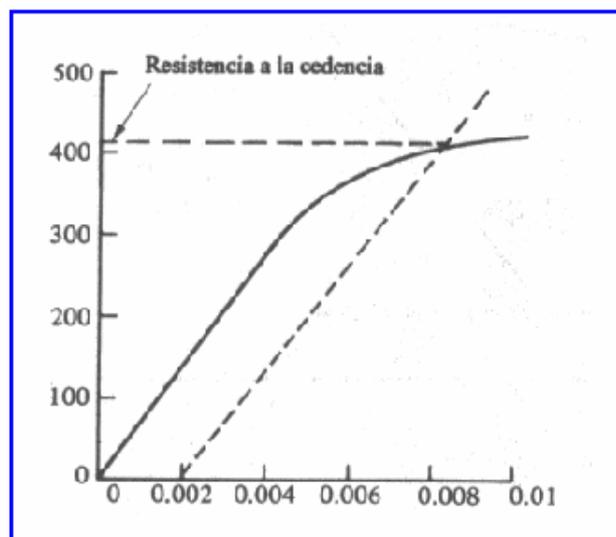


Figura 18.- Método del corrimiento en un diagrama Esfuerzo – Deformación.



Tal esfuerzo de fluencia, corresponde a un valor definido de deformación permanente, por lo general de 0,2 % a 0,5 % de la longitud calibrada original. Este esfuerzo será directamente el esfuerzo residual.

3.2.2.- Determinación Experimental de los Esfuerzos Residuales.

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

3.2.2.1.- Selección del material para las probetas.

El material que se debe utilizar para la realización de las probetas es acero AISI 1045, preestablecido como material de estudio para este caso, cuyas propiedades mecánicas son: límite de fluencia de 350 MPa, límite de rotura de 500 MPa y 30% de elongación en 50 mm de longitud calibrada (ASTM, 2004).

3.2.2.2.- Mecanizado de las probetas.

El mecanizado se debe realizar cumpliendo con las recomendaciones ofrecidas por la norma ASTM E-8 (Ver Apéndice A), la cual nos indica las dimensiones requeridas para realización del ensayo de tracción.

Se debe mecanizar nueve probetas; donde seis se utilizaran para el ensayo de tracción y el resto se emplearán para determinar los esfuerzos residuales superficiales.

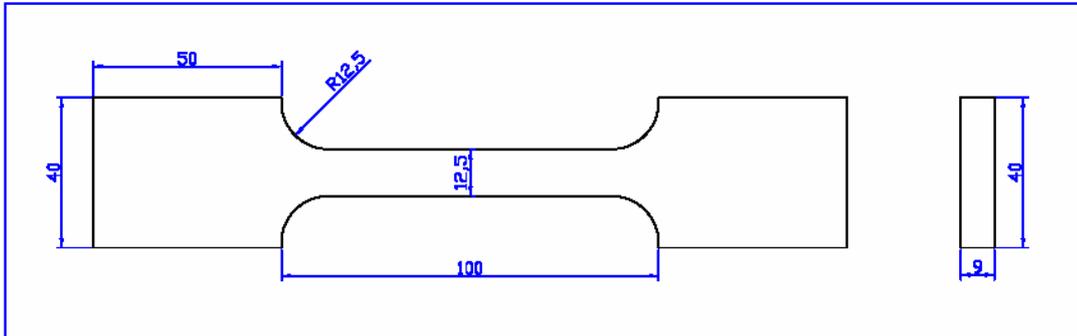


Figura 19.- Dimensiones de las probetas en mm.

3.2.2.3.- Realizar tratamiento térmico a las probetas.

Se realizará un tratamiento térmico de recocido para aliviar las tensiones residuales, este recocido se diferencia del recocido total ya que el acero es calentado hasta una temperatura mas baja que la temperatura critica A3 (un poco mas alta que la línea de temperatura eutectoide A1), en este caso el acero posee 0,45 %C y la temperatura critica A3 para este porcentaje es de 830 °C, por lo que se debe calentar hasta 800 °C.

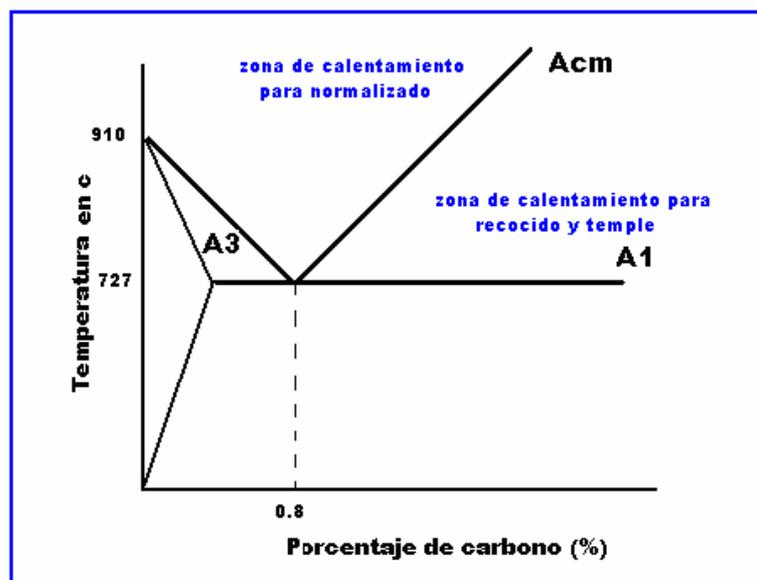


Figura 20.- Diagrama Hierro – Carbono del acero.

Posteriormente se mantiene a esa temperatura por un tiempo que dependerá del espesor de la probeta; es decir de 1 a 2 minutos por cada milímetro de espesor, por lo que el recocido durará 18 minutos, luego se apaga el horno y se deja enfriar dentro del mismo.

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

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

3.2.2.4.-Soldadura de las probetas.

Las probetas debes ser soldada a tope, utilizando el método de soldadura manual, arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW).

La sujeción de la probeta se realizara mediante el dispositivo mostrado en la figura 3.5, el cual impide la libre dilatación y contracción de la misma durante la aplicación del calor en el proceso de soldadura.



Figura 21.- Dispositivo usado para la sujeción de las probetas.

Se realizará soldadura a tope, con borde en V. Ésta se emplea para espesores superiores a 8mm.

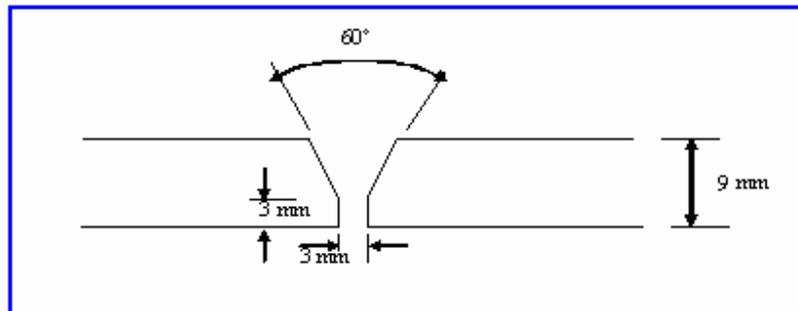


Figura 22.- Diseño del cordón de soldadura.

El ancho del cordón de soldadura será de 10 mm aproximadamente y el alto de 9 mm, con una separación de 3 mm y bisel de 60°.

Se realizará una soldadura de penetración con electrodo E – 6010 y luego el resto de las pasadas con E – 7018.

E – 6010: Electrodo celulósico para soldeo en todas las posiciones. Solo funciona en corriente continua con polaridad inversa.

Para la base: diámetro 2,5 mm, con intensidad de corriente entre 60 – 90 Amperios.

E – 7018: Electrodo de bajo hidrógeno y gran velocidad de aportación. Solo funciona en corriente continua con polaridad inversa.

Resto de las pasadas: diámetro 4 mm, con intensidad de corriente entre 120 - 200 Amperios.

3.2.2.5.- Ensayo de Tracción.

El ensayo de tracción se realizará a dos probetas testigos y a cuatro no testigos con el propósito de obtener la fuerza residual; que no es más que la diferencia entre la fuerza de falla de la probeta testigo y la probeta no testigo o con esfuerzos. Este ensayo se realizará en la máquina de tracción (Galdabini) ubicada en el Laboratorio de Materiales y Procesos de Fabricación de la Universidad de Carabobo



Figura 23.- Máquina de tracción Galdabini.

Para realizar el ensayo de tracción se deben fijar los siguientes parámetros: carga máxima, que será dos veces el resultado de dividir el esfuerzo de fluencia del material entre el área de la sección transversal, y velocidad del ensayo. Para este caso particular la carga máxima será de 78.750 N y la velocidad del ensayo 2 mm/min.

Luego de fijar los parámetros se debe iniciar el ensayo de tracción registrando el valor de la carga máxima soportada por las diferentes probetas analizadas. Con los valores obtenidos de las cargas se debe determinar la fuerza residual, restando al valor obtenido de la probeta testigo N° 1 cada uno de los valores de carga de las probetas no testigos obtenidas en el ensayo.

$$F_R = F_T - F_{NT} \quad \text{Ec.III.16}$$

Con el valor de la carga residual al dividirla entre el área de la sección transversal de la probeta, se obtiene el valor del esfuerzo residual.

3.2.2.6.- Ensayo de esfuerzo superficial.

Este ensayo se realizará a probetas no testigo o con esfuerzos, permitirá generar marcas en el cordón de soldadura, estas marcas serán realizadas con un durómetro del Laboratorio de Materiales y Procesos de Fabricación de la Universidad de Carabobo.

El tipo de dureza seleccionada para realizar las marcas es Rockwell C, las marcas se deben realizar linealmente y entre ellas debe existir una separación de 14 mm (medida con vernier de apreciación 0,001 mm) dentro de la zona calibrada de 50 mm.



Figura 24.- Muestra de probeta con marcas realizadas.

Una vez realizadas las marcas, las probetas deben ser traccionadas utilizando la máquina de ensayo de tracción (Galdabini); esto se debe hacer para obtener el alargamiento, el cual se puede apreciar utilizando un vernier digital.



Figura 25.- Vernier digital utilizado para medir el alargamiento.

Para este ensayo se deben mantener los parámetros fijados en el ensayo de tracción. En este caso el ensayo se debe detener a una carga preestablecida; dicha carga debe ser igual para cada probeta, para poder apreciar las diferencias en el alargamiento; y este sería considerado como el alargamiento experimental.

Para obtener el esfuerzo residual por este método se utilizará el valor del alargamiento experimental para determinar la deformación y con la ecuación II.1 se obtendrá directamente el esfuerzo residual elástico en el material, coincidiendo con lo planteado por Masubushi en el capítulo II.

3.2.3.- Determinación de los Esfuerzos Residuales mediante método de Elementos Finitos.

En la determinación de los esfuerzos residuales a través del método de Elementos Finitos, se emplearán los programas AutoCAD y Visual Nastran 4D™.

3.2.3.1.- Diseño de la probeta 3D.

Utilizando AutoCAD se realizará el diseño de la probeta a emplear según la norma utilizada, y luego se exporta a Visual Nastran 4D™, donde se hará la simulación de la probeta y el cordón de soldadura.

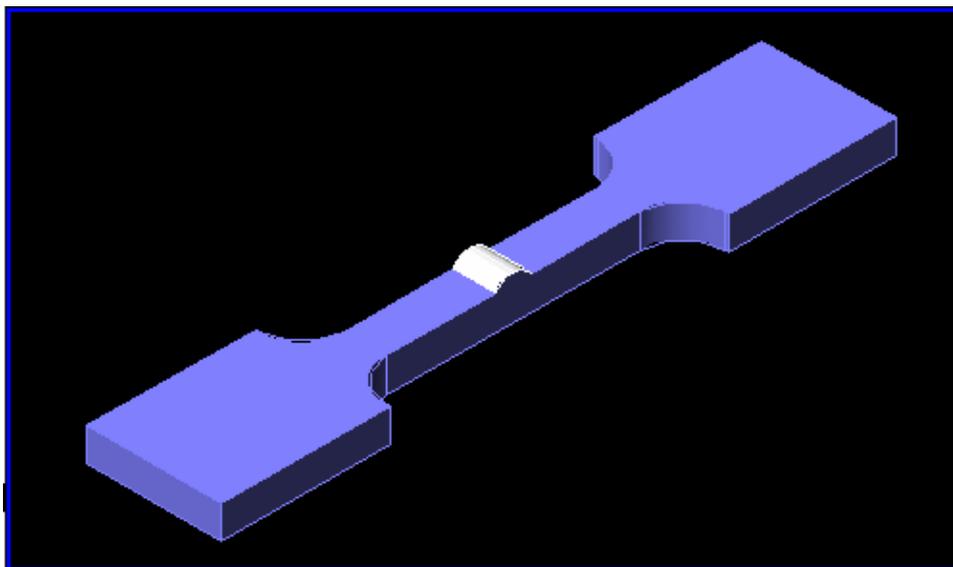


Figura 26.- Modelo isométrico de la probeta en AutoCAD.

3.2.3.2.- Simulación en Visual Nastran.

Una vez exportada la probeta en isometría a Nastran, se establecen las propiedades del material. En este caso las propiedades del acero AISI 1045.

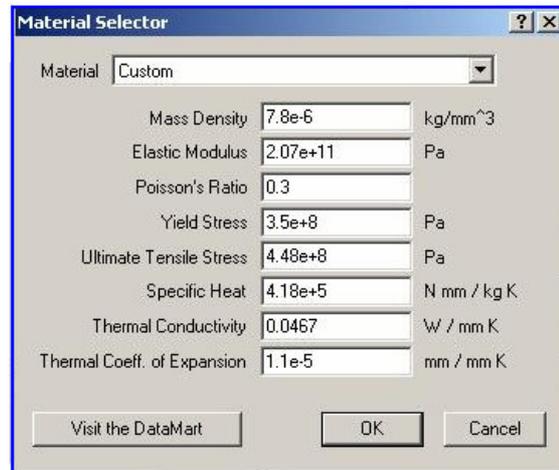


Figura 27.- Ventana de selección de material en Visual Nastran 4D™.

Se deben establecer las condiciones de borde; la variación de las condiciones de borde producen cambios importantes, con lo cual se utilizarán condiciones de borde que representan los efectos de carga en forma aislada (solo carga de tracción). La carga de tracción utilizada para la simulación en Visual Nastran 4D™ debe ser la obtenida en los ensayos experimentales de tracción realizado a las probetas con acumulación esfuerzos (probetas no testigo). A continuación se esquematizan las condiciones de borde para una carga de tracción, figura 28.

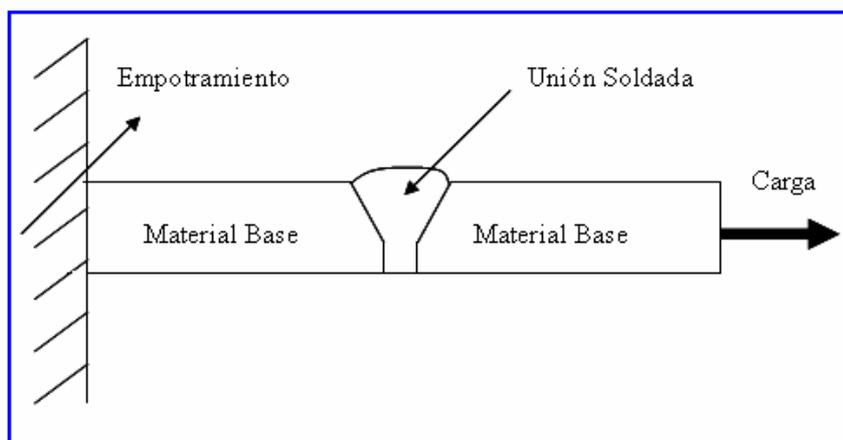


Figura 28.- Esquema de condiciones de borde para la simulación.

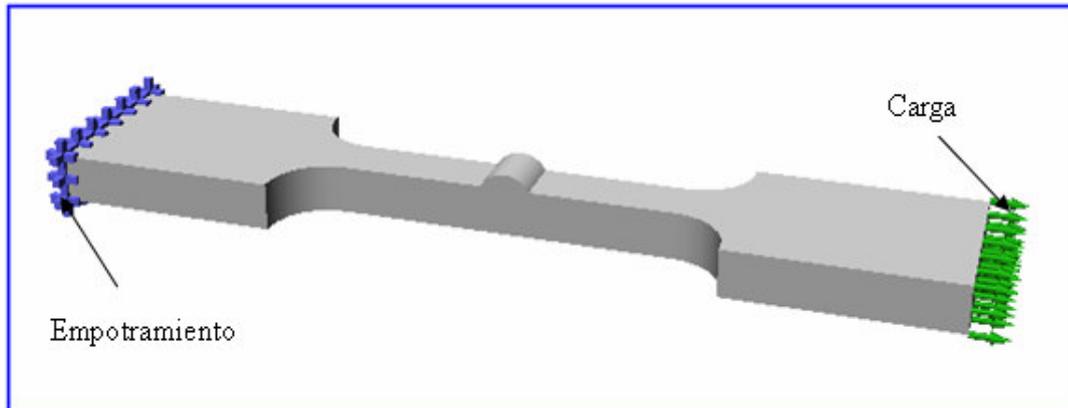


Figura 29.- Condiciones de borde aplicadas en Visual Nastran 4D™.

Después de seleccionar el material, se establecen las propiedades geométricas del mallado, como se indica en la tabla 3.

Tabla 3. Propiedades geométricas de las probetas usadas en el ensayo computacional en Visual Nastran 4D™.

<i>Ítem</i>	<i>Configuración</i>
Elemento Infinitesimal Constituyente	Tetraédrica
Tamaño del Elemento	2,5 mm
Número de Nodos	29.528
Tipo de Restricción	Empotramiento rígido(Azul)
Tipo de Carga	Tracción Estática Simple (Verde)

La figura 30 muestra la probeta del modelo computacional con el mallado aplicado y la ventana de selección de las propiedades geométricas descritas anteriormente.

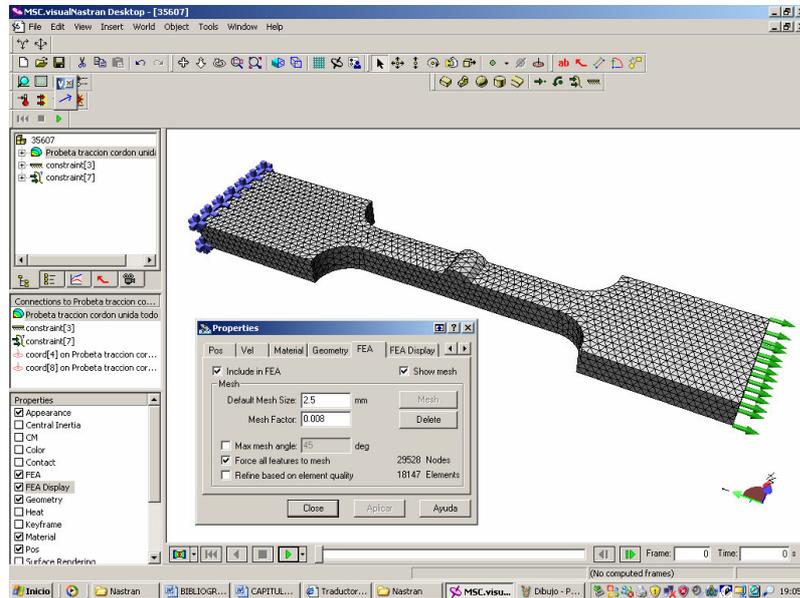


Figura 30.- Ventana de selección de mallado en Visual Nastran 4D™.

Al aplicar la carga correspondiente, se realizará la simulación del ensayo de tracción de cada probeta a través del método de elementos finitos, donde se obtendrán los valores de los esfuerzos de cada probeta.

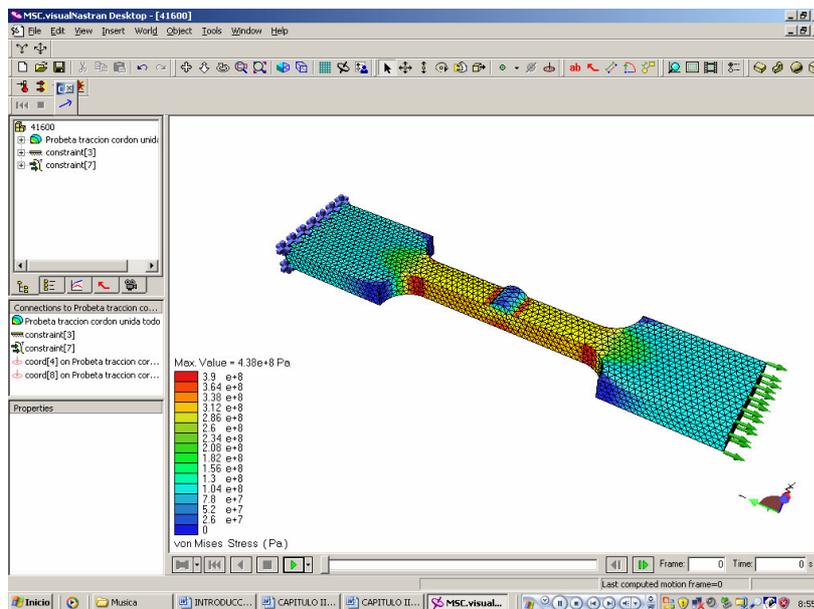


Figura 31- Representación de la simulación de los esfuerzos en Visual Nastran 4D™.



El programa Visual Nastran 4DTM no sólo muestra el valor de los esfuerzos en la probeta, sino también los valores de la deformación y alargamiento.

Finalmente con los valores obtenidos en la simulación a través del método de elementos finitos, se construye la gráfica esfuerzo vs. alargamiento para cada una de las probetas simuladas y aplicando el método del corrimiento mencionado en este capítulo (figura 18) coincidiendo con lo establecido Masubushi se determinan los esfuerzos residuales para cada probeta simulada.

4.- CÁLCULOS Y RESULTADOS.

4.1.- Determinación de la magnitud de los esfuerzos residuales a través de modelos teóricos en soldaduras a tope.

4.1.1.- Cálculo del esfuerzo máximo y el esfuerzo nominal.

$$u = \int \frac{C \times V^2}{2 \times A \times G} dx \quad \rightarrow \quad V = F \quad \Rightarrow \quad A = \left[\sqrt{\left(1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2\right)} \times b^2 + t \right] \times H$$

$$u = \int \frac{C \times F^2}{2 \times A \times G} dx = u = \frac{C \times F^2}{2 \times G} \times \int \frac{dx}{A}$$

$$u = \frac{C \times F^2}{2 \times G} \times \int \frac{dx}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2\right]} \times b^2 + t} \quad \rightarrow \quad u = \frac{C \times F^2}{2 \times G} \times \int \frac{dx}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{a}{x}\right)^2\right]} \times b + t}$$

Haciendo cambio de variable:

$$\frac{x}{a} = \sin \theta \quad ; \quad dx = \cos \theta \times d\theta \quad \rightarrow \quad \text{sustituyendo:}$$

$$\int \frac{\cos \theta \times d\theta}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta} \times b + t} = \int \frac{\cos \theta \times d\theta}{\cos \theta \times b + t} = \frac{1}{b} \int \frac{b \times \cos \theta + t - t}{b \times \cos \theta + t} \times d\theta =$$

$$\frac{\theta}{b} - \frac{t}{b} \int \frac{d\theta}{b \times \cos \theta + t}$$



Basados en que $R(\text{sen}\theta, \cos\theta) \neq R(-\text{sen}\theta, -\cos\theta)$

$$\text{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right) = W \quad ; \quad d\theta = \frac{2}{1+W^2} \times dw$$

$$\cos\theta = \cos^2\frac{\theta}{2} - \text{sen}^2\frac{\theta}{2}$$

Sustituyendo:

$$\int \frac{\frac{2}{1+W^2}}{b \times \left(\frac{1-W^2}{1+W^2}\right) + t} \times dw = \int \frac{2}{b - b \times W^2 + t + t \times W^2} \times dw = \int \frac{2}{(t-b) \times W + (t+b)} \times dw$$

$$\rightarrow \frac{2}{t+b} \int \frac{dw}{\left[\left(\sqrt{\frac{t-b}{t+b}}\right) \times w\right]^2 + 1}$$

Haciendo otro cambio de variable:

$$\sqrt{\frac{t-b}{t+b}} \times w = \text{tg}z \quad ; \quad dw = \sqrt{\frac{t+b}{t-b}} \times \sec^2 z \times dz$$

Sustituyendo:

$$= \frac{2}{t+b} \times \sqrt{\frac{t+b}{t-b}} \times \int \frac{\sec^2 z \times dz}{\tan^2 z + 1} = \frac{2}{t+b} \times \sqrt{\frac{t+b}{t-b}} \times z$$



Devolviendo los cambios:

$$z = \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{t-b}{t+b}} \times w$$

$$w = \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} ; \quad \theta = \operatorname{arcsen} \left(\frac{x}{a} \right)$$

$$w = \operatorname{tg} \left[\frac{\operatorname{arcsen} \left(\frac{x}{a} \right)}{2} \right]$$

$$z = \operatorname{arctg} \left[\sqrt{\frac{t-b}{t+b}} \times \left(\operatorname{tg} \left[\frac{\operatorname{arcsen} \frac{x}{a}}{2} \right] \right) \right]$$

Se definirá la integral resuelta con el termino "I".

$$I = \int_0^l \frac{1}{b} \times \operatorname{arcsen} \left(\frac{x}{a} \right) - \frac{2t}{b(t+b)} \times \sqrt{\frac{t+b}{t-b}} \times \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{t-b}{t+b}} \times \operatorname{tg} \left[\frac{\operatorname{arcsen} \frac{x}{a}}{2} \right] \right) \rightarrow$$

$$I = \frac{1}{b} \times \operatorname{arcsen} \left(\frac{x}{a} \right) - \frac{2t}{b(t+b)} \times \sqrt{\frac{t+b}{t-b}} \times \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{t-b}{t+b}} \times \operatorname{tg} \left[\frac{\operatorname{arcsen} \frac{x}{a}}{2} \right] \right) +$$



$$-\frac{1}{b} \times \arcsen\left(\frac{x}{a}\right) + \frac{2t}{b(t+b)} \times \sqrt{\frac{t+b}{t-b}} \times \arctg\left(\sqrt{\frac{t-b}{t+b}} \times \left[\operatorname{tg}\left[\frac{\arcsen\frac{x}{a}}{2}\right]\right]\right)$$

Finalmente se Tiene que: $U = \frac{C \times F^2}{2 \times G \times H} \times I$

Aplicado el teorema de castigliano se deriva “U” con respecto a “F”, y se obtiene:

$$\frac{dU}{dF} = \delta$$

$$\delta = \frac{C \times F}{G \times H} \times I \quad \varepsilon = \frac{\delta}{L} \rightarrow \varepsilon = \frac{C \times F \times I}{G \times H \times L}$$

$$\sigma = E \times \varepsilon \rightarrow \sigma = \frac{E \times C \times F \times I}{G \times H \times L}$$

Cálculo de la fuerza teórica (F):

$$S_y = \frac{F}{A}$$

$$S_y = 350 \text{ MPa}$$

Despejando la fuerza, queda:

$$F = S_y \times A$$

$$F = 350 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \times (9 \text{ mm} \times 12,5 \text{ mm})$$

$$F = 39.375 \text{ N}$$

Tabla 4.- Propiedades de las probetas estudiadas de acero AISI 1045.

<i>Característica Medida</i>	<i>Variable</i>	<i>Valor de la Variable</i>
Espesor de la placa	t	9,00 mm
Largo del cordón	H	12,50 mm
Alto del cordón	b	3,20 mm
Ancho del cordón	a = 2 x l	10,00 mm
Área de la sección transversal	A	112,50 mm ²
Material	–	AISI 1045
Módulo de elasticidad	E	2,07x10 ¹¹ Pa
Resistencia a la fluencia	Sy	350x10 ⁶ Pa
Módulo de rigidez	G	79,30x10 ⁹ Pa
Factor de forma en la sección transversal	C	1,50 (rectangular)
Electrodos usados para la construcción de la junta	–	E – 6010 E - 7018
Coefficientes de Poisson.	v	0,30
Coefficientes de dilatación térmica lineal	α	11x10 ⁻⁶ °C
Fuerza Teórica	F	39.375 N
Densidad	ρ	7.800 Kg/m ³



Sustituyendo los valores:

$$L = \frac{a}{2} = \frac{10}{2} \text{ mm} = 5 \text{ mm}$$

$$I = \frac{1}{3,2} \times \arcsen\left(\frac{x}{10}\right) - \frac{2 \times 9}{3,2(9+3,2)} \times \sqrt{\frac{9+3,2}{9-3,2}} \times \arctg \left(\sqrt{\frac{9-3,2}{9+3,2}} \times \left(\left[\frac{\arcsen \frac{x}{10}}{2} \right] \right) \right) \Bigg|_5$$

$$- \frac{1}{3,2} \times \arcsen\left(\frac{x}{10}\right) + \frac{2 \times 9}{3,2(9+3,2)} \times \sqrt{\frac{9+3,2}{9-3,2}} \times \arctg \left(\sqrt{\frac{9-3,2}{9+3,2}} \times \left(\left[\frac{\arcsen \frac{x}{10}}{2} \right] \right) \right) \Bigg|_0$$

$$I = 3,71$$

$$\varepsilon = \frac{\delta}{l} \rightarrow \varepsilon = \frac{C \times F \times I}{G \times H \times L}$$

$$\varepsilon = \frac{1,5 \times 39.375 \times 3,71}{79,3 \times 10^9 \times 12,5 \times 10}$$

$$\varepsilon = 2,210 \times 10^{-8}$$

$$\sigma_{NOM} = 207 \times 10^9 \text{ Pa} * 2,210 \times 10^{-8}$$

$$\sigma_{NOM} = 4.574,70 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{MAX} = \frac{F}{A} = \frac{39.375 \text{ N}}{12,5 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}} = 350 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{MAX} = 350 \text{ MPa}^3$$

4.1.2.- Cálculo del esfuerzo residual teórico.

4.1.2.1.- Cálculo del esfuerzo residual teórico partiendo de la relación con la intensidad de corriente de la soldadura

Partiendo de las consideraciones hechas por Glizmanenko y Masubuchi figura 17 se obtiene la siguiente relación entre la intensidad de corriente de la soldadura y el esfuerzo residual.

Tabla 5.- Relación entre la intensidad de corriente y el esfuerzo residual.

<i>N°</i>	<i>Intensidad de Corriente (A)</i>	<i>Esfuerzo Residual (MPa)</i>
1	50,00	236,36
2	71,43	186,36
3	121,42	245,45
4	150,00	245,45
5	173,80	177,27
		$\sigma_{RT} = 218,18$

4.1.2.2.- Cálculo del esfuerzo residual teórico partiendo del método de corrimiento.

De las graficas obtenidas del ensayo de tracción de las probetas no testigo (ver apéndice B) se obtiene el valor de la carga de fluencia para cada una de ellas; resultando:

Tabla 6.- Carga de fluencia para cada probeta.

<i>Nº</i>	<i>Carga de Fluencia (N)</i>
1	18.031,25
2	21.000,00
3	22.000,00
4	22.666,66

Utilizando la expresión de la ecuación II.2 se obtiene:

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Cálculo tipo:

Donde $A = 112,5 \text{ mm}^2$

$P = 18.031,25 \text{ N}$

$$\sigma = \frac{18.031,25 \text{ N}}{112,5 \text{ mm}^2} = 160,27 \text{ MPa}$$

Estos valores representan directamente el esfuerzo residual de acuerdo a lo demostrado por Glizmanenko y Masubuchi; se encuentran tabulados en la siguiente tabla:

Tabla 7.- Esfuerzo residual teórico por el método de corrimiento.

<i>Nº</i>	<i>Esfuerzo Residual Teórico (MPa)</i>
1	160,27
2	186,66
3	195,55
4	201,48
	$\sigma_{RT} = 199,60$



4.2.- Determinación de la magnitud de los esfuerzos residuales a través de ensayos realizados a probetas en función de las tensiones aplicadas.

4.2.1.- Ensayo de tracción.

4.2.1.1.- Resultados ensayo de tracción a probetas testigos.

Tabla 8.- Valores de carga obtenidos en el ensayo a tracción de probetas testigos.

<i>N^o</i>	<i>Probetas testigos</i>
	<i>F_T (N)</i>
1	56.560
2	56.635

4.2.1.2.- Resultados ensayo de tracción a probeta no testigo.

Tabla 9.- Valores de carga obtenidos en el ensayo a tracción de probetas no testigos.

<i>N^o</i>	<i>Probetas no testigos</i>
	<i>F_{NT} (N)</i>
1	35.607
2	36.428
3	41.600
4	49.203



4.2.1.3.- Cálculo de esfuerzo residual en ensayo de tracción.

Para obtener el esfuerzo residual, es necesario determinar la carga residual (F_R); este valor de carga se obtiene mediante el siguiente cálculo tipo aplicando la ecuación III.16:

$$F_R = F_T - F_{NT}$$

Donde:

F_T : Es la carga de falla de la probeta testigo en el ensayo de tracción (N).

F_{NT} : Es la carga de falla de la probeta no testigo en el ensayo de tracción (N).

$$F_R = 56.560 \text{ N} - 35.607 \text{ N} = 20.953 \text{ N}$$

Tabla 10.- Valores de carga residual usando como referencia probeta testigo N° 1.

	<i>Probeta con esfuerzos</i>	<i>Probeta testigo (1)</i>	<i>Carga residual</i>
	$F_{NT} \text{ (N)}$	$F_T \text{ (N)}$	$F_R \text{ (N)}$
1	35.607	56.560	20.953
2	36.428	56.560	20.132
3	41.600	56.560	14.960
4	49.203	56.560	7.357



Tabla 11.- Valores de carga residual usando como referencia probeta testigo N° 2.

<i>N°</i>	<i>Probeta con esfuerzos</i> $F_{NT}(N)$	<i>Probeta testigo (2)</i> $F_T(N)$	<i>Carga Residual</i> $F_R(N)$
1	35.607	56.635	21.028
2	36.428	56.635	20.207
3	41.600	56.635	15.035
4	49.203	56.635	7.432

Una vez obtenidos los valores de la carga residual (F_R); se procede a determinar el esfuerzo a través de la siguiente ecuación:

$$\sigma_R = \frac{F_R}{A}$$

Donde:

σ_R : Esfuerzo Residual Experimental (MPa).

A: Área sección transversal (mm^2).

Cálculo tipo:

$$\sigma_R = \frac{20.953 \text{ N}}{112,50 \text{ mm}^2} = 186,25 \text{ MPa}$$

Tabla 12.- Tabulación de los esfuerzos residuales.

<i>Nº</i>	<i>Esfuerzo Residual (con probeta testigo 1) (MPa)</i>	<i>Esfuerzo Residual (con probeta testigo 2) (MPa)</i>
1	186,25	186,91
2	178,95	179,61
3	132,97	133,64
4	65,39	66,06
	$\sigma_{Rtrac1} = 140,89$	$\sigma_{Rtrac2} = 141,55$

σ_{Rtrac1} : Esfuerzo residual con respecto a probeta testigo N° 1.

σ_{Rtrac2} : Esfuerzo residual con respecto a probeta testigo N° 2.

4.2.2.- Ensayo de tensión superficial.

En la siguiente tabla se encuentran tabulados los resultados obtenidos durante el ensayo:

La carga prefijada a la cual se detuvo el ensayo fue $F = 30.000 \text{ N}$

Tabla 13.- Valores de longitud antes y después de la carga aplicada.

<i>Probeta N°</i>	<i>Longitud Inicial L_0 (mm)</i>	<i>Longitud Final L_f (mm)</i>
1	14	14,010
2	14	14,010
3	14	14,015

Con estas diferencias en las longitudes se determinan las deformaciones generadas en las probetas:

$$\varepsilon = \frac{L_f - L_0}{L_0}$$

Donde:

ε : Deformación.

L_0 : Longitud Inicial (mm).

L_f : Longitud Final (mm).

Calculo tipo:

$$\varepsilon = \frac{14,010 - 14}{14} = 0,000714 \frac{mm}{mm}$$

Tabla 14.- Valores de deformación para cada probeta.

<i>Probeta N°</i>	<i>Deformación (ε)</i> <i>(mm/mm)</i>
1	0,000714
2	0,000714
3	0,001074

Con las deformaciones obtenidas se determina directamente el esfuerzo residual elástico presentes en las probetas mediante la ecuación II.2:

$$\sigma_E = \varepsilon * E$$

Donde:

E: Módulo de elasticidad (MPa).

ε : Deformación.

σ_E : Esfuerzo residual elástico (MPa).

Calculo tipo:

$$\sigma_E = 0,000714 * 207 * 10^9 Pa$$

$$\sigma_E = 147798000 Pa \approx 147,80 Mpa$$

Tabla 15.- Valores del esfuerzo experimental para cada probeta.

<i>Probeta N°</i>	<i>Esfuerzo Residual Experimental (Mpa)</i>
1	147,80
2	147,80
3	222,31
	$\sigma_{REXP}=172,63$

4.3.- Determinación de los esfuerzos residuales mediante el método de elementos finitos.

4.3.1.- Resultados obtenidos en la simulación usando Visual Nastran 4D™.

4.3.1.1.- Resultados obtenidos en la simulación de probetas no testigos.

Las figuras que se muestran a continuación representan el modelo de elementos finitos utilizado para obtener la distribución de esfuerzos y alargamiento en las probetas no testigos.

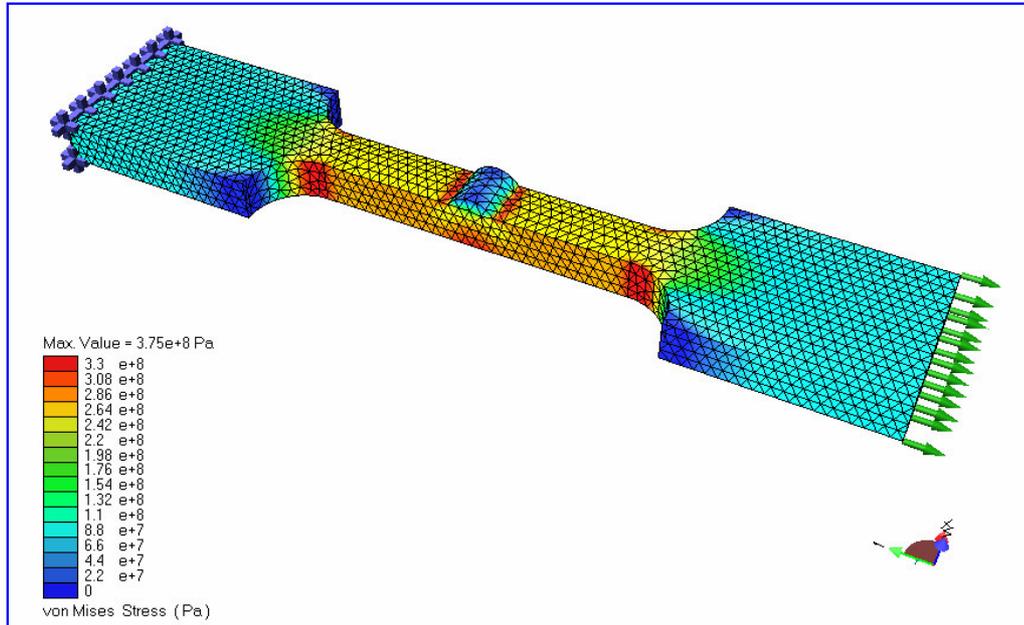


Figura 32.-Probeta no testigo N° 1 después de ser analizados los esfuerzos por el método de elementos finitos (MEF).

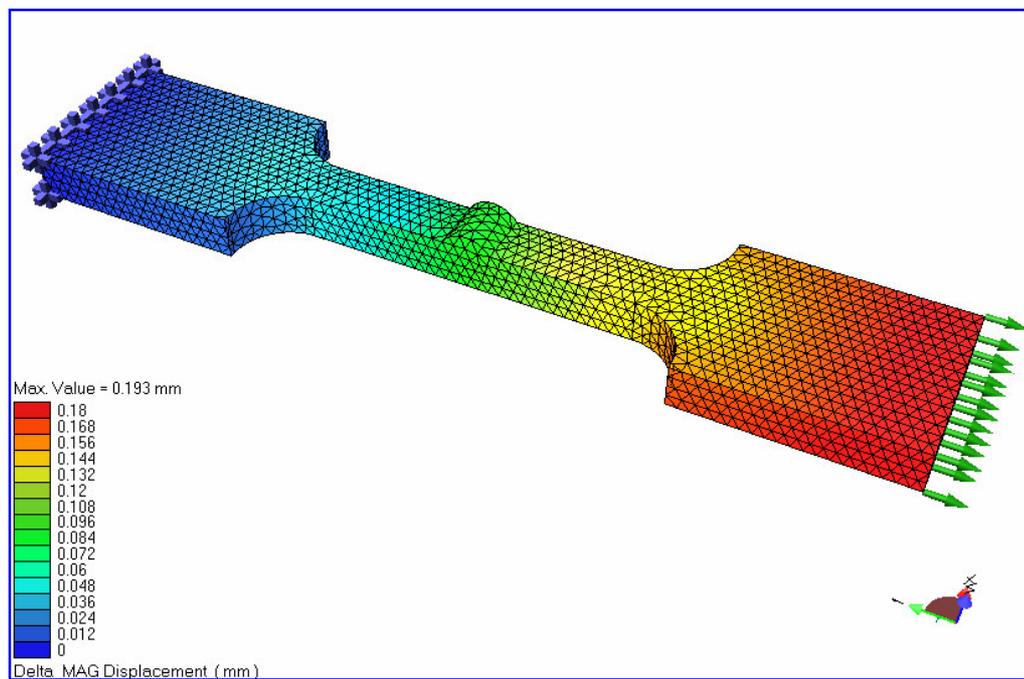


Figura 33.-Probeta no testigo N° 1 después de ser analizados los desplazamientos por el método de elementos finitos (MEF).

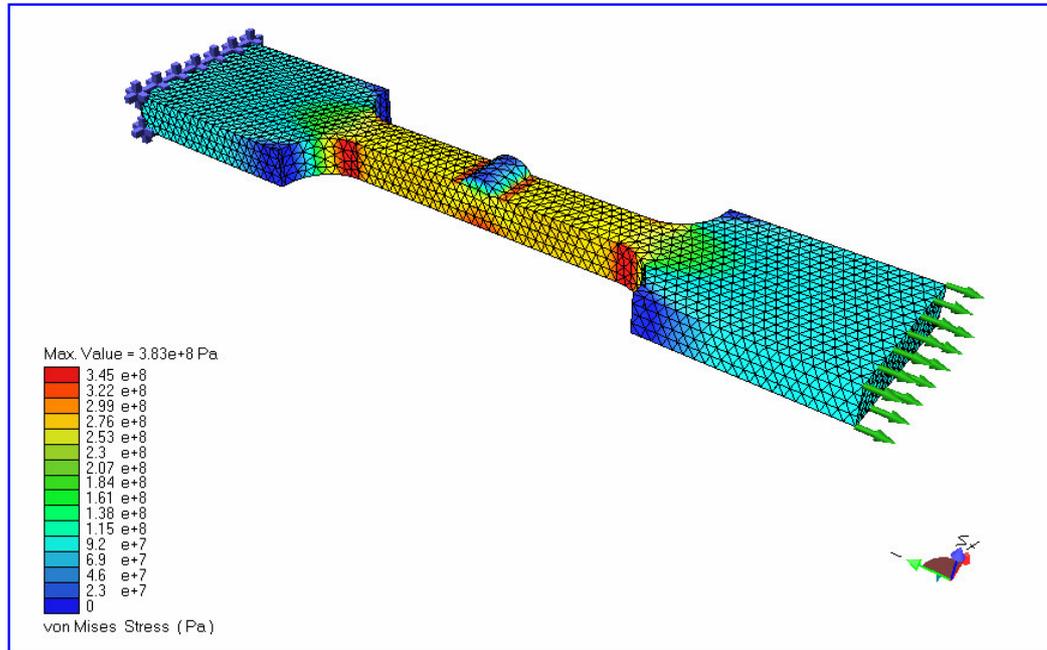


Figura 34.-Probeta no testigo N° 2 después de ser analizados los esfuerzos por el método de elementos finitos (MEF).

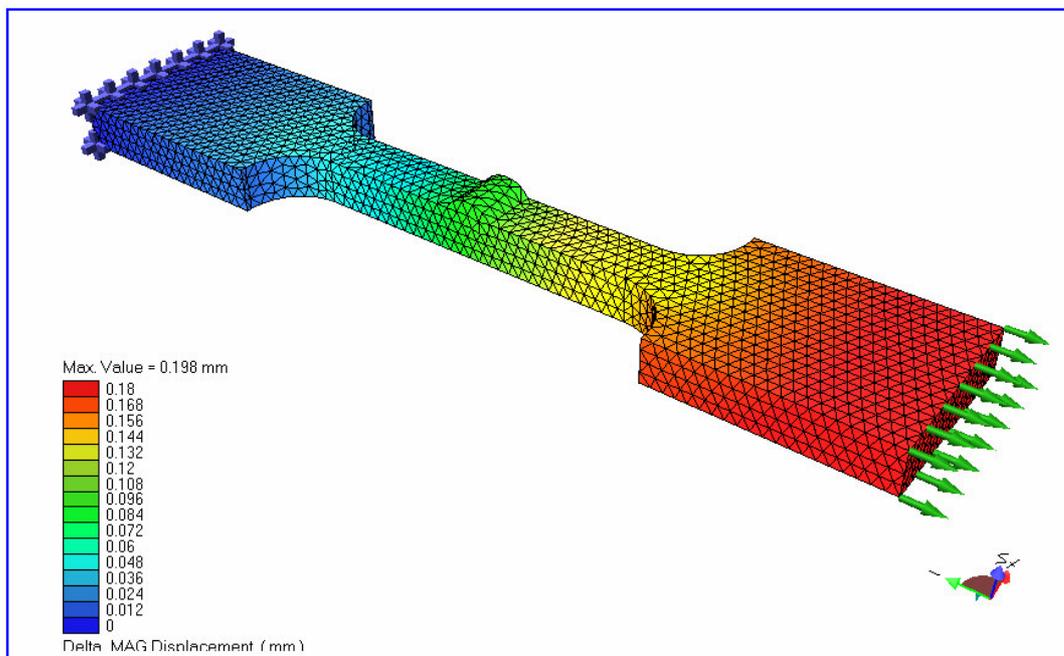


Figura 35.-Probeta no testigo N° 2 después de ser analizados los desplazamientos por el método de elementos finitos (MEF).

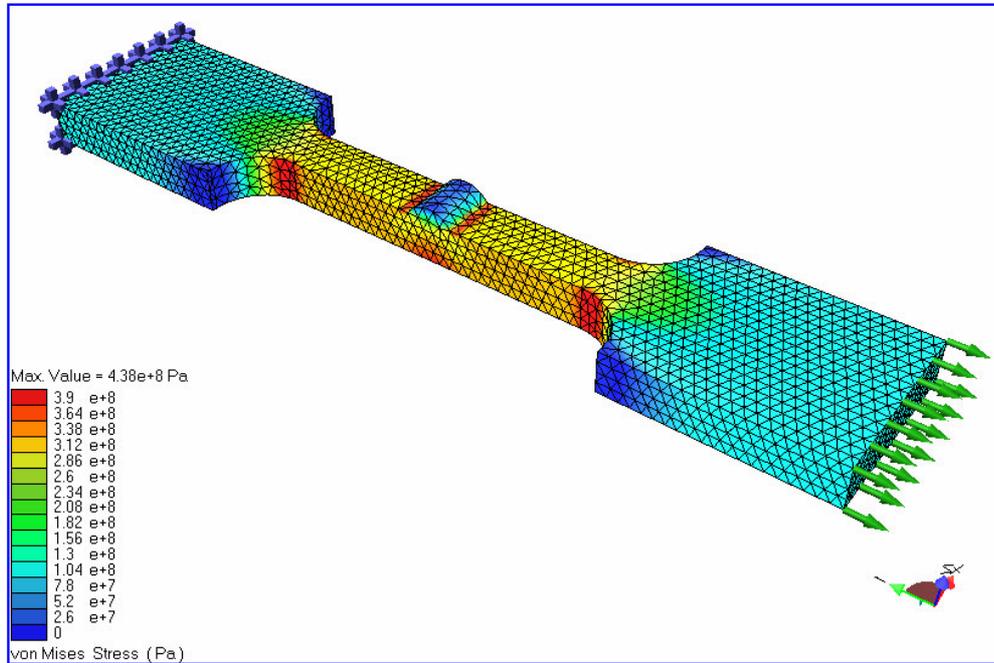


Figura 36.-Probeta no testigo N° 3 después de ser analizados los esfuerzos por el método de elementos finitos (MEF).

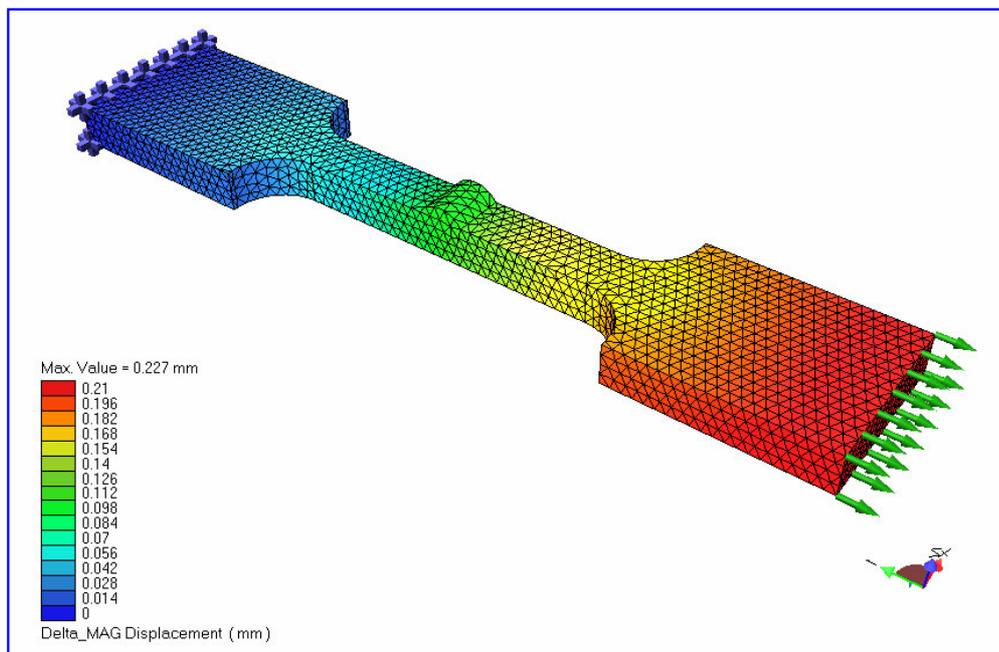


Figura 37.-Probeta no testigo N° 3 después de ser analizados los desplazamientos por el método de elementos finitos (MEF).

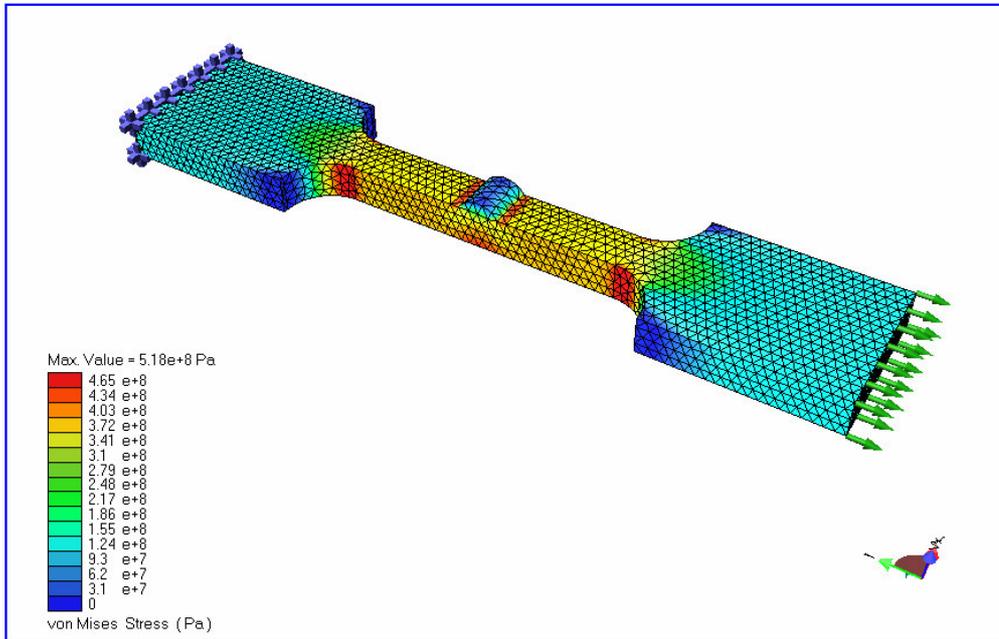


Figura 38.-Probeta no testigo N° 4 después de ser analizados los esfuerzos por el método de elementos finitos (MEF).

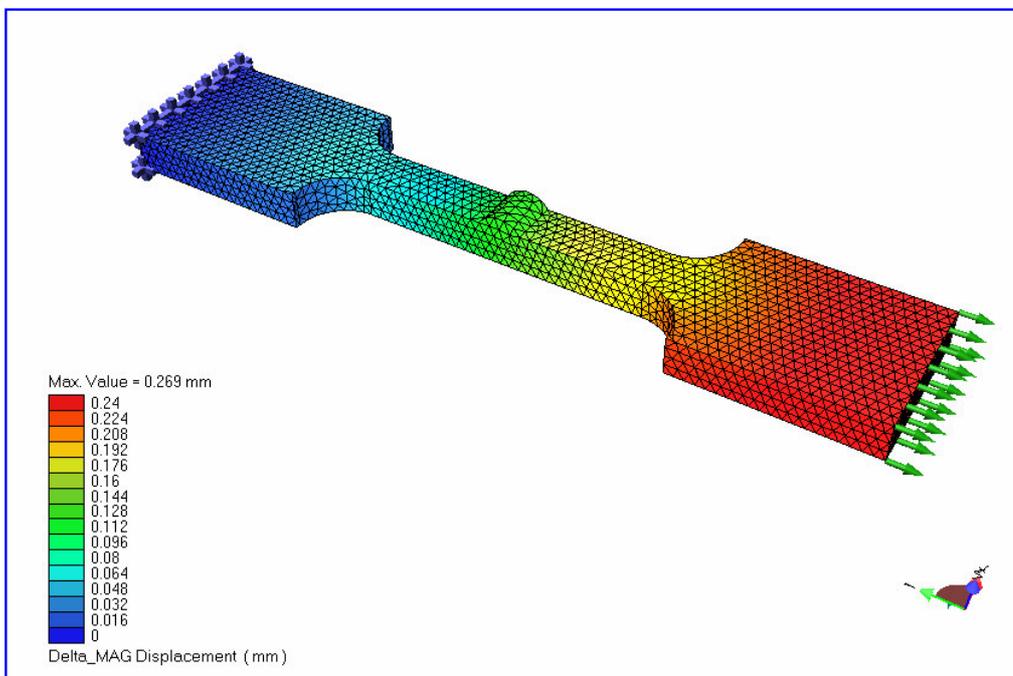


Figura 39.-Probeta no testigo N° 4 después de ser analizados los desplazamientos por el método de elementos finitos (MEF).

4.3.1.2.- Cálculo de esfuerzos residuales mediante modelo computarizado.

A continuación se tabulan los valores obtenidos en la simulación por MEF.

Tabla 16.- Valores de esfuerzo y alargamiento obtenidos mediante MEF en probeta no testigo N° 1.

<i>Probeta no testigo N° 1</i>	
Esfuerzo (MPa)	Alargamiento (mm)
132	0,072
154	0,084
176	0,096
198	0,108
220	0,12
242	0,132
264	0,144
286	0,156
308	0,168
330	0,18
340	0,193

Tabla 17.- Valores de esfuerzo y alargamiento obtenidos mediante MEF en probeta no testigo N° 2.

<i>Probeta no testigo N° 2</i>	
Esfuerzo (MPa)	Alargamiento (mm)
138	0,072
161	0,084
184	0,096
207	0,108
230	0,12
253	0,132
276	0,144
299	0,156
322	0,168
345	0,18
365	0,198



Tabla 18.- Valores de esfuerzo y alargamiento obtenidos mediante MEF en probeta no testigo N° 3.

<i>Probeta no testigo N° 3</i>	
Esfuerzo (MPa)	Alargamiento (mm)
104	0,056
130	0,07
156	0,084
182	0,098
208	0,112
234	0,126
260	0,14
286	0,154
312	0,168
338	0,182
364	0,196
390	0,21
410	0,227

Tabla 19.- Valores de esfuerzo y alargamiento obtenidos mediante MEF en probeta no testigo N° 4

<i>Probeta no testigo N° 4</i>	
Esfuerzo (MPa)	Alargamiento (mm)
31	0,016
62	0,032
93	0,048
124	0,064
155	0,08
186	0,096
217	0,112
248	0,128
279	0,144
310	0,16
341	0,176
372	0,192
403	0,208
434	0,224
465	0,24
460	0,269

Con los valores de las tablas anteriores (Tablas 16, 17, 18 y 19) se construyen las gráficas esfuerzo vs. alargamiento (ver apéndice C) y se utiliza el método de corrimiento (mencionado en el capítulo III) para determinar el esfuerzo de fluencia de cada probeta y éste será directamente el esfuerzo residual según lo establecido en el capítulo II por Glizmanenko y Masubuchi.

En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 20.- Valores de esfuerzo Residual obtenidos mediante el MEF para las probetas no testigo.

<i>N°</i>	<i>Esfuerzo Residual MEF (MPa)</i>
1	196,58
2	174,59
3	162,00
4	85,55
	$\sigma_{RMEF} = 154,68$

Donde:

σ_{RMEF} : Esfuerzo residual mediante el método de elementos finitos (MPa).

4.4.- Validación del modelo computarizado por medio de la comparación de los resultados obtenidos en el análisis teórico y experimental.

Para validar el modelo virtual ensayado en Visual Nastran 4DTM se utilizó el procedimiento de comparación directa de los valores obtenidos, tanto teóricos como experimentales. Es importante resaltar que las condiciones referentes a la geometría y al material en el análisis por elementos finitos fueron recreadas en el programa tomando como referencia las probetas ensayadas.



Tabla 21.- Comparación de los esfuerzos residuales obtenidos mediante el MEF y teóricamente.

<i>Esfuerzo Residual Teórico (MPa)</i>	<i>Esfuerzo Residual MEF (MPa)</i>
185,99	154,68

Tabla 22.- Comparación de los esfuerzos residuales obtenidos mediante el MEF y experimentalmente a través del ensayo de tracción.

<i>Esfuerzo Residual Experimental (MPa)</i>	<i>Esfuerzo Residual MEF (MPa)</i>
141,22	154,68

Tabla 23.- Comparación de los esfuerzos residuales obtenidos mediante el MEF y experimentalmente a través del ensayo de tensión superficial.

<i>Esfuerzo Residual Experimental (MPa)</i>	<i>Esfuerzo Residual MEF (MPa)</i>
172,63	154,68

5.- ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

Tabla 24.- Valores de esfuerzos residuales obtenidos teóricamente y mediante la Nastran

<i>Nº</i>	<i>Esfuerzo Residual Teórico (MPa)</i>	<i>Esfuerzo Residual MEF (MPa)</i>	<i>% de Error entre los dos métodos</i>
1	160,27	196,58	18,47
2	186,66	174,59	6,46
3	195,55	162,00	17,15
4	201,48	85,55	57,53

El esfuerzo residual teórico promedio es aproximadamente 185,99 MPa mientras que el obtenido a través del modelo computarizado es de 154,68 MPa, existiendo una diferencia que oscila entre el 16,83 %; este error es debido a que el cálculo teórico se obtiene a partir de los gráficos resultantes del ensayo de tracción realizado a probetas reales, donde se debe considerar que la máquina utilizada en el ensayo genera resultados aleatorios que afectan el rendimiento del mismo. En el modelo computacional a través del método de elementos finitos se divide en nodos la probeta y se aplica uniformemente la carga arrojando valores de alargamiento más precisos que los obtenidos experimentalmente.

En comparación con los resultados obtenidos por Horioka Osaki, J. y Alencastre Miranda, J. en su estudio obtienen una diferencia del 18 % entre el cálculo analítico y el computarizado, a pesar de que en su trabajo no se determinaron los esfuerzos residuales, se observa también una discrepancia entre el cálculo analítico y el cálculo por MEF.

Tabla 25.- Valores de esfuerzos residuales obtenidos experimentalmente y mediante Nastran para probetas testigos N°1 y N°2.

<i>N°</i>	<i>Esfuerzo Residual Experimental (PT N° 1) (MPa)</i>	<i>Esfuerzo Residual Experimental (PT N°2) (MPa)</i>	<i>Esfuerzo Residual MEF (MPa)</i>	<i>% de Error (PT N°1)</i>	<i>% de Error (PT N°2)</i>
1	186,25	186,92	196,58	5,2	4,91
2	178,95	179,62	174,59	2,43	2,80
3	132,97	133,64	162,00	17,90	17,50
4	65,38	66,06	85,55	23,50	22,78

Existen semejanzas entre los niveles alcanzados de los esfuerzos obtenidos por vía experimental y mediante la simulación; esto se debe a que en la simulación del modelo computarizado se utilizaron las mismas características geométricas de la probeta, el valor de la carga aplicada y condiciones de borde del ensayo de tracción experimental.

Uno de los factores que influyen en la diferencia entre los resultados tabulados anteriormente es que las curvas esfuerzo vs. deformación obtenidas en el ensayo de tracción desciende luego de alcanzar su valor máximo, indicando que disminuye el nivel de esfuerzo; en la realidad no es así, el esfuerzo verdadero continua elevándose hasta que finalmente el material se fractura. La razón de la aparente disminución en el esfuerzo es que la gráfica se toma de una típica máquina de prueba de tensión y en realidad la gráfica es de carga vs. alargamiento y no de esfuerzo vs. deformación. La carga aplicada a la probeta se convierte en esfuerzo al dividirla entre el área de su sección transversal original; cuando la probeta se acerca a su carga de ruptura, se reduce su diámetro y, en consecuencia, su área de sección transversal. El área que se redujo requirió una fuerza menor para seguir alargando la probeta, aun cuando el esfuerzo verdadero sobre el material se incrementa.



Al realizar el tratamiento térmico de recocido no se eliminan por completo las tensiones residuales, sino que se minimizan en casi su totalidad, lo que evidencia la diferencia en los resultados obtenidos experimentalmente y mediante el MEF, pues al determinar los esfuerzos residuales experimentales se está considerando la probeta testigo sin ningún tipo de esfuerzo acumulado, cuando en realidad presenta un mínimo porcentaje de esfuerzos residuales (8 %), por lo que el margen de error real entre ambos métodos disminuirá. Sin embargo, cuando el caso lo amerite es necesario someter a la unión soldada a un tratamiento térmico que le devuelva sus características iniciales y reduzca las tensiones internas que pueden quedar en el material como consecuencia de la soldadura, esto dependerá de la importancia o seguridad que requiera la unión.

Los esfuerzos residuales obtenidos son de tracción ya que en la zona de influencia térmica existen fenómenos de expansión y contracción, cómo este último ocurre en condiciones de movimiento restringido, los espacios que se originaron durante la deformación plástica en caliente, resultan cortos para ocuparlos y aparecen entonces las tensiones térmicas de tracción, que al alcanzar la temperatura ambiente quedan presentes. Estas tensiones térmicas se pueden determinar haciendo un simple análisis termomecánico considerando el coeficiente de dilatación del material y la distribución de temperatura, pero se obtiene como resultado tensiones muy elevadas, según la experiencia de Luengo, C. y Cardona, A. indica que estas tensiones son inferiores a las calculadas en el análisis básico, por lo que no se consideró para este estudio.

Estos esfuerzos residuales serán favorables dependiendo del punto de vista que se analicen; es decir; si se verifica como afectan a los concentradores de esfuerzos podrían considerarse como convenientes ya que ejercen una fuerza de tracción sobre el metal base que provoca que la distribución de esfuerzos en la pieza tienda a linealizarse, además de mantenerlas unidas al cordón de soldadura. Pero si se analizan desde el punto de vista del diseño de uniones soldadas, la omisión de estos esfuerzos



afectará directamente la vida útil de las mismas, debido a que este esfuerzo residual de tracción resultante perjudicará al material dependiendo del grado de ductilidad o fragilidad que presente.

Otro factor relevantes en la diferencia de los resultados obtenidos, es el hecho, de haber utilizado el proceso de soldadura por arco eléctrico manual (SMAW), que conlleva a errores humanos ocasionados por el pulso del operario, cambio del electrodo incluso en una misma pasada. Además es importante destacar la influencia de la intensidad de corriente que afecta, pues si es demasiado alta, el electrodo funde muy deprisa y el baño de fusión es muy grande e irregular. Si por el contrario la corriente es muy baja, no hay suficiente calor para fundir el metal base y el baño de fusión es muy pequeño y por tanto el cordón queda de forma irregular y muy abombado.

Para los resultados obtenidos en este estudio en el ensayo experimental se regula la intensidad de corriente al igual que la tensión de arco, se mantienen dentro de ciertos límites para conseguir un arco estable. En caso contrario, se producirá un calentamiento irregular en la pieza y electrodo, con las consecuencias ya comentadas anteriormente.

García Rodríguez, Y. y Burgos Sola, J. en su trabajo presentan una diferencia entre las tensiones obtenidas experimentalmente y mediante MEF de 5,2 %, mientras que los obtenidos en este estudio oscilan alrededor del 8,5 %. Es importante mencionar que García Rodríguez, Y. y Burgos Sola, J. utilizaron como material de estudio acero ASTM A36 y soldadura por arco sumergido. A pesar de que los trabajos de investigación difieren en cuanto al material y proceso de soldadura, se evidencia la eficiencia del modelo computarizado en comparación con los resultados experimentales.



En el modelo computarizado se comprueba que los valores de los esfuerzos residuales disminuyen en la zona más alejada del cordón de soldadura; lo cual es lógico y de total correspondencia, ya que las zonas más tensionadas son las más cercanas al cordón y a la zona afectada térmicamente.

El resultado obtenido en el ensayo de esfuerzo superficial arroja un esfuerzo residual de 172,63 MPa mientras que el obtenido en el MEF es de 154,68 MPa; dando lugar a una diferencia del 10,39 %, lo que es aceptable pues en el ensayo experimental solo se mide el esfuerzo residual a nivel de la superficie mientras que a través de MEF se obtiene un esfuerzo residual en todas las direcciones.

Los resultados obtenidos fueron en base al análisis del comportamiento del cordón de soldadura en la parte superior debido a que el área trapezoidal es de 86 mm², obviando el área rectangular (37 mm²) de la base del cordón ya que es pequeña en comparación con el área trapezoidal y fue soldada con menor amperaje y un electrodo de menor resistencia, además el número de pasadas en el área trapezoidal es mayor.



6.- CONCLUSIONES.

Se determinó la magnitud del esfuerzo residual teórico (185,99 MPa) en las uniones soldadas a tope, de acero AISI 1045, realizada por arco eléctrico con electrodo revestido como material de aporte.

Se realizaron ensayos a probetas con las características de diseño descritas en el capítulo III, donde se determinó, que para probetas de acero AISI 1045, el esfuerzo residual experimental es 141,23 MPa.

Se desarrolló un modelo computarizado por medio del MEF que permitió simular el cordón de soldadura, obteniendo un esfuerzo residual de 129,50 MPa. Lo que demuestra que pueden obtenerse resultados consistentes y completamente lógicos desde el punto de vista de la distribución esperada de tensiones. Un factor importante en la simulación son las condiciones de borde; la variación en las condiciones de borde pueden producir grandes diferencias en los resultados al simular las mismas uniones, es importante establecer las mismas condiciones de borde, que permitan controlar la fuerza que se aplican, de lo contrario se pueden introducir esfuerzos no esperados, como por ejemplo, al pensar que al aumentar el cordón, más allá de lo calculado, se obtiene mayor resistencia de la unión, el aumento del espesor del cordón podría producir aumento de los esfuerzos residuales.

Se validó el modelo computarizado al comparar los resultados obtenidos a través de la simulación con el análisis teórico y el ensayo con las probetas. La diferencia entre el análisis teórico y la simulación fue de 17 %, mientras que el obtenido al compararlo con los resultados experimentales fue de 8,5 %. Lo que demuestra que se puede valorar una tecnología desarrollada, evitando la técnica de ensayo y error.



Se logró analizar y discutir los resultados obtenidos, pues no existe un valor definitivo de las tensiones residuales obtenidas, que puedan asegurar que para un porcentaje determinado de la tensión de fluencia del material se pueda crear un desastre.

7.-RECOMENDACIONES.

Se recomienda la utilización de la teoría de Masubushi y el método de elementos finitos, en estudios similares tendientes a la determinación de esfuerzos residuales.

Es recomendable realizar ensayos posteriores con probetas de otros espesores y otros tipos de cordón de soldadura para poder establecer una ecuación matemática que describa el comportamiento de los esfuerzos residuales en función de las variables analizadas.

Las tensiones residuales pueden combinarse con algún defecto interno, por lo que se recomienda prestar interés en ellas para evitar y/o prevenir el agrietamiento y la falla de la unión.

Para lograr controlar las tensiones residuales y obtener mejores resultados es importante considerar las siguientes recomendaciones sencillas que pueden ayudar a controlar las fuerzas originadas por dilataciones y contracciones: *preparación adecuada de piezas y bordes*, una correcta preparación de los bordes no sólo disminuye los efectos de distorsión sino que asegura una buena penetración de la soldadura; *reducir al mínimo la aportación de calor (Heat Input)*, en vez de realizar una soldadura continua, se realiza primeramente un pequeño cordón en el comienzo de la junta, se salta unos centímetros y se realiza el segundo cordón próximo al centro de la junta y por último otros cordón al final y así se repite el ciclo hasta completar la soldadura; *martilleado*, para ayudar al cordón a ceder durante el enfriamiento es común golpearlo ligeramente con el extremo redondo de un martillo de bola; *atenuación de tensiones* a través de un tratamiento térmico; empleo de *soportes y montajes*, ayuda a reducir la deformación puesto que mantiene las piezas en una posición fija evitando movimientos excesivos; *número de pasadas*, puede reducirse la deformación aplicando el menor número de pasadas posibles; *predeformación*, para



evitar la deformación de las piezas al soldar es necesario preparar las piezas con una pequeña deformación en el sentido contrario a la que se espera va a producirse en el soldeo, para el caso de soldadura en V es recomendable separar de 2 a 3 mm las piezas.



7.- BIBLIOGRAFÍA.

[1] Montaña, F. (2004). **Tecnología Mecánica II**. Bolivia: Universidad Mayor de San Simón.

[2] Bazán N., C. (1998). **Determinación de electrodos y cálculo de costos de soldadura al arco asistidos por computadora**. Perú: Universidad de Piura.

[3] Howard, C. (1981). **Modern Welding Technology (3^{era} Ed)**. New Jersey: Regents/Prentice Hall.

[4] Metal Univers. (2006). **Publicación de Metal Univers (Nº 38)**. España: Nova Àgora, S.L.

[5] Guiachino, J. y Weeks, W. **Técnica y práctica de la Soldadura**. Michigan: Reverté, S.A.

[6] Metal Univers. (2006). **Publicación de Metal Univers (Nº 38)**. España: Nova Àgora, S.L. [7] Toprac, A. y Jura, J. (1968). **Technical Note: The effect of welding sequence on residual stresses in welded h-shapes (Nº 9)**. Welding Journal.

[8] Glizmanenko, D. L. (1968). **Soldadura y Corte de los Metales**. La Habana: Instituto del Libro.

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

[10] Singer. **Resistencia de Materiales**. Harla.



[11] Shigley, J. y Mitchell, L. (1986). **Diseño en Ingeniería Mecánica (Tercera Edición)**. México: McGraw-Hill.

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

[13] <http://www.inoxidable.com/dureza.html>

[14] <http://www2.ing.puc.cl/~icm2312/apuntes/materiales/materials6-2.html>

[15] Avner, S. (1995). **Introducción a la Metalurgia Física (Segunda edición)**. México: McGraw-Hill.

[16] Jougard, C. (2002). **Introducción al Método de los Elementos Finitos: Conceptos de Mecánica de los Sólidos**. Buenos Aires: Universidad Tecnológica Nacional.

[17] <http://ingenieria-cad.blogspot.com/>

[18] http://www.mssoftware.com/products/msc_nastran.cfm

[19] Mott, R. (1996). **Resistencia de Materiales Aplicada (Tercera Edición)**. México: Prentice Hall.