



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA UNIDAD DE POSGRADOS

MAESTRÍA EN MÉTODOS MATEMÁTICOS Y SIMULACIÓN NUMÉRICA EN INGENIERÍA.

Proyecto de investigación y desarrollo
previo a la obtención del Grado de
Magister en Métodos Matemáticos y
Simulación Numérica en Ingeniería

DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE LA SOLDADURA EN EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO EN LAS ESTRUCTURAS METÁLICAS POR MEDIO DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Autor:
Aníbal Martín Pintado Pizarro

Dirigido por:
Marco Esteban Amaya Pinos

Cuenca, 2018

**DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE LA
SOLDADURA EN EL COMPORTAMIENTO
MECÁNICO EN LAS ESTRUCTURAS
METÁLICAS POR MEDIO DEL MÉTODO DE
ELEMENTOS FINITOS**

Determinación del efecto de la soldadura en el comportamiento mecánico en las estructuras metálicas por medio del método de elementos finitos

Autor:

ANÍBAL MARTÍN PINTADO PIZARRO

Ingeniero Mecánico

Maestría en Métodos Matemáticos y Simulación Numérica en Ingeniería.

Universidad Politécnica Salesiana

Dirigido por:

MARCO ESTEBAN AMAYA PINOS

Ingeniero Mecánico

Magister en Auditoria de Gestión de la Calidad.

Magister en Sistemas Automotrices.

Docente de la Carrera de Ingeniería Mecánica.



Cuenca – Ecuador.

PINTADO PIZARRO ANÍBAL MARTIN

“DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE LA SOLDADURA EN EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO EN LAS ESTRUCTURAS METÁLICAS POR MEDIO DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS”.

Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca – Ecuador, 2018

MAESTRÍA EN MÉTODOS MATEMÁTICOS Y SIMULACIÓN NUMÉRICA EN INGENIERÍA

Formato 170 x 240mm

Páginas: 74

Breve reseña de los autores e información de contacto:

AUTOR:



ANÍBAL MARTÍN PINTADO PIZARRO

Ingeniero Mecánico
Maestría en Métodos Matemáticos y Simulación Numérica En Ingeniería
mpintado1987@hotmail.com

DIRIGIDO POR:



MARCO ESTEBAN AMAYA PINOS

Ingeniero Mecánico
Magister en Auditoria de Gestión de la Calidad.
Magister en Sistemas Automotrices
mamaya@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADO

© 2018 Universidad Politécnica Salesiana
CUENCA – ECUADOR - SUDAMÉRICA
PINTADO PIZARRO ANÍBAL MARTIN

“DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE LA SOLDADURA EN EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO EN LAS ESTRUCTURAS METÁLICAS POR MEDIO DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS”.

IMPRESIÓN EN ECUADOR – PRINTED IN ECUADOR.

ÍNDICE GENERAL.

Índice general.....	1
Índice de figuras	3
Índice de tablas.....	5
Dedicatoria.....	6
Prefacio.....	7
Prólogo.....	8
Agradecimiento.....	9
1. ESTADO DEL ARTE DE LA GENERACIÓN Y PROPAGACIÓN DE TENSIONES RESIDUALES EN EL PROCESO DE SOLDADURA.....	10
1.1. Antecedentes.....	11
1.2. Proceso de soldadura	12
1.2.1. El acero	12
1.2.2. Soldabilidad en el acero	12
1.2.3. Elementos que se forman en el proceso de soldadura	13
1.2.4. Proceso de soldadura al arco con alambre continuo y protección gaseosa (GMAW).....	14
1.3. Campos afectados en el proceso de soldadura	14
1.3.1. Ciclo térmico	15
1.4. Esfuerzos residuales en el proceso de soldadura	17
1.5. Ensayos mecánicos para medir tensiones residuales	18
1.5.1 Método de perforación Hole Drilling por medio de galgas extensiométricas..	19
1.5.2. Método óptico por correlación digital de imágenes (DIC).....	19
2. PLANTEAMIENTO DE MODELO MATEMÁTICO PARA EL PROCESO DE SOLDADURA EN ESTRUCTURAS METÁLICAS.....	20
2.1. Conceptos básicos de transferencia de calor.....	21
2.2. Análisis térmico del proceso de soldadura GMAW	22
2.3. Análisis de ZAT en probetas	24
2.4. Modelo matemático de la generación de calor para el proceso de soldadura.....	27
2.5. Análisis estructural para el proceso de soldadura	32
3. ANÁLISIS POR MEDIO DE SIMULACIÓN DE ELEMENTOS FINITOS DE LAS ZAT EN EL PROCESO DE SOLDADURA EN LAS ESTRUCTURAS METÁLICAS.....	35
3.1. Modelación de elementos finitos para el proceso de soldadura GMAW.....	35
3.2. Metodología del método de elementos finitos (MEF)	37

3.2.1	Etapa de preprocesamiento.....	37
3.2.2.	Etapa del procesamiento.....	39
3.2.3.	Etapa de pos procesamiento.....	40
4.	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PROBETAS PARA VALIDACIÓN DE RESULTADOS	42
4.1.	Método de perforación de agujero (Hole Drilling)	44
4.1.1.	Norma ASTM E-837	45
4.1.2.	Actividades previas al método de taladrado	46
4.1.3.	Ubicación y puesta a punto de las galgas extensiométricas sobre las probetas.....	47
4.2.	Cálculo de esfuerzos residuales por medio de galgas extensiométricas sobre las probetas.....	51
4.3.	Método de correlación digital de imágenes (DIC).....	57
4.4.	Comparación de resultados para obtención de tensiones residuales.....	65
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	67
5.1.	Conclusiones.....	67
5.2.	Recomendaciones.....	68
BIBLIOGRAFÍA.....		70

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Componentes que se forman en el proceso de soldadura.....	13
Figura 2. Diagrama de proceso soldadura eléctrica GMAW	14
Figura 3. Distribución de temperaturas en una sección transversal en un proceso de soldadura.....	16
Figura 4. Curvas isotérmicas en una plancha sometida a soldadura a tope.....	16
Figura 5. Estado transicional del proceso de soldadura en la creación de esfuerzos residuales.....	18
Figura 6. Análisis de conducción de calor unidimensional.....	21
Figura 7. Análisis de conducción de calor tridimensional.....	23
Figura 8. Ubicación de coordenadas y punto R en probeta.....	26
Figura 9. Ubicación de distancias en el punto R en la probeta con disposición en T...	27
Figura 10. Modelo de la fuente de calor de doble elipsoide de Goldak.....	28
Figura 11. Parámetro operativo n vs λ_1' y λ_1''	30
Figura 12. Parámetro operativo n vs $2\psi_m$	31
Figura 13. Parámetro operativo n vs ξ	32
Figura 14. Junta en T para unión de elementos en una estructura metálica.....	36
Figura 15. Representación en 3D del armado de junta con disposición en T.....	38
Figura 16. Refinamiento de malla en zonas cercanas a la soldadura en la junta en T..	38
Figura 17. Calidad de malla para análisis de la junta en T.....	38
Figura 18. Transición de temperatura en el proceso de soldadura en la junta en T...	40
Figura 19. Deformaciones de tracción que se generan en la probeta.....	40
Figura 20. Tensiones residuales alrededor del punto R en la probeta.....	41
Figura 21. Tensiones residuales en base al espesor del material.....	41
Figura 22. Valores de tensiones residuales en probeta con disposición en T.....	41
Figura 23. Trazado de medidas en tubo cuadrado.....	42
Figura 24. Corte de material por medio de sierra de corte alternativa.....	43
Figura 25. Elaboración de puntos de fusión en juntas por medio de soldadora eléctrica SMAW.....	44
Figura 26. Elaboración de cordones en probetas por medio de Soldadura GMAW...	44
Figura 27. Geometría de agujeros y tensiones residuales dependientes de espesor, (a) Tensiones Uniformes, (b) Tensiones no uniformes.....	46
Figura 28. Roseta a utilizar para validación de resultados.....	46
Figura 29. Dimensiones a considerar para identificar el tipo de galga A.....	47
Figura 30. Dimensiones de galga extensiométrica (HBM Strain gauges).....	48
Figura 31. Dimensiones de probeta con disposición de armado en T, posición de galgas y distancias a considerar entre roseta – cordón de suelda para validación de ensayos.....	50
Figura 32. Instalación correcta de galga extensiométrica sobre probeta.....	50
Figura 33. Montaje y sujeción de probeta sobre mesa CNC.....	51

Figura 34. Designación de ejes de acuerdo a dirección de galgas para probetas con disposición 1 en T.....	52
Figura 35(a). Esfuerzos obtenidos durante el ensayo Hole Drilling - Ajuste por regresión polinomial disposición en T - Probeta 1.....	55
Figura 35(b). Esfuerzos obtenidos durante el ensayo Hole Drilling - Ajuste por regresión polinomial disposición en T - Probeta 2.....	55
Figura 36(a). Esfuerzos máximos – mínimos en probeta 1.....	56
Figura 36(b). Esfuerzos máximos – mínimos en probeta 2.....	56
Figura 37(a). Alivio de tensiones - Probeta 1.....	57
Figura 37(b). Alivio de tensiones - Probeta 2.....	57
Figura 38. Preparación de probetas en escala de grises.....	58
Figura 39. Sujeción de probeta sobre la mesa de CNC.....	58
Figura 40. Edición de imágenes secuenciales durante el ensayo Hole Drilling DIC... ..	58
Figura 41. Correlación de 31 imágenes del ensayo Hole Drilling.....	59
Figura 42. Mallado en imagen 31, finalización del ensayo Hole Drilling.....	60
Figura 43. Deformaciones unitarias en ϵ_x , utilizando Hole Drilling con DIC.....	60
Figura 44. Deformaciones unitarias en ϵ_y , utilizando Hole Drilling con DIC.....	61
Figura 45. Deformaciones unitarias en ϵ_{xy} , utilizando Hole Drilling con DIC.....	62
Figura 46. Comportamiento de deformaciones unitarias de acuerdo a la secuencia de imágenes capturadas del proceso Hole Drilling con DIC.....	62
Figura 47. Esfuerzo obtenidos durante el ensayo Hole drilling con DIC - Ajuste por regresión polinomial en probeta 3.....	63
Figura 48. Esfuerzos máximos - mínimos durante el ensayo Hole Drilling con DIC - Ajuste por regresión en probeta 3.....	64
Figura 49. Alivio de tensiones en probeta 3.....	64
Figura 50. Alivio de tensiones por diferentes metodologías para probeta con disposición en T.....	66

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Clasificación de acero de acuerdo al porcentaje de carbono.....	12
Tabla 2. Propiedades térmicas del acero estructural ASTM A36.....	25
Tabla 3. Composición química del acero ASTM A36.....	35
Tabla 4. Variación de las propiedades termo-mecánicas ASTM A36.....	36
Tabla 5. Condiciones de Soldadura eléctrica GMAW en construcción de probetas...	37
Tabla 6. Parámetros del modelo de Goldak.....	39
Tabla 7. Coeficiente de Convección.....	39
Tabla 8. Propiedades del Acero estructural ASTM A36.....	43
Tabla 9. Dimensiones y características de roseta a utilizar para validación de resultados.....	48
Tabla 10. Dimensiones de Roseta (Norma ASTM E-837).....	48
Tabla 11. Dimensiones, tolerancias y parámetros a considerar para ejecución de ensayo Hole Drilling (Galga conceptual 1/8 pulgada).....	49
Tabla 12. Valores de los coeficientes \bar{a} y \bar{b}	53

Dedicatoria

A toda mi familia, especialmente a mi esposa Tatiana y a mis dos hijos Matías y Santiago.

Martín.

PREFACIO

El estudio de este proyecto de investigación y desarrollo consiste en determinar el comportamiento del campo térmico – mecánico luego de ejecutarse el proceso de soldadura por arco eléctrico GMAW específicamente en un tipo de junta que se utiliza comúnmente en la construcción de estructuras metálicas.

En la elaboración del presente proyecto, principalmente se revisó los conceptos básicos del proceso de soldadura eléctrica y los efectos de las ZAT que se producen en el material base por el incremento elevado de temperatura que afecta a la microestructura y a las propiedades mecánicas del material. Luego se realizó el modelo matemático para realizar el análisis térmico y el análisis estructural para el proceso de soldadura GMAW.

Una vez obtenido los modelos matemáticos se procedió a modelar y simular la junta por medio de un software CAE, para determinar las tensiones residuales que se generan en el proceso de soldadura.

Finalmente se realiza la validación de resultados que se obtuvieron en la simulación tridimensional por medio del método de elementos finitos MEF a través del ensayo mecánico semidestructivo Hole Drilling y por el método de Correlación Digital de imágenes DIC.

PRÓLOGO

El presente proyecto de titulación se fundamenta principalmente en el planteamiento de un modelo matemático que determine el comportamiento térmico y estructural en las uniones de elementos de las estructuras metálicas cuando estas se someten al proceso de soldadura por arco eléctrico GMAW; mediante los modelos matemáticos es posible determinar las deformaciones elásticas, deformaciones plásticas y tensiones residuales que se originan en el material base por efecto de altas temperaturas en las ZAT.

La ejecución y desarrollo del presente estudio, se basó en las siguientes etapas:

- Conceptualización del proceso de soldadura eléctrica y tensiones residuales en ZAT del material base.
- Planteamiento de modelos matemáticos para el comportamiento térmico y comportamiento mecánico en juntas de las estructuras metálicas.
- Modelado tridimensional y simulación de proceso de soldadura a través de software MEF para análisis de deformaciones y esfuerzos residuales que se generan en materiales bases.
- Validación de resultados a través del método semidestructivo Hole Drilling y por el método de Correlación Digital de Imágenes DIC.
- Revisión, comprobación y comparación de resultados entre MEF vs Hole Drilling – DIC.
- Conclusiones y recomendaciones.

AGRADECIMIENTO

Principalmente agradezco a Dios por darme la fortaleza, y perseverancia por haber logrado culminar este objetivo profesional.

Seguido agradezco a Marco Amaya por las valiosas contribuciones y recomendaciones que se encuentran plasmadas en el presente proyecto.

Finalmente agradezco a mi hermano Paúl por la ayuda y colaboración incondicional en todas las etapas de mi vida.

Martín.

CAPITULO 1

ESTADO DEL ARTE DE LA GENERACIÓN Y PROPAGACIÓN DE TENSIONES RESIDUALES EN EL PROCESO DE SOLDADURA.

1.1 ANTECEDENTES.

En la fabricación de estructuras metálicas se utilizan diversos procesos de soldadura que consiste en fusionar dos o más materiales por medio del calentamiento a una temperatura requerida para obtener un solo elemento (Bullon W., 2010); este tipo de manufactura tiende a cumplir una especificación, dibujo o cualquier otro requisito del diseño de construcción

Las superficies de contacto y su entorno más próximo donde se ejecuta este proceso sufre daños irreversibles principalmente térmicos que modifican la microestructura interna del material y este a la vez afecta a las propiedades mecánicas del mismo (Osmar G., 2016). La soldadura genera una zona de afectación térmica en el material donde se podría evidenciar la generación de tensiones residuales internas, tanto esfuerzos de tracción como de compresión; si estas tensiones se encuentran concentradas en áreas críticas se producirá una dispersión a corto plazo de fisuras, agrietamientos y colapsos en el conjunto estructural (Masubuchi K., 1980).

En el estudio planteado por (Bullon W., 2010) indica que en el proceso de soldadura ocurren diferentes fenómenos físicos como consecuencia de la interacción en los campos térmicos que generan deformaciones mecánicas y alteraciones al estado microestructural. El campo de temperatura es función de muchos parámetros de soldadura, tales como: potencia de arco, velocidad de soldadura, secuencia de soldadura y condiciones ambientales. La formación de esfuerzos residuales y distorsiones en la soldadura depende de factores interrelacionados tales como: campo térmico, propiedades del material, condiciones de borde, tipo de soldadura y condiciones de soldadura.

En el estudio elaborado por (Tufaro L., Burgueño A., Svoboda H., 2012), se menciona que la formación de tensiones residuales se da debido a la presencia de campos no uniformes de deformaciones no elásticas, como las deformaciones plásticas y térmicas al momento de realizarse la soldadura, y estas tensiones se encuentran vinculadas a los

parámetros del proceso utilizados a través del campo térmico que se genera sobre el material. Para analizar las tensiones residuales internas que se generan en los materiales féreos se recurre a realizar un ensayo mecánico semidestructivo por seccionamiento (mecanizado en el cordón de suelda) junto con galgas extensiométricas; para este caso se consideran diversas variables de procedimiento, como por ejemplo velocidad de avance, velocidad de la herramienta a mecanizar el cordón de soldadura, etc. Los resultados que se obtienen en las tensiones residuales se incrementan cuando la velocidad de avance de la herramienta de corte es alta; adicional acotar que las máximas tensiones residuales longitudinales se encuentran en el centro del cordón, ya que se relacionan con aspectos del ciclo térmico generado en la soldadura (Tufaro L., et al, 2012).

En el artículo presentado por (Araque O., Arzola N., 2013) se indica que a razón de varios factores externos del proceso de soldadura se crean distintos tipos de defectos en las juntas de los materiales a fusionar, en algunos casos estos imperfectos se dan debido a factores humanos que afectan en la calidad del depósito soldado y posteriormente conducen a la aparición de concentraciones de esfuerzos altos que aceleran el crecimiento de grietas por fatiga. El estudio de este artículo también manifiesta que los métodos de análisis numérico, especialmente el de elementos finitos, ha contribuido de gran manera al estudio, comprensión de la vida residual y la integridad estructural de uniones soldadas con presencia de un campo de esfuerzos residuales bajo cargas cíclicas, presencia de defectos y concentradores de esfuerzos geométricos en los materiales fusionados; además mencionan una gran variedad de métodos de inspección de uniones soldadas, entre ellos recomiendan el de ultrasonido por garantizar resultados de alta credibilidad.

En el estudio elaborado (San Millan F., Armendariz I., Garcia J., Salamanca A., 2008) indican que a través del estudio de la mecánica de fractura junto con el estudio de métodos de elementos finitos a través de un software CAE (Ingeniería asistida por computador), se puede analizar el comportamiento de los esfuerzos residuales en las juntas soldadas, además se puede evaluar la presencia de grietas, crecimiento de cargas estáticas o cíclicas y el tamaño crítico de dichos defectos en las estructuras.

Las tensiones residuales y sus distorsiones se crean por el incremento de temperatura causado por la soldadura y sus parámetros de proceso requeridos para fusionar elementos en las estructuras metálicas; es por eso que en el presente trabajo se analizará el efecto y comportamiento térmico - mecánico en juntas soldadas de unas probetas construidas en diferentes disposiciones a través de métodos de elementos finitos y posteriormente se efectuará la validación por medio de un ensayo mecánico semidestructivos.

1.2 PROCESO DE SOLDADURA.

El proceso de soldadura es la unión de dos o más elementos a través de un incremento considerable de temperatura en los puntos de contacto o de fusión común entre los materiales, considerando la aplicación o no de presión y el uso de material de aporte en la soldadura (Meléndez A., Quelal V., 2009).

1.2.1 EL ACERO.

Se considera acero al material que está compuesto de dos o más componentes químicos en el que el hierro (Fe) es el predominante en la aleación Fe-C; se considera que es Acero en los materiales en que el contenido de Carbono (C) que está entre 0.08% hasta 2.10 % (Leyensetter A., 1974).

En el entorno comercial el acero se clasifica en tres grupos Aceros bajo al Carbono (0.08 a 0.25%C), Aceros medios al carbono (0.26 a 0.60%C), y Aceros altos al carbono (0.61 a 2.10%C).

1.2.2 SOLDABILIDAD EN EL ACERO.

De acuerdo a (Ramos R., 2013), la soldabilidad es el conjunto de propiedades que tiene un material en permitirse fusionar con demás elementos que presentan características suficientes de continuidad metalúrgica; es decir la facilidad que tiene un material a ser soldado y de la tenacidad que tenga la unión soldada final.

La propiedad de soldabilidad en el acero depende del porcentaje de carbono que contenga en su composición química, es decir los aceros con menor porcentaje de carbono presentan mejores propiedades de soldabilidad (Oxgasa, 2000).

En la tabla 1 se observa la clasificación del acero de acuerdo al contenido de carbono, el uso típico y que tan susceptible es a la soldabilidad.

Tabla 1. Clasificación de acero de acuerdo al porcentaje de carbono.

Descripción común	Contenido de C.	Uso	Soldabilidad
Hierro dulce o lingote	0.003% máx.	Esmaltado, galvanizado y estampado	Excelente
Acero de bajo contenido de C.	0.15% máx.	Electrodos para soldadura, chapas, perfiles, flejes.	Excelente
Acero dulce	0.15 – 0.25 %	Perfiles estructurales, chapas y barras	Buena

Acero de mediano contenido de C.	0.26 -0.60 %	Piezas de maquinas	Regular (Pre calentamiento y frecuente tratamiento térmico posterior a la soldadura)
Acero de alto contenido de C.	0.60 – 2.10%	Resortes, matrices, moldes	Mala (Difícil de soldar sin previo calentamiento y adecuado T.T posterior)

Fuente: "Tecnología de los oficios metalúrgicos", Leyensetter A.

1.2.3 ELEMENTOS QUE SE FORMAN EN EL PROCESO DE SOLDADURA.

En la figura 1 se observa de forma didáctica el proceso de soldadura, donde se indica los elementos que se forman y que se indican a continuación:

- **Metal base:** Es el material en el que se efectúa la fusión con otro elemento y forman uno solo; en el cuerpo unificado existe una superficie afectada por el incremento de temperatura que genera la soldadura, y una superficie no afectada que las propiedades mecánicas siguen siendo las iniciales (Oxgasa, 2000).
- **Material de aporte de soldadura:** Es el metal fundido, sus propiedades químicas y mecánicas son las correspondientes a la fusión del material de aporte suministrado (Leyensetter A., 1974).
- **Zona afectada térmicamente (ZAT):** Es la zona del material base donde sufren transformaciones microestructurales, además se alteran las propiedades mecánicas y se producen la inserción de tensiones residuales en el elemento (Gorka R., 2014).

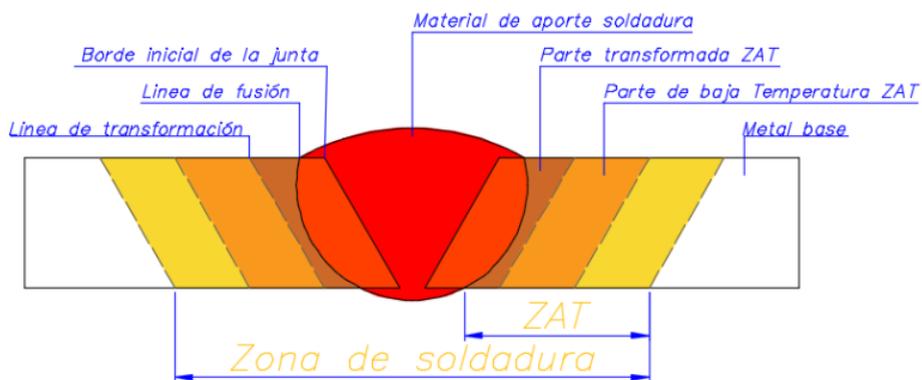


Figura 1. Componentes que se forman en el proceso de soldadura.

Fuente: (Leyensetter A., 1974).

1.2.4. PROCESO DE SOLDADURA AL ARCO CON ALAMBRE CONTINUO Y PROTECCIÓN GASEOSA (GMAW).

La AWS (American Welding Society) define como un proceso de soldadura al arco entre un electrodo metálico de aporte continuo y la pieza de trabajo. La protección de arco se obtiene mediante un gas suministrado en forma externa, donde se protege al metal líquido de la contaminación atmosférica, ayudando a estabilizar el arco (Figura 2).

Generalmente para la elaboración de estructuras metálicas se utiliza como gas de protección al proceso Dióxido de carbono (CO_2) básicamente por el costo económico en comparación con otros gases inertes.

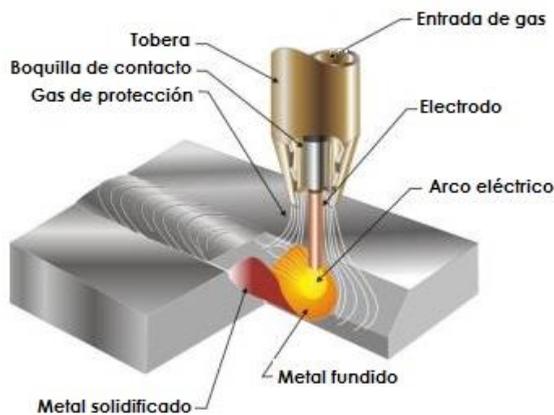


Figura 2. Diagrama de proceso soldadura eléctrica GMAW.

Fuente: (Marin A., 2016).

1.3 CAMPOS AFECTADOS EN EL PROCESO DE SOLDADURA.

El proceso de soldadura afecta directamente a la superficie de contacto en los materiales bases por efecto de altas temperaturas, a estas áreas se les denomina zonas de afectación térmica ZAT; los campos afectados directamente en las ZAT del material son: el campo termodinámico, que este a la vez afecta al campo mecánico y metalográfico del mismo (Bullon W., Acosta J., Franco R., Valverde G., 2007).

Cuando se genera el incremento de temperatura, el campo térmico actúa de forma transicional en la pieza ocasionando una variabilidad de temperaturas poco uniformes en las superficies del material; el campo térmico altera directamente al campo metalográfico ya que la microestructura interna del acero se modifica al sobrepasar la temperatura crítica (723°C) del acero, y este último campo concatena a la modificación

de las propiedades mecánicas por originarse deformaciones elásticas y plásticas internas en el material.

1.3.1. CICLO TÉRMICO.

En el estudio realizado por (Bullon W., et al, 2007) indica que durante el proceso de soldadura ocurren variaciones en función del tiempo de la temperatura (calentamientos y enfriamientos que se generan en el proceso de soldadura) debido a la aplicación de calor al material para poder unirlos por soldadura, ya que el calor que es aplicado localmente a la zona de unión se transmite rápidamente por el metal aumentando su temperatura. Esto origina que, debido al calentamiento y posterior enfriamiento, el metal sufra transformaciones metalúrgicas que afectarán su microestructura y ésta, a su vez, sus propiedades mecánicas, además de cambios dimensionales en la pieza que provocarán distorsiones y esfuerzos residuales.

En la figura 3 se observa el diagrama temperatura – tiempo que indica el efecto transicional correspondiente a la soldadura.

En la curva A se indica la variación de temperatura en diferentes secciones del material considerando el tiempo de 1 segundo; se observa que las regiones más cercanas al punto de fusión de soldadura son las más afectadas térmicamente y por ende son más propensas a la creación de tensiones internas (Bullon W., 2010).

En la curva B se observa la transición de temperatura en un tiempo de 2 segundos; para este caso se evidencia que la superficie donde se generó el cordón disminuyó la temperatura ya que disipó el calor a sus regiones adyacentes del material base (Bullon W., 2010).

Finalmente en la curva C se observa la transición de temperatura en un tiempo de 3 segundos; en este caso por principios de transferencia de calor la temperatura del material va homogenizando desde el cordón de suelda al resto de la pieza (Bullon W., 2010).

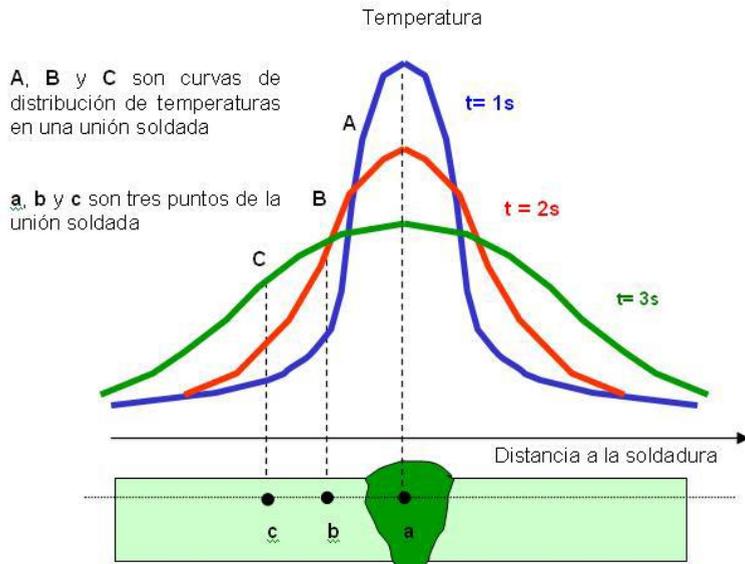


Figura 3. Distribución de temperaturas en una sección transversal en un proceso de soldadura
Fuente: (Fosca C., 2007).

En la figura 4 se observa el comportamiento transicional para el proceso de soldadura eléctrica GMAW, en el que se detalla las curvas isotérmicas generadas en el material base donde se utilizaron termocuplas (Fosca C., 2007).

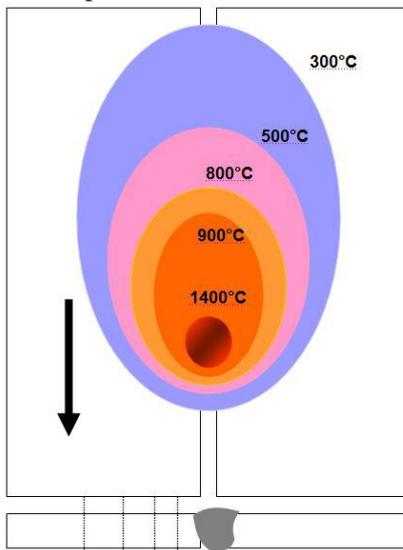


Figura 4. Curvas isotérmicas en una plancha sometida a soldadura a tope
Fuente: (Fosca C., 2007).

1.4. ESFUERZOS RESIDUALES EN EL PROCESO DE SOLDADURA.

Los esfuerzos residuales son tensiones internas que permanecen en el material en ausencia de cargas externas; estas se originan debido a la existencia de las deformaciones plásticas no uniformes en diferentes puntos del material; los procesos termo mecánicos son los principales causantes en la generación y propagación de este tipo de tensiones en los materiales (Flor A., 2015).

En la soldadura se incrementa bruscamente la temperatura en las de áreas de fusión dentro del metal base ocasionando expansiones y contracciones plásticas en diferentes puntos del mismo ya que el área de soldadura se calienta abruptamente en comparación con la zona circundante; estos fenómenos físicos originan la creación de tensiones residuales en las superficies ZAT, como consecuencia del calentamiento local del material se dan transformaciones microestructurales que afectan directamente al y mecánico del elemento sometido a soldadura (Araque O., Arzola N., 2013).

En la figura 5 se observa los diagramas transicionales temperatura – esfuerzo en diferentes secciones de un cordón de suelda considerando la dilatación y contracción sobre el metal base.

En la sección A-A el material se encuentra en condiciones iniciales, es por eso que en el diagrama de tensiones (σ), el esfuerzo esta con un valor 0 básicamente porque la temperatura inicial (T_0) se encuentra a temperatura del entorno o ambiente (Garcia J., 2006).

Para el diagrama de temperatura de la sección B-B, se inicia la elaboración del cordón de soldadura, en el que se va incrementando la temperatura de forma abrupta, provocando una dilación de partículas en el material que ocasionan en las superficies de contacto de la soldadura una generación de esfuerzos residuales de compresión y en las zonas adyacentes que están a menor temperatura se originan tensiones residuales de tracción (Garcia J., 2006).

En el diagrama de temperatura de la sección C-C, por efecto de la conductividad térmica en el metal base se va disipando la temperatura al resto del elemento; esto se evidencia en el diagrama de tensiones que al enfriarse las ZAT en el metal base se vayan introduciendo tensiones residuales de tracción en la zona más cercana al cordón de soldadura y en las zonas alejadas del cordón aparezcan tensiones residuales de compresión (Garcia J., 2006).

Finalmente, en el diagrama de temperatura de la sección D-D se observa que el calor que se encontraba en el metal base se disipo totalmente, es decir el material base regresa a la temperatura ambiente del entorno; en el diagrama de esfuerzos se observa que las

tensiones llegaron a su equilibrio en diferentes puntos y las tensiones residuales de tracción que son las más críticas quedan concentradas en las superficies más cercanas al cordón de soldadura (García J., 2006).

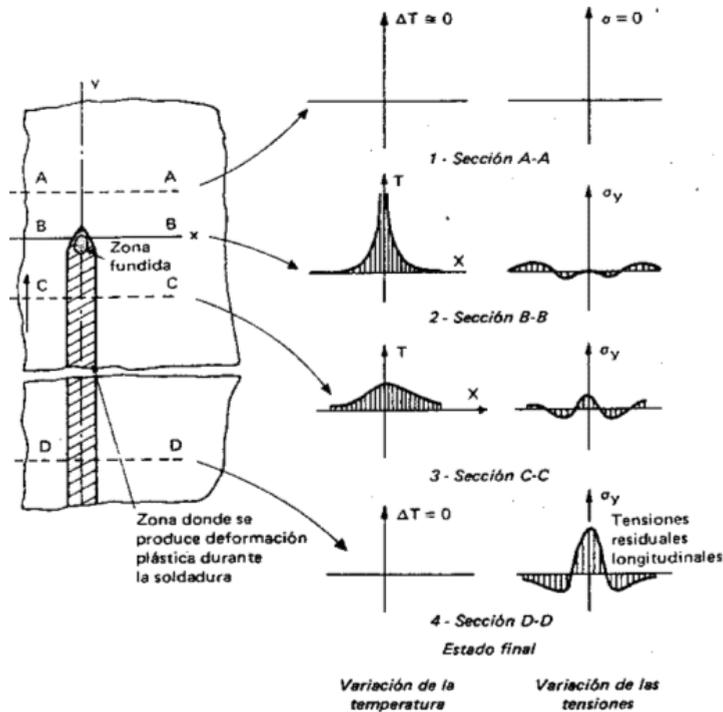


Figura 5. Estado transicional del proceso de soldadura en la creación de esfuerzos residuales
Fuente: Norma A.W.S 1976

1.5. ENSAYOS MECÁNICOS PARA MEDIR TENSIONES RESIDUALES.

Existen diversos métodos para medir las tensiones residuales en los materiales, entre estos existe ensayos destructivos, no destructivos y semi destructivos; entre los factores de mayor importancia a considerar para selección del método adecuado es saber si la pieza que se va a analizar va a continuar con su funcionalidad de trabajo; en el caso que el elemento tenga que volver a su operatividad, se optaría por un ensayo no destructivo, ya que no provocarían ningún daño irreparable al elemento (Flor A., 2015).

Otro de los factores importantes a considerar, es conocer el grado de accesibilidad que existe entre las superficies deseadas a medir y el equipo requerido para realizar la medición de tensiones residuales (Flor A., 2015).

Para ejecutar este ensayo es necesario saber si se cuenta con los equipos, suministros e insumos necesarios que recomienda la norma ASTM E-837.

El presente trabajo no tiene planteado como objetivo detallar cada uno de los diferentes tipos de métodos que se utilizan para medir las tensiones residuales; en este caso se detallara el método de perforación de agujero por medio de galgas extensiométricas; ya que anteriormente se ha realizado una investigación de los distintos métodos para obtener el valor de las tensiones residuales en el material a analizar.

1.5.1. MÉTODO DE PERFORACIÓN HOLE DRILLING POR MEDIO DE GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS.

Este método consiste principalmente en fijar una roseta o juego de galgas alrededor de un punto específico en un material isotrópico linealmente elástico. Seguido, se realiza el taladrado con una broca igual o menor al espesor del elemento con el fin de desprender material en diversas direcciones generando un alivio de tensiones y obtener medidas que permitirá calcular el valor de los esfuerzos que tenía la pieza antes del perforado a través de una serie de ecuaciones (ASTM E-837).

Este tipo de ensayo mecánico está considerado como semidestructivo básicamente por no causar daños significativos en el elemento. Este ensayo está sujeto bajo la Norma ASTM E387 que considera varios factores antes, durante y después del proceso con el fin de garantizar resultados verídicos.

1.5.2. MÉTODO ÓPTICO POR CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES (DIC).

El método de Correlación Digital de Imágenes (DIC) es una técnica óptica de campo completo que permite a partir de fotografías tomadas durante el ensayo evaluar los desplazamientos y deformaciones que se originan durante la operación de manufactura (Sutton M.A., Yan J.H., Tiwari V., H., 2008).

Los resultados experimentales del método DIC se comparan con los resultados obtenidos del ensayo semidestructivo Hole Drilling y con los resultados numéricos obtenidos a través de un programa que analice por medio del Método de elementos finitos.

CAPITULO 2

PLANTEAMIENTO DE MODELO MATEMÁTICO PARA EL PROCESO DE SOLDADURA EN ESTRUCTURAS METÁLICAS.

2.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR.

El calor está definido como la forma de energía que se transfiere entre dos sistemas o entre un sistema y sus alrededores debido a una diferencia de temperatura (Yunus A., Cengel, 2009); es decir el calor es un tipo de energía que se transfiere desde superficies que se encuentran a elevadas temperatura hasta superficies de menor temperatura.

La transferencia de calor se propaga de tres formas distintas en el entorno: conducción, convección y radiación.

La conducción es la transmisión de energía desde las moléculas más calientes a las moléculas adyacentes (Lahoz M.)

La convección es el modo de transmisión de calor entre un elemento sólido y líquido o gas fluido que está en movimiento, y que se enfoca en los efectos combinados de conducción y del movimiento del fluido (Yunus A., Cengel, 2009).

La transferencia de calor por radiación es la propagación de energía electromagnética en forma de ondas generando variaciones en las moléculas de los elementos que están expuestos (Holman J., 1998).

2.2 ANÁLISIS TÉRMICO DEL PROCESO DE SOLDADURA GMAW.

En el proceso de soldadura se va a generar transferencia de energía por conducción desde el punto de contacto del electrodo con el material hasta las superficies adyacentes; esto quiere decir que el flujo de calor por unidad de área es proporcional al gradiente normal de temperatura (Holman J., 1998).

$$\frac{q}{A} \sim \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

Introduciendo la constante de proporcionalidad del material se tiene:

$$Q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2)$$

q = Energía que ingresa por conducción o flujo de calor $\left[\frac{W}{m^2}\right]$.

k = Conductividad térmica $\left[\frac{W}{m^{\circ}C}\right]$.

A = Área transversal $[m^2]$.

$\frac{\partial T}{\partial x}$ = Gradiente de Temperatura en dirección de la temperatura $[^{\circ}C]$.

En el presente estudio se va a analizar tensiones residuales que se producen en probetas de acero ASTM A-36 luego de someterse a la soldadura; este proceso es transitorio, eso quiere decir que la temperatura del cordón de soldadura varía en relación al tiempo y donde se generan fuentes de calor en el interior del cuerpo. Con estas condiciones del proceso se debe cumplir el balance energético, considerando un elemento de espesor dx (Holman J., 1998).

En la figura 6 se observa el sistema unidimensional para analizar el balance energético en un elemento que se detalla a continuación:

Energía que ingresa por conducción + calor generado en el interior del elemento = Variación de energía interna + energía que sale por conducción (Holman J., 1998).

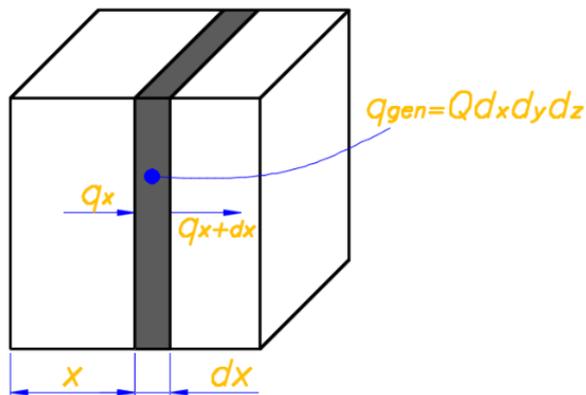


Figura 6. Análisis de conducción de calor unidimensional
Fuente: (Holman J., 1998)

Energía que ingresa por conducción: $q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3)$

$$\text{Calor generado en el interior del elemento: } q_{gen} = QAdx \quad (4)$$

$$\text{Variación de energía interna} = \rho c A \frac{\partial T}{\partial t} dx \quad (5)$$

Energía que sale por conducción (lado contrario del ingreso):

$$q_{x+dx} = -kA \frac{\partial T}{\partial x} = -A \left[k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} dx \right) \right] \quad (6)$$

Q = Energía generada por unidad de volumen $\left[\frac{W}{m^3} \right]$.

c = Calor específico del material $\left[\frac{J}{kg^{\circ}C} \right]$.

ρ = Densidad $\left[\frac{Kg}{m^3} \right]$.

Al combinar las relaciones se tiene:

$$-kA \frac{\partial T}{\partial x} + QAdx = \rho c A \frac{\partial T}{\partial t} dx - A \left[k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} dx \right) \right] \quad (7)$$

Al simplificar se obtiene la ecuación de la conducción de calor unidimensional:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (8)$$

Ahora se considera el calor que ingresa y que se disipa por conducción en el elemento para las tres direcciones en coordenadas rectangulares; se obtiene la ecuación general de la conducción de calor tridimensional (Figura 7).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (9)$$

$$\nabla^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \quad (10)$$

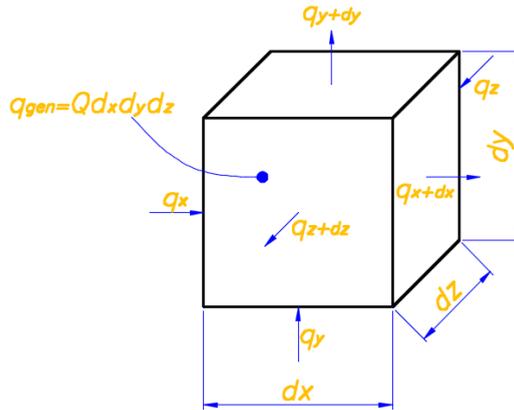


Figura 7. Análisis de conducción de calor tridimensional
Fuente: (Holman J., 1998)

Luego se considera el gradiente de temperatura con su doble integral y se obtiene:

$$kT(\nabla^2 x + \nabla^2 y + \nabla^2 z) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (11)$$

De forma general:

$$Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} - k \cdot \nabla^2 T \quad (12)$$

Para materiales isotrópicos se debe considerar la ley de transferencia de calor de Fourier, que define una relación de entre el flujo de calor q y el campo gradiente de temperatura ∇T (Hernandez I., Perez J., Aguilera E., 2013)

$$q = -k \cdot \nabla T \quad (13)$$

$$\nabla T = \text{Gradiente de temperatura } [^\circ\text{C}] \quad (14)$$

Reemplazando se tiene:

$$Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot q \quad (15)$$

$$Q(x, y, z, t) = \rho c \cdot \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} + \nabla(x, y, z, t) \cdot q \quad (16)$$

$\nabla(x, y, z, t) \cdot q =$ Gradiente de flujo de calor $[W]$

Por medio de la ecuación (16) se puede obtener la distribución de temperaturas en todos los puntos del cordón de soldadura.

Durante y después del proceso de soldadura GMAW se producen pérdidas de calor al entorno por convección y radiación a través de las siguientes ecuaciones (Pozo J., Garcia J., Ramos F., 2009):

$$q_{conv} = h(T - T_0) \quad (17)$$

$$q_{rad} = eB(T^4 - T_0^4) \quad (18)$$

Donde:

q_{conv} = Calor transferido por convección $\left[\frac{W}{m^2}\right]$.

h = Coeficiente de transferencia de calor por convección $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$.

T_0 = Temperatura del ambiente o del entorno $[^\circ K]$.

T = Temperatura superficial de la pieza soldada $[^\circ K]$.

q_{rad} = Calor transferido por radiación $\left[\frac{W}{m^2}\right]$.

e = Emisividad de la superficie del cuerpo, se encuentra en el rango de $0 \leq e \leq 1$.

B = Constante de Stefan-Boltzmann $5.67 \times 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K^4}\right]$.

2.3 ANÁLISIS DE ZAT EN PROBETAS.

El proceso de soldadura por arco eléctrico es una operación focalizada en una región determinada al momento de efectuarse la fusión entre el material de aporte y el material base se produce una ZAT cercana al punto de fusión (Garcia J., 2006). En la figura 1 del capítulo 1, se detalla el comportamiento del material por mencionada manufactura.

Para analizar la ZAT es necesario tener presente que la difusividad térmica (α_{dit}) del material cuando tiene un valor elevado el calor esta se disipara con mayor rapidez por todo el material, y por tanto la velocidad de enfriamiento será a menor tiempo provocando que la ZAT en el metal base tenga una menor superficie; en cambio cuando la difusividad térmica del material α_{dit} tiene un valor pequeño, la disipación de calor por todo el material es lenta generando una mayor ZAT en la superficie del material (Lopez G., Montenegro B., 2008).

Es importante considerar que el enfriamiento en el material debe ser de forma natural, ya que al acelerar este factor se incitara que la ZAT se torne más crítica en el material.

Para conocer la velocidad de enfriamiento que tienen las probetas se utiliza la siguiente ecuación:

$$\alpha_{dit} = \frac{k}{c_p} \quad (19)$$

α_{dit} = Difusividad térmica $\left[\frac{m^2}{s}\right]$.

k = Conductividad térmica $\left[\frac{J}{m^{\circ}K}\right]$.

c_p = Capacidad volumétrica $\left[\frac{J}{m^3K}\right]$.

En la tabla 2 se observa las propiedades térmicas del material acero ASTM A36 en relación a la temperatura de fusión de 1527°C (1800°C)

Tabla 2. Propiedades térmicas del acero estructural ASTM A36.

C_p (J/m ³ K)	α_{dt} (m ² /s)	k (J/m·K)	Temperatura de fusión (°K)
4,5 X 10 ⁶	9,1 X 10 ⁻⁶	41	1800

Fuente.: “Análisis y resultados del comportamiento de los esfuerzos residuales y las deformaciones en juntas soldadas a tope de acero A36, aplicando el método SMAW”, Meléndez A., Quelal V.

De acuerdo a (Meléndez A., Quelal V., 2009) los diferentes factores del proceso de soldadura que determinan la distribución de temperatura y velocidad de enfriamiento en el entorno y superficie del cordón son:

- Aporte de energía.
- Diámetro del electrodo.
- Temperatura inicial o de precalentamiento T_0 .
- Geometría de la junta.
- Propiedades térmicas del material.
- Condiciones particulares de enfriamiento.

Para calcular la temperatura o distribución de temperaturas a cierta distancia del punto de fusión donde se produce el cordón de soldadura GMAW se utiliza la ecuación para placas finas, considerando que el espesor de las probetas tiene un espesor mínimo de 2mm (Meléndez A., Quelal V., 2009).

$$T - T_0 = \left[\frac{q_{ef}}{2\pi kh} \cdot e^{\left[\frac{-v_w(\xi)}{2\alpha_{dit}}\right]} \cdot K_0 \left[\frac{v_w(R)}{2\alpha_{dit}} \right] \right] \quad (20)$$

Donde:

T = Temperatura de proceso [°K].

T_0 = Temperatura ambiente [°K].

α_{dit} = Difusividad térmica $\left[\frac{m^2}{s}\right]$.

k = Conductividad térmica $\left[\frac{J}{m^{\circ}K}\right]$.

q_{ef} = Potencia efectiva – Calor de entrada $[W]$.

v_w = Velocidad de soldeo $\left[\frac{m}{s}\right]$.

K_0 = Función de Bessel de primera semejanza de orden cero [3.80].

h = Espesor de la placa $[m]$.

$R = (x^2 + y^2 + \xi^2)^{1/2}$; Distancia de la fuente de calor a un cierto punto fijo $[m]$.

ξ = Distancia de la fuente de calor en coordenada z $[m]$.

En la figura 8 se observa la probeta para determinar la temperatura en el punto R.

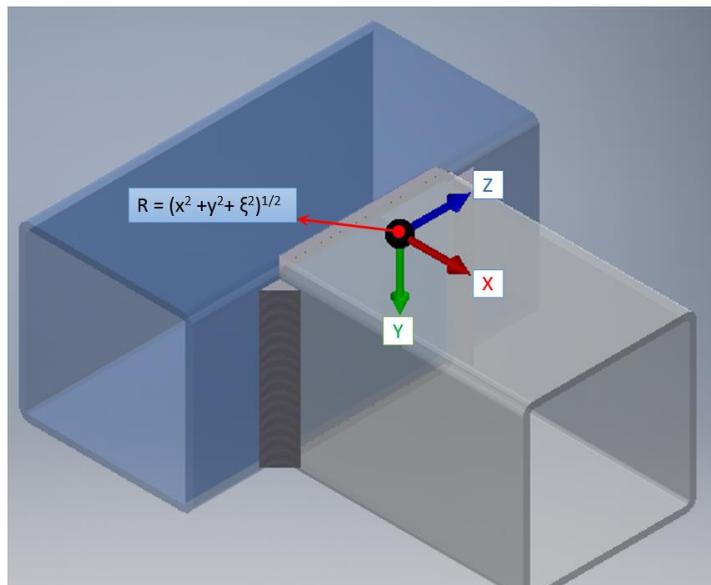


Figura 8. Ubicación de coordenadas y punto R en probeta.

Fuente: Autor.

Para calcular la temperatura en el punto específico en la probeta con disposición de armado en T (Figura 9), se utiliza las siguientes ecuaciones:

$$\xi = z - v_w \cdot t' \quad (21)$$

ξ = Distancia de la fuente de calor en coordenada z $[m]$.

t' = Tiempo definido en el que se calcula la temperatura $[seg]$.

z = Distancia del punto de temperatura a calcular correspondiente a la coordenada en el eje z $[m]$.

v_w = Velocidad de soldeo $\left[\frac{m}{s}\right]$.

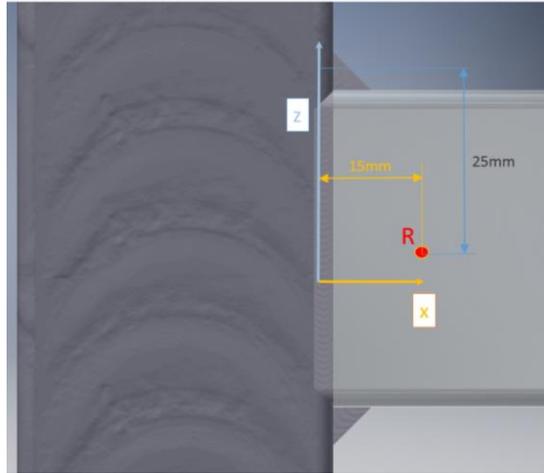


Figura 9. Ubicación de distancias en el punto R en la probeta con disposición en T.
Fuente: Autor.

Para el proceso de soldadura eléctrica GMAW es necesario calcular el calor de entrada q_{ef} que se genera desde la fuente de la maquina hasta el material base, considerando las siguientes variables:

$$q_{ef} = \eta \cdot V \cdot I \quad (22)$$

q_{ef} = Potencia efectiva – Calor de entrada [W].

η = Eficiencia de proceso – 0.80 para GMAW [Adimensional].

V = Voltaje de corriente [V].

I = Intensidad de corriente [A].

2.4 MODELO MATEMÁTICO DE LA GENERACIÓN DE CALOR PARA EL PROCESO DE SOLDADURA.

El proceso de soldadura eléctrica consiste principalmente en generar altas temperaturas entre el material base y el material de aporte para que se genere una fusión óptima entre los elementos mencionados (Osmar G., 2016); teniendo presente este concepto, se puede decir que el campo térmico al que se somete la pieza influye directamente sobre el campo mecánico estructural y metalográfico del material base. Es por eso se debe desarrollar un modelado matemático muy próximo a la realidad considerando los diversos factores que involucran en el proceso y de tal forma poder calcular los campos de temperatura que actúan de manera transitoria al proceso de soldadura GMAW (Bullon W., et al, 2007).

En el presente estudio se va a considerar el modelo de fuente de calor de doble elipsoide de Goldak ya que por medio del mismo se han obtenido resultados muy aproximados a la realidad (Osmar G., 2016).

El modelo de Goldak se utiliza para simulación tridimensional específicamente para soldadura, el flujo de calor de entrada está dividido en dos secciones, uno frontal y otro posterior al centro del arco; es importante considerar que este modelo debe partir de una coordenada local (0,0,0) que se imponga en la pieza con tiempo inicial igual a 0; y el desplazamiento que se genera para ejecución del cordón de soldadura está en función del eje Z con dirección positiva (Farfan N., 2010).

En la figura 10 se observa el modelo de Goldak que está conformado por un elipsoide en cada cuadrante, un elipsoide para la parte frontal y otro elipsoide para la parte posterior del arco.

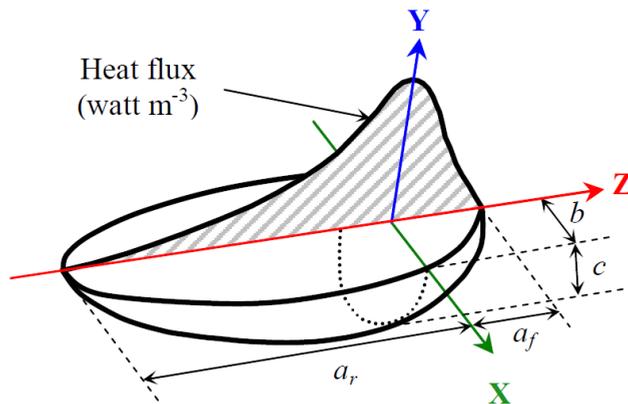


Figura 10. Modelo de la fuente de calor de doble elipsoide de Goldak.
Fuente: (Osmar G., 2016).

Para distribución de puntos que se encuentran dentro del elipsoide frontal, la ecuación de la densidad de calor por el modelo de Goldak es (Pozo J., Quintero P., Cruz A., 2011):

$$Q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3} \cdot n \cdot q_{ef} \cdot f_f}{a_f \cdot b \cdot c \cdot \pi \sqrt{\pi}} \cdot e^{-3 \left(\frac{x^2}{b^2} + \frac{y^2}{c^2} + \frac{z^2}{a_f^2} \right)} \quad (23)$$

Y para la zona trasera es la siguiente ecuación:

$$Q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3} \cdot n \cdot q_{ef} \cdot f_r}{a_r \cdot b \cdot c \cdot \pi \sqrt{\pi}} \cdot e^{-3 \left(\frac{x^2}{b^2} + \frac{y^2}{c^2} + \frac{z^2}{a_r^2} \right)} \quad (24)$$

Donde:

$Q(x, y, z)$ = Densidad de potencia térmica $\left[\frac{W}{m^3} \right]$.

a_r, a_f, b, c = Parámetros de forma del elipsoide [m].

q_{ef} = Calor de entrada o aporte [W].

f_f = Coeficiente adimensional de aporte de calor depositado en la zona frontal.

f_r = Coeficiente adimensional de aporte de calor depositado en la zona trasera.

x, y, z = Coordenadas sobre cada eje del punto de interés dentro del elipsoide respecto a su centro [m].

n = Parámetro adimensional.

Para determinar los valores de los coeficientes f_f y f_r se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$f_f = \frac{2a_f}{a_f + a_r} \quad (25)$$

$$f_r = \frac{2a_r}{a_f + a_r} \quad (26)$$

f_f = Coeficiente adimensional de aporte de calor depositado en la zona frontal.

f_r = Coeficiente adimensional de aporte de calor depositado en la zona trasera.

a_r, a_f, b, c = Parámetros de forma del elipsoide [m].

Es necesario que se cumpla la siguiente relación:

$$f_f + f_r = 2 \quad (27)$$

Para el cálculo del parámetro n , se utiliza la ecuación:

$$n = \frac{q_{ef} \cdot v_w}{4\pi \cdot \alpha_{dit}^2 \cdot c_p \cdot (T_m - T_0)} \quad (28)$$

n = Parámetro adimensional

q_{ef} = Calor de entrada o aporte $\left[\frac{J}{s}\right]$.

α_{dit} = Difusividad térmica $\left[\frac{m^2}{s}\right]$.

v_w = Velocidad de soldeo $\left[\frac{m}{s}\right]$.

C_p = Capacidad volumétrica $\left[\frac{J}{m^3 \cdot K}\right]$.

T_m = Temperatura de fusión del acero [$^{\circ}K$].

T_0 = Temperatura inicial del acero [$^{\circ}K$].

Para hallar los valores de los parámetros de forma del elipsoide de manera analítica (a_r, a_f, b, c), principalmente se debe obtener el valor del coeficiente n , y luego hay que dirigirse a la figura 11 para hallar los valores de los coeficientes de λ_1' y λ_1'' , y

posteriormente se calcula los valores de a_r y de a_f a través de las ecuaciones (Osmar G., 2016):

$$a_f = \frac{2 \cdot \lambda_1 \cdot \alpha_{dit}}{v_w} \quad (29)$$

$$a_r = \frac{2 \cdot \lambda_1'' \cdot \alpha_{dit}}{v_w} \quad (30)$$

a_r, a_f = Parámetros de forma del elipsoide [m].

v_w = Velocidad de soldeo $\left[\frac{m}{s}\right]$.

α_{dit} = Difusividad térmica $\left[\frac{m^2}{s}\right]$.

λ_1' y λ_1'' = Coeficientes adimensionales en relación del parámetro operativo n .

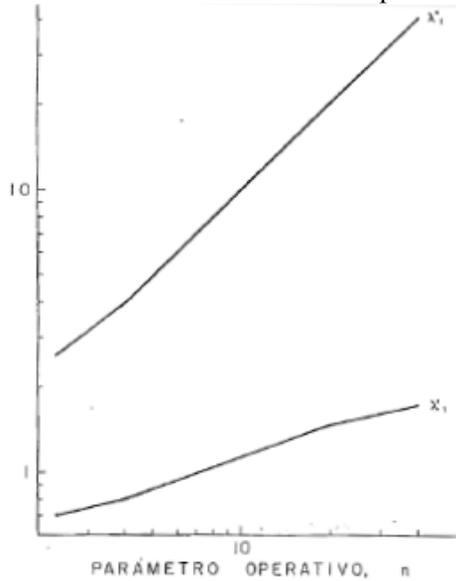


Figura 11. Parámetro operativo n vs λ_1' y λ_1''

Fuente: (Ribera J.M., Prado J.M.).

Se realiza el mismo procedimiento con referencia a la figura 12 para hallar el valor de b a través la siguiente ecuación:

$$b = \frac{2 \cdot \psi_m \cdot \alpha_{dit}}{v_w} \quad (31)$$

b = Parámetros de forma del elipsoide [m].

v_w = Velocidad de soldeo $\left[\frac{m}{s}\right]$.

α_{dit} = Difusividad térmica $\left[\frac{m^2}{s}\right]$.

ψ_m = Coeficientes adimensionales en relación del parámetro operativo n .

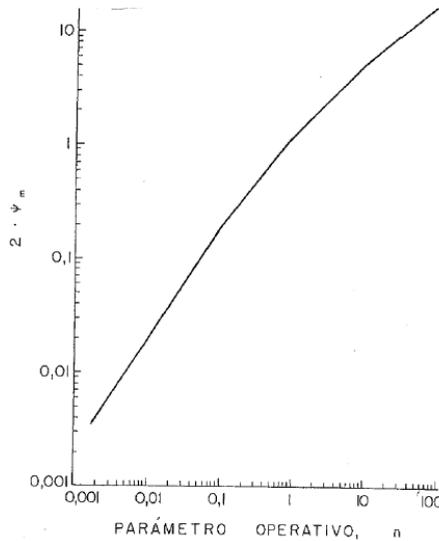


Figura 12. Parámetro operativo n vs $2\psi_m$
Fuente: (Ribera J.M., Prado J.M.).

Finalmente se realiza el mismo procedimiento con la figura 13 para hallar el valor de c a través de la siguiente ecuación:

$$c = \frac{2 \cdot \xi \cdot \alpha_{dit}}{v_w} \quad (32)$$

c = Parámetros de forma del elipsoide [m].

v_w = Velocidad de soldeo $\left[\frac{m}{s}\right]$.

α_{dit} = Difusividad térmica $\left[\frac{m^2}{s}\right]$.

ξ = Coeficientes adimensionales en relación del parámetro operativo n .

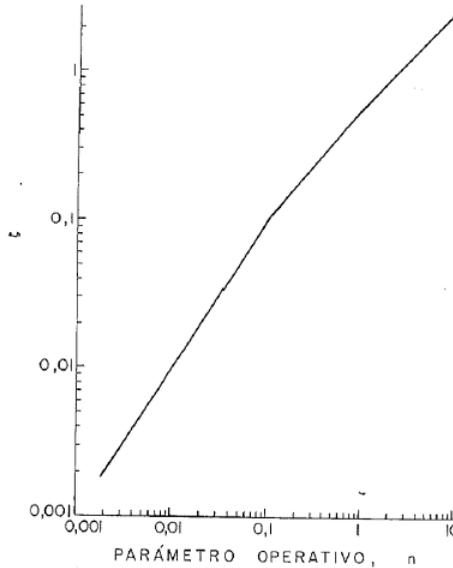


Figura 13. Parámetro operativo n vs ξ
Fuente: (Ribera J.M., Prado J.M.).

2.5 ANÁLISIS ESTRUCTURAL PARA EL PROCESO DE SOLDADURA.

El análisis estructural consiste en calcular la deformación total que ocurre durante el proceso de soldadura, y se expresa por la relación (Bezerra A., 2006)

$$\varepsilon_{Total} = \varepsilon_e + \varepsilon_{term} + \varepsilon_p \quad (33)$$

Donde:

ε_{Total} = Deformación total.

ε_e = Deformación elástica.

ε_{term} = Deformación térmica.

ε_p = Deformación plástica.

Para el caso de la deformación térmica se obtiene a través de la dilatación térmica del material por medio de la ecuación (Bezerra A., 2006):

$$\varepsilon_{term} = \alpha \cdot (T - T_{ref}) \quad (34)$$

Donde:

T = Temperatura instantánea [°C].

T_{ref} = Temperatura de referencia para la que la deformación térmica es nula [°C].

$\alpha =$ Dilatación térmica $\left[\frac{1}{^\circ\text{C}}\right]$.

La dilatación térmica del acero ASTM A36 sujeto a temperatura ambiente es de $1.2 \times 10^{-5} \left[\frac{1}{^\circ\text{C}}\right]$.

La deformación elástica ε_e se puede calcular directamente utilizando la Ley de Hooke y utilizando el módulo de elasticidad E del material. Para el caso de la deformación plástica es más complejo ya que principalmente se debe hallar dominio elástico que normalmente se define en base al criterio de fluencia de Von Mises (Pozo J., Garcia J., Ramos F., 2009).

$$\sigma_{vm} - \sigma_e < 0 \quad (35)$$

Donde:

σ_{vm} = Tensión normal equivalente de Von Mises [MPa].

σ_e = Tensión o límite de fluencia del material [MPa].

La tensión de Von Mises está definida por la ecuación:

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (36)$$

Considerando las siguientes equivalencias:

$$\sigma_1 = \sigma_x$$

$$\sigma_2 = \sigma_y$$

$$\sigma_3 = \sigma_z$$

$$\sigma_1\sigma_2 = \tau_{xy}$$

$$\sigma_2\sigma_3 = \tau_{yz}$$

$$\sigma_3\sigma_1 = \tau_{xz}$$

Donde:

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$ = Tensiones normales y tangenciales que definen el estado tensional triaxial de un punto [MPa].

σ_{vm} = Tensión normal equivalente de Von Mises [MPa].

Deduciendo la ecuación (36) se obtiene:

$$\sigma_{vm} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{xy} + \tau_{yz} + \tau_{xz})^2 \right]^{1/2} \quad (37)$$

Entonces se puede decir que la deformación plástica ε_p se considera cuando se cumple con la siguiente ecuación:

$$\sigma_{vm} - \sigma_e = 0 \quad (38)$$

σ_{vm} = Tensión normal equivalente de Von Mises [MPa].

σ_e = Tensión o límite de fluencia del material [MPa].

Cuando se supera la deformación de Von Mises, empieza a aparecer las deformaciones plásticas en el material.

CAPITULO 3

ANÁLISIS POR MEDIO DE SIMULACIÓN DE ELEMENTOS FINITOS DE LAS ZAT EN EL PROCESO DE SOLDADURA EN ESTRUCTURAS METÁLICAS.

3.1 MODELACIÓN DE ELEMENTOS FINITOS PARA EL PROCESO DE SOLDADURA GMAW.

Existen algunos estudios que han desarrollado modelos analíticos y modelos numéricos para conocer el comportamiento térmico - mecánico para predecir las distorsiones o tensiones residuales que se desarrollan durante el proceso de soldadura (Sanzi H., 2009)

Para el modelado de tensiones y deformaciones en el proceso de soldadura mediante MEF, principalmente se realiza la corrida térmica, y posteriormente se realiza la corrida mecánica – estructural (Pozo J., et al, 2009). En el presente estudio se efectúa el análisis térmico considerando los modelos matemáticos que se revisaron en el capítulo 2.

Seguido se realizará el análisis mecánico estructural donde se incluye como cargas las temperaturas nodales para cada paso de tiempo, luego se calcula los desplazamientos y deformaciones elastoplásticas para obtener como respuesta los desplazamientos transitorios y tensiones residuales (Pozo J., et al, 2009).

El material que se van a considerar para el presente estudio es el acero estructural ASTM A36. En la tabla 3 se observa la composición química del acero ASTM A36.

Tabla 3. Composición química del acero ASTM A36.

Porcentaje (%)					
C (máx.)	Cu	Mn	P (máx.)	S (máx.)	Si (máx.)
0.25	0.02	0.8 -1.2	0.04	0.05	0.4

Fuente: Norma americana ASTM.

En la tabla 4 se observa la variación de las propiedades termo-mecánicas con respecto a la temperatura.

Tabla 4. Variación de las propiedades termo-mecánicas ASTM A36.

Temperatura (°C)	Calor específico (J/Kg°C)	Conductividad (W/m°C)	Densidad (Kg/m³)	Esfuerzo de cedencia (MPa)	Coefficiente de expansión térmica ($10 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$)	Módulo de elasticidad (GPa)
0	480	60	7850	380	1.15	207
100	500	50	7850	340	1.2	200
200	520	45	7800	315	1.3	200
400	650	38	7760	230	1.42	170
600	750	30	7600	110	1.45	80
800	1000	25	7500	30	1.45	35
1000	1200	26	7390	25	1.45	20
1200	1400	28	7300	20	1.45	15
1400	1600	37	7250	18	1.45	10
1550	1700	37	7180	15	1.45	10

Fuente: (Stamenkovic D., Vasovic I., 2009)

Los valores expuestos en la tabla 4 referentes a las características del material en dependencia de la temperatura se ingresan a las propiedades del acero estructural ASTM A36 dentro del software de análisis de MEF.

En la figura 14 se observa la geometría y las dimensiones de la junta que está compuesta por dos perfiles de sección cuadrangular, a la que se denominara junta en T; en la gráfica también se identificado el punto R en donde se analizara el efecto de temperatura transitoria y la creación de tensiones residuales.

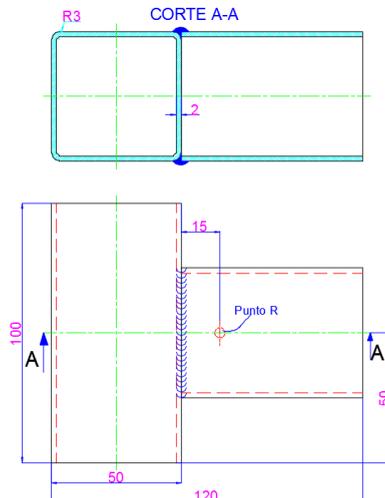


Figura 14. Junta en T para unión de elementos en una estructura metálica.

Fuente: Autor.

La Tabla 5 muestra los parámetros que se consideran antes y durante el proceso de soldadura eléctrica GMAW para la simulación y construcción de probetas.

Tabla 5. Condiciones de Soldadura eléctrica GMAW en construcción de probetas.

Factores a considerar durante el proceso de soldadura GMAW.	
Numero de Operador en construcción:	1 operador
Maquina soldadora:	Lincoln Electric
Modelo:	LF 22M
Gas de Protección:	CO ₂
Presión gas de protección:	25 Psi
Diámetro de alambre:	1,2 x 10 ⁻³ m
Tensión de soldadura (V):	19V
Corriente de soldadura (I):	180 A
Eficiencia de soldadura (η):	0.8
Tiempo de soldadura promedio (seg):	65 Segundos (seg.)
Velocidad avance del (v_m):	3.07 x 10 ⁻³ m/seg.
Temperatura ambiente o precalentamiento (T_0):	18°C
Posición de soldadura:	Plana

Fuente: Autor.

3.2 METODOLOGÍA DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF).

La modelación por medio de un software CAE para analizar el campo térmico y seguido para analizar el campo mecánico consiste en tres etapas (Pozo J., et al, 2009):

- Etapa de pre procesamiento.
- Etapa de procesamiento o de solución.
- Eta de pos procesamiento.

3.2.1. ETAPA DE PRE PROCESAMIENTO.

En esta etapa principalmente se realiza el diseño geométrico tridimensional de la junta a estudiar, con el particular que el conjunto se puede dibujar en un software CAD para exportarlo a un software que permita analizar mediante MEF (Figura 15)

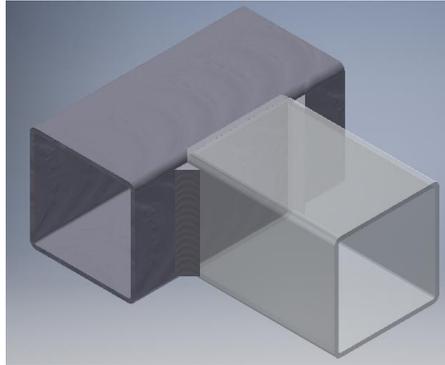


Figura 15. Representación en 3D del armado de junta con disposición en T.
Fuente: Autor.

Una vez obtenido el modelado tridimensional se procede a realizar el mallado en la junta en T, y seguido se realiza el refinamiento de la malla (Figura 16). Es importante asegurarse que la calidad de la malla garantiza la convergencia de resultados idóneos, para el estudio de la junta se tiene una malla con calidad del 96% (Figura 17).

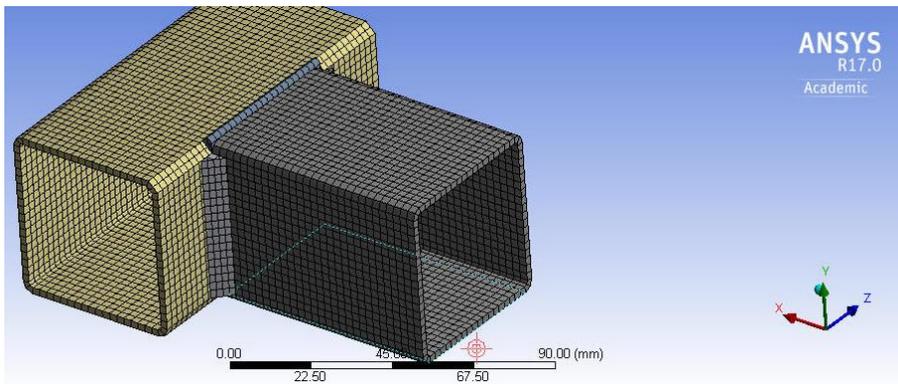


Figura 16. Refinamiento de malla en zonas cercanas a la soldadura en la junta en T
Fuente: Autor.

Details of "Mesh"	
Size	
Inflation	
Advanced	
Statistics	
Nodes	2512
Elements	1912
Mesh Metric	Element Quality
Min	0.1654
Max	0.99931
Average	0.96531
Standard Deviation	0.12818

Figura 17. Calidad de malla para análisis de la junta en T.
Fuente: Autor.

En la tabla 6 se indican los valores a utilizar para el modelo de Goldak, estos datos se calcularon a través de las ecuaciones y graficas que se plantearon en el capítulo 2 del presente trabajo.

Tabla 6. Parámetros del modelo de Goldak.

Parámetro	Valor	Unidad
n	1.189	---
Longitud del elipse frontal (a_f)	1.482	(mm)
Longitud del elipse posterior (a_r)	3.518	(mm)
Ancho de la fuente de calor (b)	5.928	(mm)
Profundidad de la fuente de calor (c)	4.802	(mm)
(f_f)	0.593	---
(f_r)	1.407	---

Fuente: Autor

En la etapa del preprocesamiento también se declara como condición externa de frontera la pérdida de calor en todo el cuerpo de la junta por convección al entorno que se encuentra.

En la tabla 7 se observan los valores del coeficiente de convección de calor del acero ASTM – A36 acorde al cambio de temperatura que se produzca en el proceso.

Tabla 7. Coeficiente de Convección.

Temperatura (°C)	Coficiente de Convección ($\frac{W}{mm^2 \cdot ^\circ C}$)
50	3.78E-06
100	4.49E-06
200	5.34E-06
400	6.35E-06
600	7.06E-06
100	7.99E-06

Fuente: Simulation of Laser Welding Process ANSYS.

3.2.2. ETAPA DEL PROCESAMIENTO.

La fase de procesamiento para la soldadura está considerado como transitorio en el tiempo, ya que cuando se realiza la corrida térmica en el software se puede determinar la variación de temperatura en la probeta al transcurrir el tiempo (Bezerra A., 2006).

En la figura 18 se observa la transición del proceso de soldadura sobre la probeta armada en T.

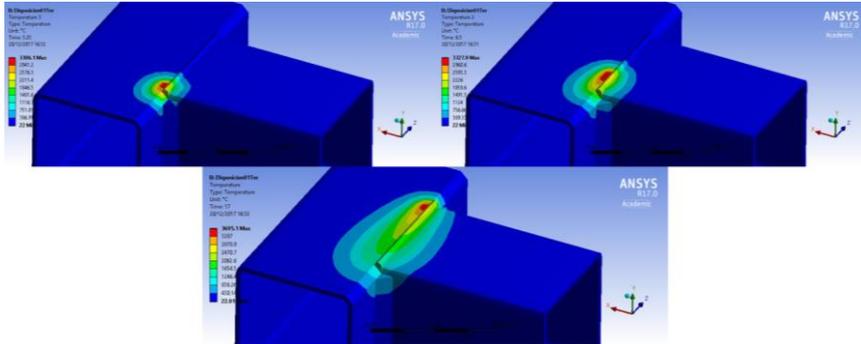


Figura 18. Transición de temperatura en el proceso de soldadura en la junta en T.

Fuente: Autor.

Seguido se introducen los valores de las condiciones iniciales del proceso de soldadura y los valores que se calcularon a través de las ecuaciones revisadas en el capítulo 2, como por ejemplo el caso de la temperatura inicial del proceso (T_0), potencia efectiva (q_{ef}), flujo volumétrico (Q).

3.2.3. ETAPA DEL POS PROCESAMIENTO.

En esta etapa se analizan los resultados de las tensiones residuales que se obtienen a través del software de MEF. La deformación que se genera en la probeta luego de someterse al proceso de soldadura es a tracción, acorde a la figura 19.

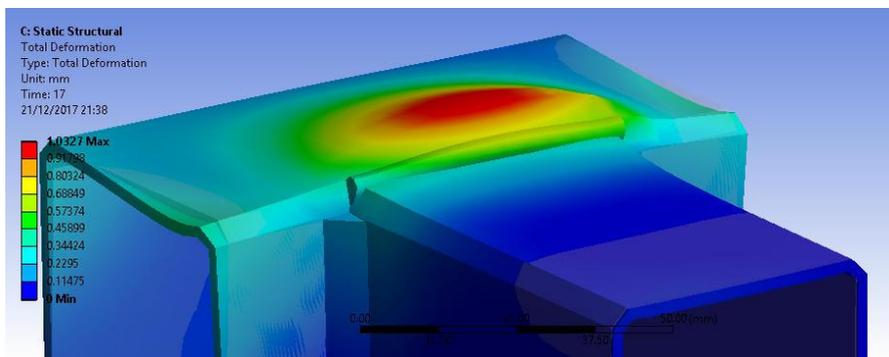


Figura 19. Deformaciones de tracción que se generan en la probeta.

Fuente: Autor.

Los valores obtenidos en la junta en T se observan en la figura con disposición 1 en la figura 20 y figura 21 que están alrededor del punto R y en base al espesor del material; se obtiene un valor promedio de las tensiones residuales por el MEF es de 198.92 MPa.

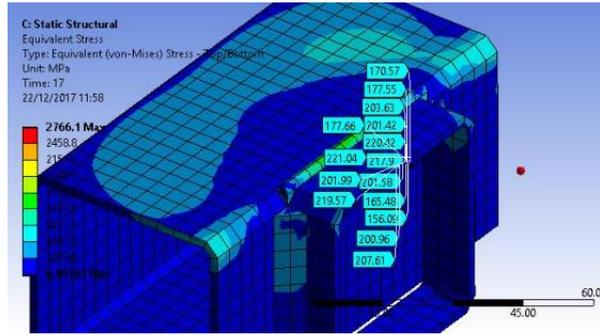


Figura 20. Tensiones residuales alrededor del punto R en la probeta.
Fuente: Autor.

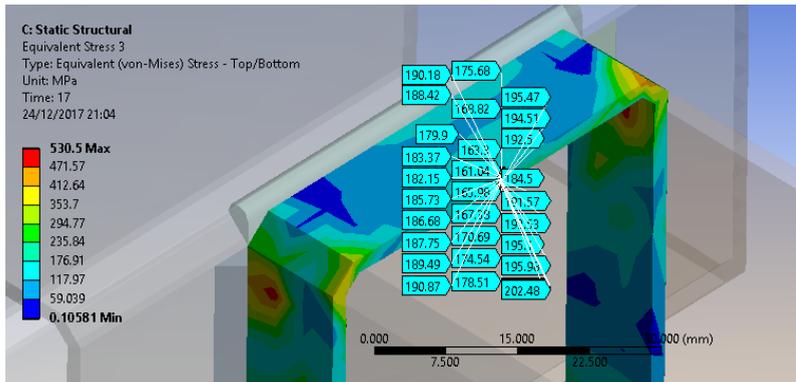


Figura 21. Tensiones residuales en base al espesor del material.
Fuente: Autor.

En la figura 22 se observa el comportamiento de las tensiones residuales en relación al espesor del material, estos valores se hallaron con el MEF en la probeta con disposición de armado en T.

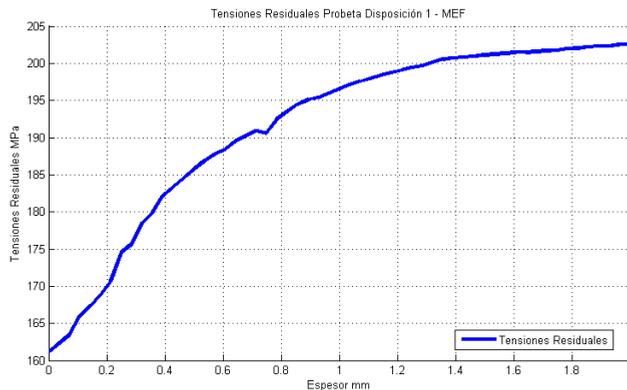


Figura 22. Valores de tensiones residuales en la probeta con disposición en T.
Fuente: Autor.

CAPITULO 4

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PROBETAS PARA VALIDACIÓN DE RESULTADOS.

Para realizar la validación del modelo matemático planteado en el presente proyecto se procedió a diseñar y construir probetas con disposición de armado en T, para posteriormente analizarlas por medio del ensayo mecánico Hole Drilling que validen los resultados obtenidos en los apartados anteriores.

Para el diseño y construcción de las probetas se consideraron cinco factores que podrían influir en los resultados de los ensayos Hole Drilling, como son: proceso de manufactura, materiales, método, maquinaria y medio ambiente.

Con respecto a los cordones y puntos de suelda lo ejecutó un solo operador, con esta consideración se descarta la variabilidad en el proceso de manufactura; en cuanto a material, es importante mencionar que se adquirió un tubo cuadrado de 6 metros de un proveedor nacional que cumpla con todos los estándares de calidad en el proceso de fabricación y de ese mismo tubo se hicieron todas las probetas. En cuanto a la maquinaria empleada se utilizó la misma soldadora eléctrica GMAW donde se consideraron los mismos factores para todas las probetas, como es el caso de intensidad de corriente, voltaje, presión de gases, electrodos, etc.

Para el caso de medio ambiente, todas las probetas se construyeron el mismo día en donde la temperatura oscilaba entre los 18 °C a 22 °C, y el enfriamiento fue de forma natural.

En cuanto al método a utilizar en la preparación antes, durante y después del proceso de soldadura se ejecutó de forma estándar con el fin de disminuir las variables que provoquen diferentes desviaciones en los resultados a obtener.

Para la elaboración de las probetas se utilizó un tubo cuadrado de 50 mm x 50 mm x 2 mm de acero estructural ASTM A-36 (Figura 23).



Figura 23: Trazado de medidas en tubo cuadrado

Fuente: Autor.

A continuación en la tabla 8 se indican las propiedades mecánicas del acero estructural ASTM A-36.

Tabla 8. Propiedades del Acero estructural ASTM A36.

PROPIEDAD	VALOR	UNIDADES
Densidad (ρ)	7850	Kg/m ³
Límite de Fluencia (σ_y)	250	MPa
Razón de Poisson (ν)	0,3	ν
Esfuerzo ultimo - Resistencia a la tensión (σ_u)	400 -550	MPa
Módulo de Elasticidad (E)	207000	MPa
Módulo de Elasticidad cortante (G)	80000	MPa
Porcentaje de elongación Mínimo	20	%
Punto de fusión	1538	°C

Fuente: “Ciencia de materiales, Selección y Diseño”, Pat L. Mangonon; “Mecánica de Materiales”, James M. Gere

Posteriormente se realizó el corte del tubo a medidas específicas para la elaboración de las probetas, en este caso se utilizó una sierra alternativa de corte (figura 24), con el fin de que el arranque de viruta sea uniforme; además en el corte se aplicó una refrigeración continua para evitar el cambio de la microestructura del material trabajado por efecto de la temperatura generada por la operación.



Figura 24. Corte de material por medio de sierra de corte alternativa

Fuente: Autor.

Seguido se procedió a soldar el material considerando el diseño de las juntas que se plantearon en el presente estudio. Primero se realizó una fusión principal a través de diversos puntos por suelda eléctrica SMAW.



Figura 25. Elaboración de puntos de fusión en juntas por medio de soldadora eléctrica SMAW
Fuente: Autor.

Posteriormente se ejecutaron los cordones de suelda a través del proceso de soldadura eléctrica GMAW en cada una de las probetas (figura 26).



Figura 26. Elaboración de cordones en probetas por medio de Soldadura GMAW
Fuente. Autor.

En el proceso de soldadura eléctrica GMAW se consideró como condiciones de proceso los factores que se detallan en la tabla 5 del capítulo 3 del presente trabajo.

Una vez realizados los cordones de soldadura por el proceso GMAW, en las probetas se esperó a que se enfríen de forma natural para no incrementar las tensiones residuales que se generan en las ZAT del material.

4.1. MÉTODO DE PERFORACIÓN DE AGUJERO (HOLE DRILLING).

Para validar los resultados hallados por elementos finitos, se utiliza el método de perforación de agujero (Hole Drilling) idóneo para materiales isotrópicos; en una superficie cercana al cordón de soldadura de la probeta se fijan unas galgas extensiométricas, las que permitirán revisar la relajación de tensiones residuales que se producen en el material al momento de producirse el taladrado (ASTM E-837).

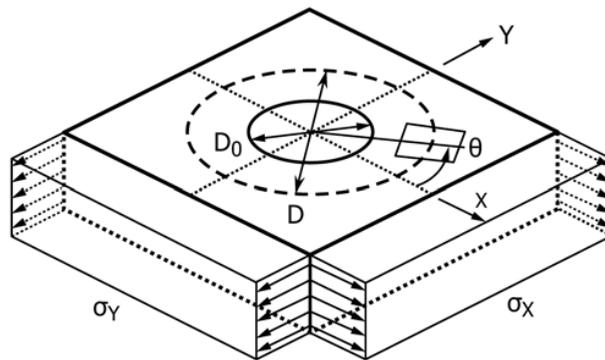
4.1.1. NORMA ASTM E-837.

El alcance de la Norma ASTM E-837 es determinar las tensiones residuales internas que se encuentran en un material isotrópico linealmente elástico realizando una perforación central por medio de una fresa en el centro de las galgas.

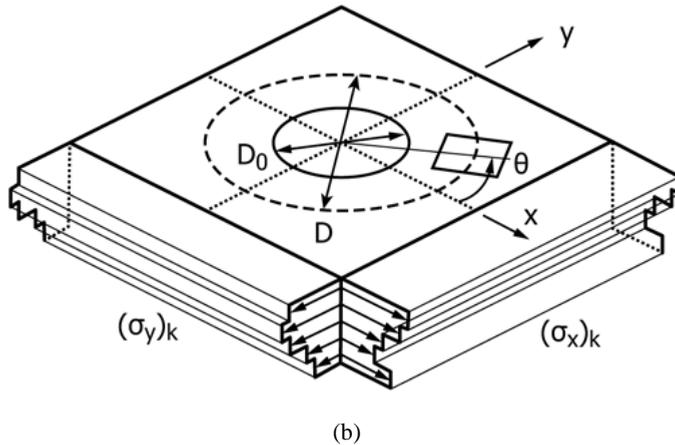
La Norma ASTM E-837 indica que se debe escoger una superficie plana y los bordes deben ser homogéneos entre sí; en la figura 27(a) se observa cómo actúan las tensiones residuales en direcciones diferentes de forma uniforme con respecto a la superficie y profundidad del material en donde se efectuará el ensayo; en el método de perforación es importante considerar que la medición de tensiones residuales se verifica en una zona focalizada del material, para eso es necesario que la galga se sitúe lo más cercano al cordón de soldadura (Flor A., 2015).

Las tensiones que se generan en el plano son σ_x , σ_y , y τ_{xy} ; se consideran uniformes dependiendo del espesor del material, para este caso se dice que el grosor del material debe ser mínimo comparando con el diámetro del orificio, como indica la figura 27(a) (ASTM E-837).

En el caso de la figura 27 (b) se observa que las tensiones residuales no son uniformes ya que el espesor del material es grande comparando con el diámetro de perforación.



(a)



(b)
Figura 27. Geometría de agujeros y tensiones residuales dependientes de espesor, (a) Tensiones Uniformes, (b) Tensiones no uniformes
Fuente: Norma ASTM E-837.

4.1.2. ACTIVIDADES PREVIAS AL MÉTODO DE TALADRADO.

Para la selección de la galga se consideró todos los criterios de la normativa correspondiente, obteniendo así para el estudio planteado una galga extensiométrica tipo A, como se observa en la figura 28; esta roseta es de marca HBM con identificación interna 1-RY21-3/120

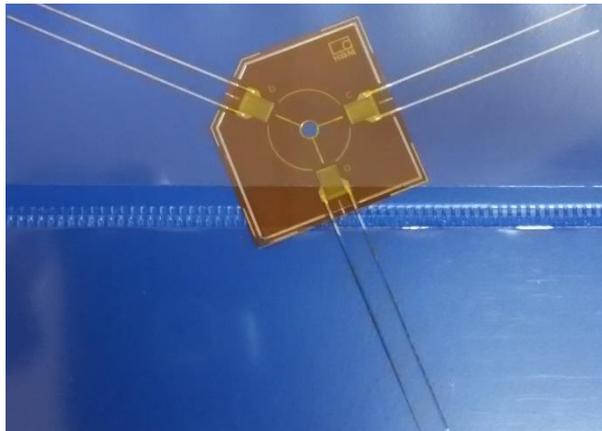


Figura 28. Roseta a utilizar para validación de resultados
Fuente: Autor.

Luego se procede a realizar el cálculo para definir el espesor máximo de la probeta:

$$e = 0.2D \quad (39)$$

D = Diámetro máximo para perforación de roseta (10mm).

e = Espesor máximo para considerar material delgado de acuerdo a Norma ASTM E-837 (mm).

$$e = 2\text{mm}$$

4.1.3. UBICACIÓN Y PUESTA A PUNTO DE LAS GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS SOBRE LAS PROBETAS.

De acuerdo a la figura 29, en la Norma ASTM E-837 se representa la roseta con el acotado de las medidas funcionales a considerar; de igual manera sirve para identificar el tipo de galga que se adquirió de acuerdo a la tabla 10.

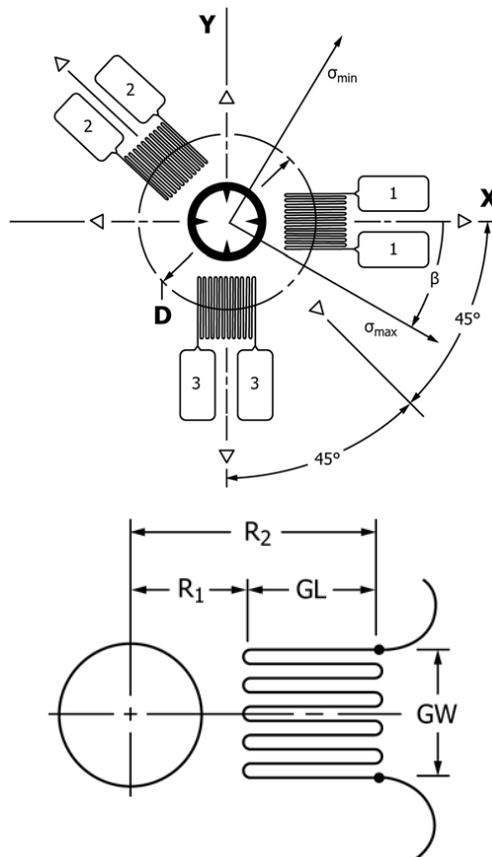


Figura 29. Dimensiones a considerar para identificar el tipo de galga A.

Fuente: Norma ASTM E-387.

En la figura 30 y en la tabla 9 se observa las dimensiones que tiene la roseta que se va a utilizar en el estudio del presente trabajo.

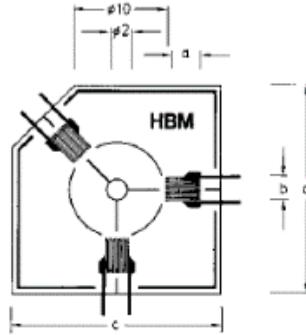


Figura 30. Dimensiones de galga extensiométrica (HBM Strain gauges)
Fuente: HBM Strain gauges

Tabla 9. Dimensiones y características de roseta a utilizar para validación de resultados.

Tipo disponible	Resistencia nominal	Dimensiones (mm)				Máximo voltaje
		a	b	c	d	
Acero	Ω					V
1-RY21-3/120	120	3	2.5	22.1	22.1	4.5

Fuente: HBM Strain gauges

De acuerdo a las dimensiones de la galga que se adquirió, se relaciona con la tabla 10 y se escoge la galga de dimensiones más próximas; la de mayor similitud es la roseta tipo conceptual 1/8 de pulgada.

Tabla 10. Dimensiones de Roseta (Norma ASTM E-837)

Tipo de Roseta	D	GL"	GW"	R ₁ "	R ₂ "
Tipo A					
Conceptual	D	0.309D	0.309D	0.3455D	0.6545D
1/32 pulg. Nominal	2.57	0.79	0.79	0.89	1.68
1/16 pulg. Nominal	5.13	1.59	1.59	1.77	3.36
1/8 pulg. Nominal	10.26	3.18	3.18	3.54	6.72
Dimensiones en mm.					

Fuente: Norma ASTM E-837

En la tabla 11 se evidencia los valores calculados que es necesario considerar antes y durante el proceso de taladrado Hole Drilling.

Tabla 11. Dimensiones, tolerancias y parámetros a considerar para ejecución de ensayo Hole Drilling (Galga conceptual 1/8 pulgada).

e=0,2D	Constante de Roseta A	Espesor (mm)	Observaciones			
e=2mm	0,2	2	Espesor máximo			
D=	10	mm	Diámetro de fresa para perforación (Do y Ro)			
Do máx.=	5,59	mm	D=	10	R=	5
Do mín.=	3,35	mm	Do=	4	Ro=	2
RPM	3000		Tiempo aproximado = 12 seg.			
Angulo máx. de corte.	1° con respecto a la horizontal. (Se perforara con fresa)		Avance: 0.005 mm/ Rev.			
Distancia entre Suelda y Centro de roseta						
c=1,5D						
c=	15	mm				

Fuente: Autor.

En la figura 31, se observa la posición de las galgas extensiométricas sobre la probeta de ensayo, y adicional la distancia calculada entre el centro de la roseta y el eje central del cordón de suelda.

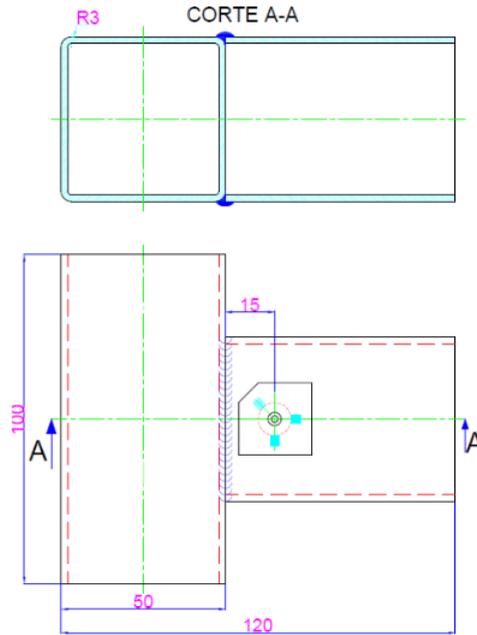


Figura 31. Dimensiones de probeta con disposición de armado en T, posición de galgas y distancias a considerar entre roseta – cordón de solda para validación de ensayos.
Fuente: Autor.

En lo referente a la sujeción y colocación de las rosetas en las probetas se consideraron los lineamientos recomendados por la norma y del fabricante de las galgas con el fin de que los resultados no sean incorrectos.

En la figura 32 se presenta la sujeción de la galga en la probeta previo al ensayo Hole Drilling.



Figura 32. Instalación correcta de galga extensiométrica sobre probeta.
Fuente: Autor.

En cuanto al montaje y sujeción de la probeta sobre la mesa de la maquina CNC, se optó en fijar mediante bridas, ya que esta alternativa no le somete a esfuerzos de compresión a la junta que posteriormente puede afectar en el análisis e interpretación de resultados (figura 33).



Figura 33. Montaje y sujeción de probeta sobre mesa CNC.

Fuente: Autor.

4.2. CÁLCULO DE ESFUERZOS RESIDUALES POR MEDIO DE GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS.

Para analizar los resultados obtenidos producto del ensayo Hole Drilling, es necesario establecer los ejes de cada una de las galgas que contiene la roseta extensiométrica; en la figura 34 se observa los ejes y la dirección de las deformaciones designadas correspondientes a las probetas armadas con disposición en T; la numeración para cada galga dentro de la roseta se analiza en sentido contrario de las manecillas del reloj (CWW).

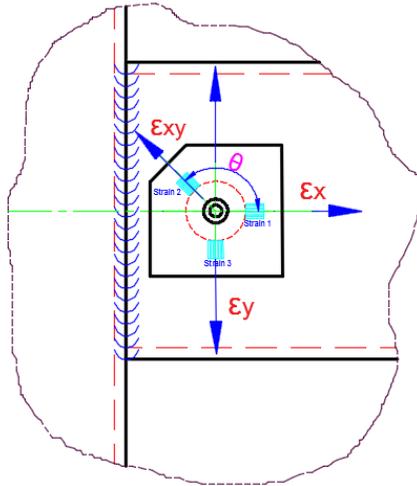


Figura 34. Designación de ejes acorde a posición de roseta para probetas con disposición en T.

Fuente: Autor.

Las deformaciones unitarias ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3 , que el software y el DAC son adimensionales; y en base a estas se empieza el cálculo para obtener las deformaciones combinadas p, q, t , a través de las siguientes ecuaciones (ASTM E-837):

$$p = \frac{\epsilon_3 + \epsilon_1}{2} \quad (40)$$

$$q = \frac{\epsilon_3 - \epsilon_1}{2} \quad (41)$$

$$t = \frac{\epsilon_3 + \epsilon_1 - 2\epsilon_2}{2} \quad (42)$$

En la tabla 12 se obtiene los coeficientes \bar{a} y \bar{b} , para eso es necesario calcular el valor adimensional de D_o/D y ubicarlo en la columna el valor el respectivo y cruzarlo con la fila del agujero pasante.

Donde:

D_o = Diámetro de agujero o fresa a utilizar para perforación (mm).

D = Diámetro máximo a perforar en la galga extensiométrica (mm).

$$\frac{D_o}{D} = 0.4 \quad (43)$$

Tabla 12. Valores de los coeficientes \bar{a} y \bar{b}

Roseta A	Diámetro de agujero Do/D					Diámetro de agujero Do/D				
Profundidad agujero	\bar{a}					\bar{b}				
Prof/D	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5
0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.05	0.027	0.037	0.049	0.063	0.080	0.051	0.069	0.090	0.113	0.140
0.10	0.059	0.081	0.108	0.138	0.176	0.118	0.159	0.206	0.255	0.317
0.15	0.085	0.115	0.151	0.192	0.238	0.180	0.239	0.305	0.375	0.453
0.20	0.101	0.137	0.177	0.223	0.273	0.227	0.299	0.377	0.459	0.545
0.25	0.110	0.147	0.190	0.238	0.288	0.259	0.339	0.425	0.513	0.603
0.30	0.113	0.151	0.195	0.243	0.293	0.279	0.364	0.454	0.546	0.638
0.35	0.113	0.151	0.195	0.242	0.292	0.292	0.379	0.472	0.566	0.657
0.40	0.111	0.149	0.192	0.239	0.289	0.297	0.387	0.482	0.576	0.668
Agujero pasante	0.090	0.122	0.160	0.203	0.249	0.288	0.377	0.470	0.562	0.651

Fuente: Norma ASTM E-837.

Una vez obtenidos los coeficientes \bar{a} y \bar{b} , se procede a calcular los esfuerzos combinados por medio de las siguientes ecuaciones (ASTM E-837).

$$P = -\frac{Ep}{\bar{a} \cdot (1+\nu)} \quad (44)$$

$$Q = -\frac{Eq}{\bar{b}} \quad (45)$$

$$T = -\frac{Et}{\bar{b}} \quad (46)$$

Donde:

P = Esfuerzo isotrópico (equi-biaxial) [MPa].

Q = Esfuerzo de cizalla a 45 ° [MPa].

T = Esfuerzo de corte xy [MPa].

E = Modulo de Elasticidad del material [MPa].

ν = Coeficiente adimensional de Poisson.

Luego se utilizan las siguientes ecuaciones para obtener los esfuerzos σ_x , σ_y , τ_{xy} :

$$\sigma_x = P - Q \quad (47)$$

$$\sigma_y = P + Q \quad (48)$$

$$\tau_{xy} = T \quad (49)$$

σ_x = Esfuerzo normal correspondiente al eje x [MPa].

σ_y = Esfuerzo normal correspondiente al eje y [MPa].

τ_{xy} = Esfuerzo cortante o de cizalladura [MPa].

Posteriormente se utiliza la ecuación (50) para obtener σ_{max} correspondiente al esfuerzo máximo a tracción y el σ_{min} correspondiente al esfuerzo mínimo a tracción (máximo a compresión).

$$\sigma_{max}, \sigma_{min} = P \pm \sqrt{Q^2 + T^2} \quad (50)$$

P = Esfuerzo isotrópico (equi-biaxial) [MPa].

Q = Esfuerzo de cizalla a 45 ° [MPa].

T = Esfuerzo de corte xy [MPa].

σ_{max} = Esfuerzo máximo a tracción [MPa].

σ_{min} = Esfuerzo máximo a compresión [MPa].

La tensión principal a mayor tracción σ_{max} está situada en un ángulo β medido en el sentido de las agujas del reloj desde la dirección de la galga 1 acorde a la figura 29. De manera similar, la tensión principal σ_{min} a mayor compresión está situada en un ángulo β medido en el sentido de las agujas del reloj desde la dirección de la galga 3 de acuerdo a la figura 29 (ASTM E-837).

$$\beta = \frac{1}{2} \arctang\left(\frac{-T}{-Q}\right) \quad (51)$$

β = Angulo donde se encuentra $\sigma_{max}, \sigma_{min}$ [°].

Para calcular el alivio de tensión superficial medido después de la perforación se utiliza la ecuación (52) y posteriormente se aplica la ecuación de la ley de Hooke (53):

$$\varepsilon_{at} = \frac{1+\nu}{E} \bar{a} \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{1}{E} \bar{b} \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \frac{1}{E} \bar{b} \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (52)$$

$$\sigma_{at} = E \cdot \varepsilon_{at} \quad (53)$$

Donde:

ε_{at} = Deformación unitaria de alivio de tensión superficial [Adimensional].

σ_{at} = Esfuerzo de alivio de tensión superficial [MPa].

ν = Coeficiente adimensional de Poisson.

E = Modulo de Elasticidad del material [MPa].

σ_x = Esfuerzo normal correspondiente al eje x [MPa].

σ_y = Esfuerzo normal correspondiente al eje y [MPa].

τ_{xy} = Esfuerzo cortante o de cizalladura [MPa].

θ = Ángulo de la medición de la deformación relativa a la dirección x [°].

A continuación se observa las gráficas obtenidas a raíz de los ensayos y cálculos realizados para las probetas 1 y 2 considerando la aplicación de las ecuaciones anteriormente mencionadas.

En la figura 35 (a) y 35 (b) se observa los esfuerzos normales σ_x , σ_y y esfuerzos cortantes τ_{xy} obtenidos en las dos probetas con disposición de armado en T; las líneas entrecortadas son los esfuerzos calculados a partir de las deformaciones medidas por el DAC y las líneas continuas son los esfuerzos obtenidos aplicando el ajuste de curva a través del método numérico por regresión polinomial de mínimos cuadrados.

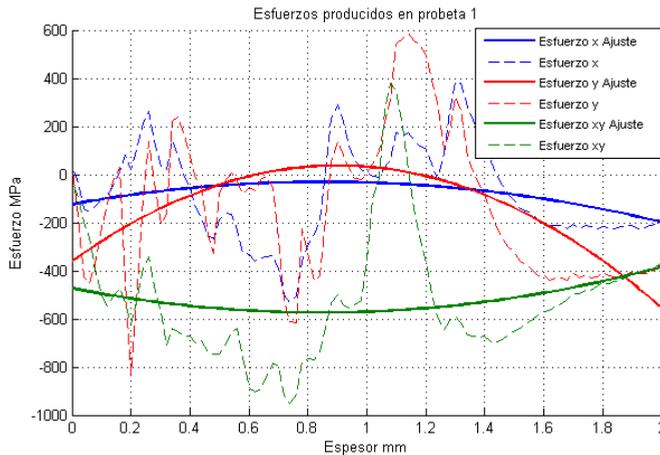


Figura 35(a). Esfuerzos obtenidos durante el ensayo Hole drilling - Ajuste por regresión polinomial disposición en T en probeta 1.

Fuente: Autor.

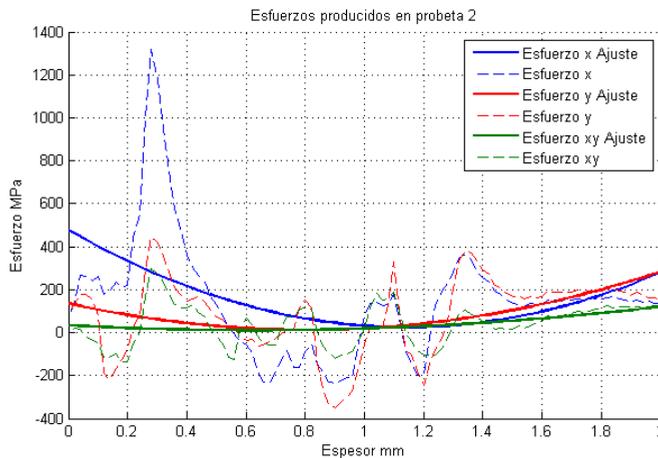


Figura 35(b). Esfuerzos obtenidos durante el ensayo Hole drilling - Ajuste por regresión polinomial disposición en T en probeta 2.

Fuente: Autor.

En la figura 36 (a) y 36 (b) se observa los esfuerzos máximos a la tracción σ_{max} , y los esfuerzos mínimos a tracción (esfuerzos máximos a compresión) σ_{min} que se calcularon en las dos probetas; las líneas entrecortadas son los esfuerzos máximos calculados a partir de las deformaciones hallados en el ensayo Hole Drilling y las líneas continuas son los esfuerzos máximos obtenidos cuando se aplica el ajuste de curva a través del método numérico por regresión polinomial de mínimos cuadrados.

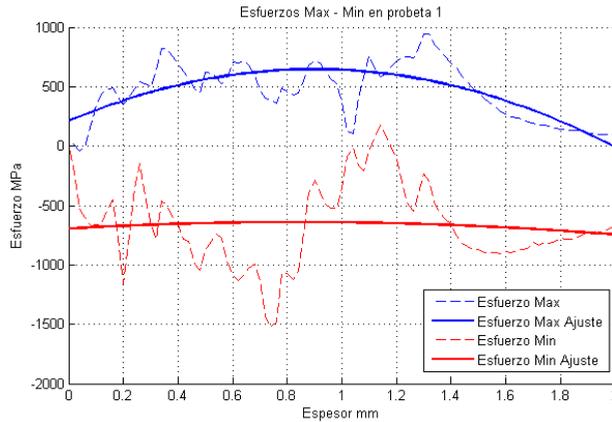


Figura 36(a). Esfuerzos máximos – mínimos en probeta 1.

Fuente: Autor.

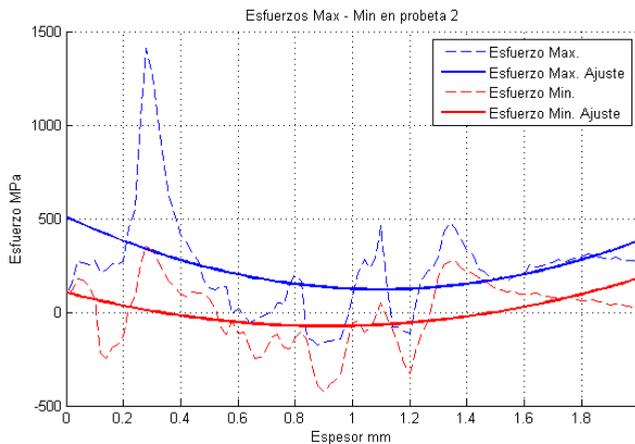


Figura 36(b). Esfuerzos máximos – mínimos en probeta 2.

Fuente: Autor.

En la figura 37 (a) y 37 (b) se observa los valores calculados del alivio de tensiones en las dos probetas; las líneas entrecortadas son los valores del alivio de tensiones a partir de las deformaciones halladas en el ensayo Hole Drilling y las líneas continuas son los

alivios de tensiones obtenidos cuando se aplica el ajuste de curva a través del método numérico de regresión polinomial por mínimos cuadrados.

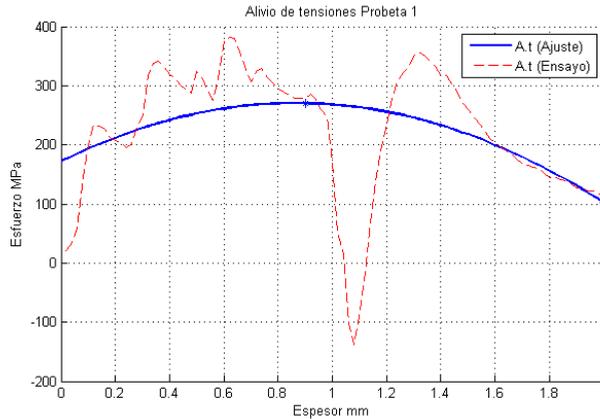


Figura 37(a). Alivio de tensiones en probeta 1.

Fuente: Autor.

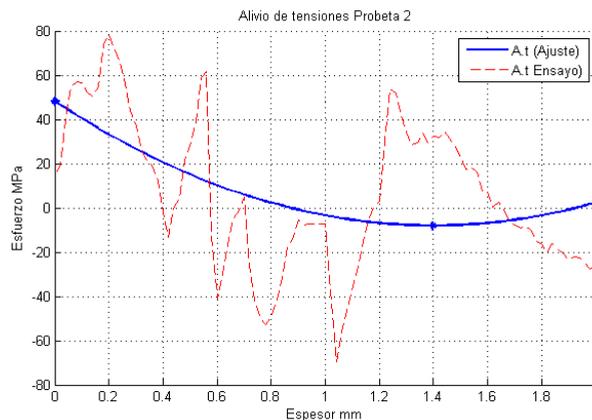


Figura 37(b). Alivio de tensiones en probeta 2.

Fuente: Autor.

4.3. MÉTODO DE CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES (DIC).

La Correlación Digital de Imágenes (DIC) es una técnica óptica que se utiliza para medir deformaciones de campo completo a través del desplazamiento de píxeles dentro de una secuencia de fotografías en un proceso o ensayo mecánico (Zhang H., Senn M. , & Sui T., 2017).

En comparación con la técnica Hole Drilling con galgas extensiométrica, en el método Hole Drilling con DIC se requiere preparar las superficies de las probetas,

posteriormente realizar la captura de imágenes de forma secuencial desde el inicio hasta la finalización del ensayo y finalmente analizar los desplazamientos y deformaciones hallados a través de un software que correlacione las imágenes (figura 38).



Figura 38. Preparación de probetas en escala de grises.
Fuente: Autor.

Luego se realizó la sujeción de la probeta de la misma forma que se realizaron las probetas para el ensayo Hole Drilling (figura 39).



Figura 39. Sujeción de probeta sobre la mesa de CNC.
Fuente: Autor.

Una vez obtenido la secuencia de captura de imágenes del proceso Hole Drilling se procede a editar las mismas con el fin de seleccionar la superficie donde se generan las deformaciones del ensayo Hole Drilling (figura 40).



Figura 40. Edición de imágenes secuenciales durante el ensayo Hole Drilling DIC.
Fuente: Autor.

Para el estudio Hole Drilling con DIC del presente estudio se utilizó el paquete DIC en Matlab 2014a desarrollado por C. Eberl - M. Senn y adaptado por el proyecto de la UE iStress que se enfoca en la evaluación de las micro deformaciones para el experimento de fresado de anillo de anillo FIB-DIC en combinación con microscopía de escaneo de imagen (Zhang H, et al, 2017).

El software ejecuta la correlación de imágenes donde analiza el desplazamiento de píxeles que se producen en la secuencia de imágenes con la finalidad de obtener las deformaciones del proceso de taladrado. Para el estudio del proceso Hole Drilling con DIC se obtuvo una secuencia de 31 imágenes para las dos tipos de probetas (figura 41).

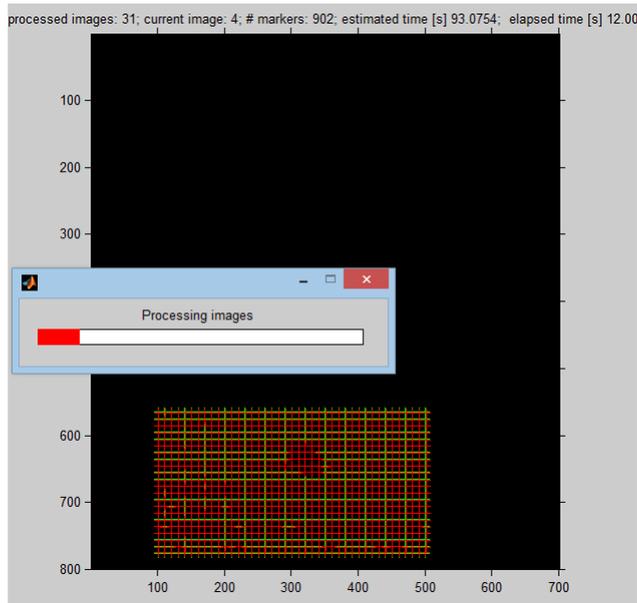


Figura 41. Correlación de 31 imágenes del ensayo Hole Drilling.

Fuente: Autor.

En la etapa del post procesamiento se analiza los resultados obtenidos del ensayo Hole Drilling, adicional se agregan los valores de las propiedades mecánicas del material que se construyeron las probetas; en este caso son de Acero estructural ASTM A-36.

A continuación, se observa en las siguientes figuras el desplazamiento que se genera dentro de la malla en base a la secuencia de fotografías cuando se efectuó el Hole Drilling.

En la figura 42, se coloca la imagen 31 correlacionada del ensayo Hole Drilling, esta es la imagen donde se evidencia el desplazamiento final de los píxeles en relación con la malla; es decir cuando ya se finalizó el proceso de taladrado.

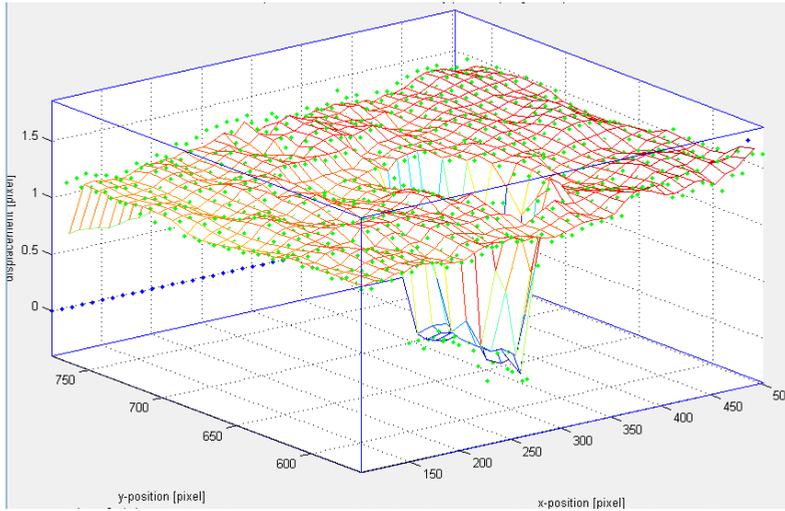


Figura 42. Mallado en imagen 31, finalización del ensayo Hole Drilling.
Fuente: Autor.

En la figura 43 se observa en el eje y los valores de las deformaciones unitarias ϵ_x de la gráfica, y en el eje x se encuentran los valores de la relación profundidad (h) diámetro (D) h/D para la probeta 3 con disposición de armado en T. Los puntos azules son las deformaciones halladas para cada imagen y la curva identificada de color rojo es el ajuste polinomial aplicando el ajuste de curvatura por regresión cuadrática por mínimos cuadrados para las deformaciones unitarias en x .

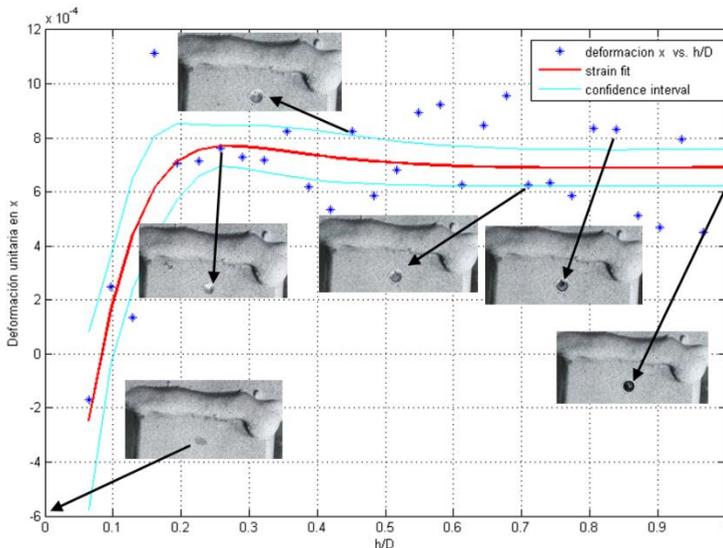


Figura 43. Deformaciones unitarias en ϵ_x , utilizando Hole Drilling con DIC.
Fuente: Autor.

En la figura 44 se observa en el eje y las deformaciones unitarias en ε_y , y en el eje x se encuentra la relación de profundidad h/D ; de igual manera los puntos azules son los valores de las deformaciones por cada imagen y la curva roja es el valor de las deformaciones aplicando ajuste de curvaturas por regresión polinomial por mínimos cuadrados.

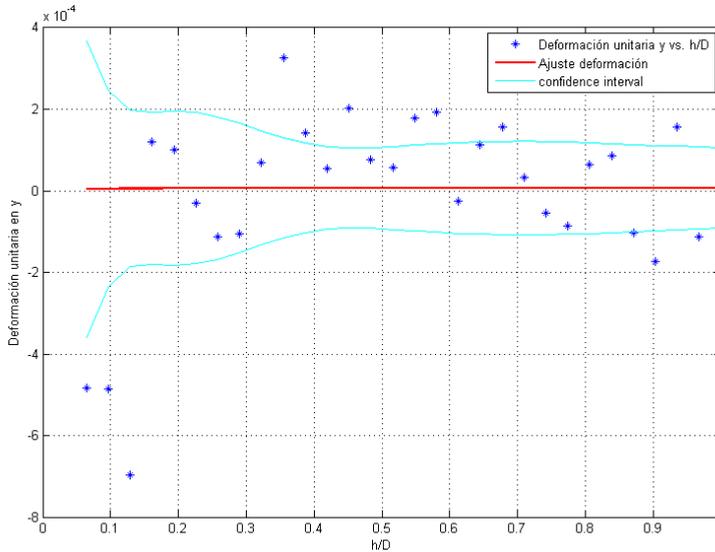


Figura 44. Deformaciones unitarias en ε_y , utilizando Hole Drilling con DIC.
Fuente: Autor.

En la figura 45 se observa en el eje y las deformaciones unitarias en ε_{xy} , y en el eje x se encuentra la relación de profundidad h/D ; de igual manera los puntos azules son los valores de las deformaciones por cada imagen y la curva roja es el valor de las deformaciones aplicando ajuste de curvaturas por regresión polinomial por mínimos cuadrados.

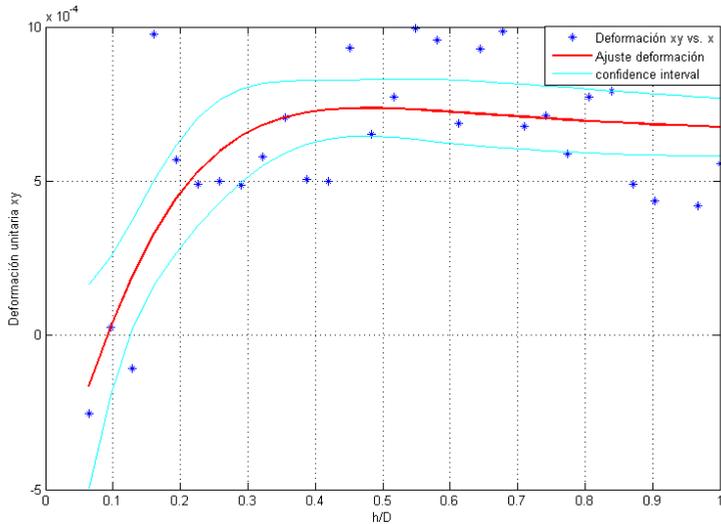


Figura 45. Deformaciones unitarias en ε_{xy} , utilizando Hole Drilling con DIC.

Fuente: Autor.

El paquete de análisis DIC en el software de Matlab, brinda la facilidad de observar el comportamiento de las deformaciones calculadas en cada una de las imágenes capturadas durante el proceso Hole Drilling. En la figura 46 se evidencia el proceder de las deformaciones desde la imagen 02 hasta llegar a la imagen 31, considerando que en cada fotografía la profundidad del agujero fue progresiva hasta llegar a un agujero pasante.

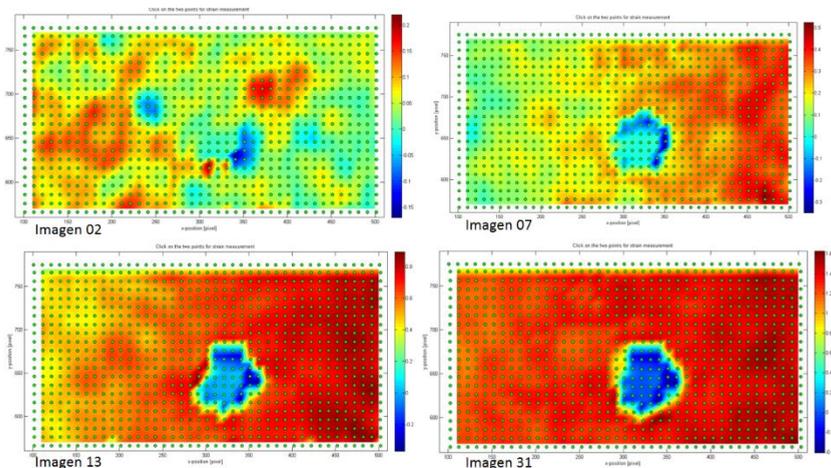


Figura 46. Comportamiento de deformaciones unitarias de acuerdo a la secuencia de imágenes capturadas del proceso Hole Drilling con DIC.

Fuente: Autor.

En base a los valores de las deformaciones unitarias ε_x , ε_y , ε_{xy} calculadas por el paquete DIC en Matlab, se procede a utilizar las ecuaciones de la norma ASTM E387 para obtener los esfuerzos normales, esfuerzos cortantes, máximos, mínimos y alivio de tensiones, que a continuación se detalla en las siguientes gráficas. En la figura 47 se observa las curvas entrecortadas de los esfuerzos normales σ_x , σ_y y esfuerzo cortante τ_{xy} calculados en base a las 31 imágenes secuenciales del proceso Hole Drilling; las líneas continuas gruesas son los valores de los esfuerzos normales σ_x , σ_y y esfuerzo cortante τ_{xy} utilizando ajuste de curvatura por regresión polinomial por mínimos cuadrados.

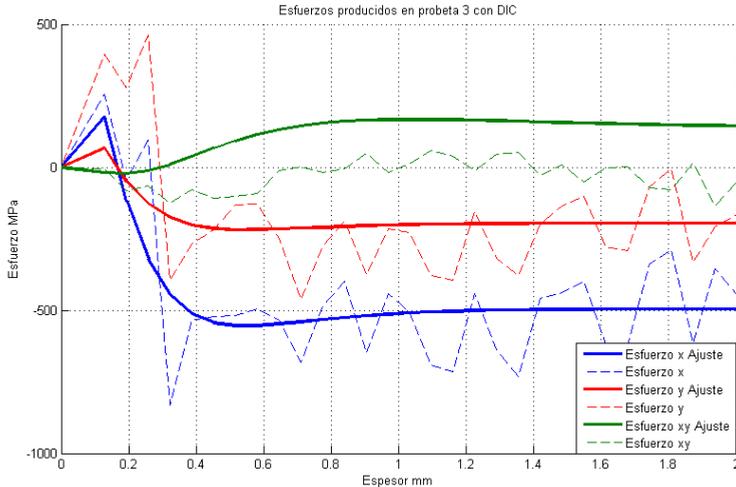


Figura 47. Esfuerzo obtenidos durante el ensayo Hole drilling con DIC - Ajuste por regresión polinomial en probeta 3.

Fuente: Autor.

En la figura 48 se observa los esfuerzos máximos a la tracción σ_{max} , y los esfuerzos máximos a compresión σ_{min} que se calcularon en la tercera probeta; las líneas entrecortadas son los esfuerzos máximos calculados a partir de las deformaciones hallados en el ensayo Hole Drilling con DIC y las líneas continuas son los esfuerzos máximos obtenidos cuando se aplica el ajuste de curva a través del método numérico por regresión polinomial por mínimos cuadrados.

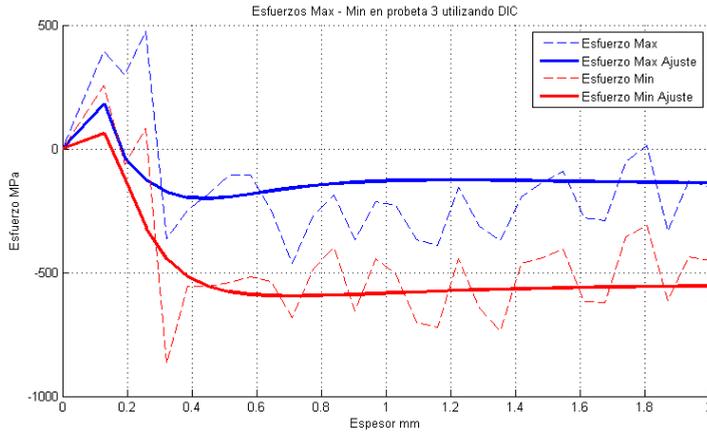


Figura 48. Esfuerzos máximos - mínimos durante el ensayo Hole drilling con DIC - Ajuste por regresión polinomial en probeta 3.

Fuente: Autor.

En la figura 49 se observa los valores calculados del alivio de tensiones en la séptima probeta; la línea entrecortada son los valores del alivio de tensiones a partir de las deformaciones halladas en el ensayo Hole Drilling con DIC y las líneas continuas son los alivios de tensiones obtenidos cuando se aplica el ajuste de curva a través del método numérico de regresión polinomial por mínimos cuadrados. Las tensiones residuales en promedio y absolutas es de 193.40 MPa.

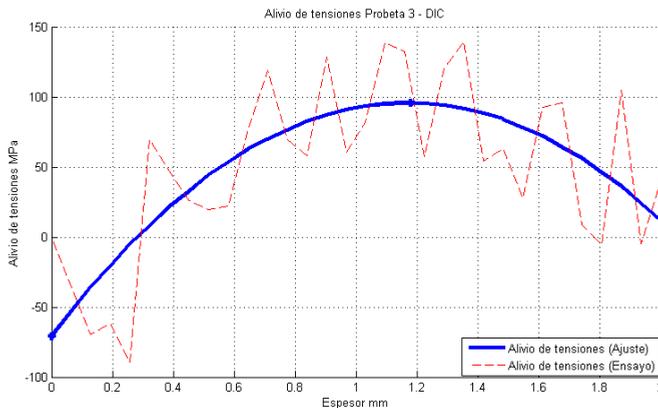


Figura 49. Alivio de tensiones en probeta 3

Fuente: Autor.

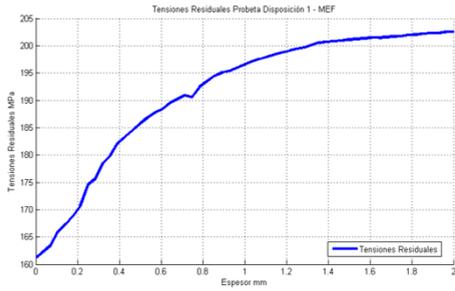
4.4 COMPARACIÓN DE RESULTADOS PARA OBTENCIÓN DE TENSIONES RESIDUALES.

En el presente estudio se realizó el cálculo de tensiones residuales en dos tipos de juntas utilizadas para la elaboración de estructuras metálicas; estas tres metodologías son: método de elementos finitos MEF, método de Hole Drilling bajo la norma ASTM E-837 y finalmente por el método de Correlación de imágenes DIC.

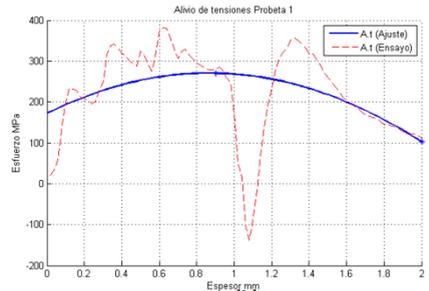
En la figura 50 se observa las gráficas obtenidas del alivio de tensiones que se obtuvieron a través de las tres diferentes metodologías para la probeta con disposición de armado en T; en la gráfica (a) se evidencia los valores por el MEF la tensiones residuales que inicia desde 161.04 MPa y tiende hasta 202.48 MPa acorde va incrementando la profundidad del material, el promedio de tensiones residuales es 198.92MPa.

En la gráfica (b) y grafica (c) se realiza la validación de resultados por medio del ensayo Hole Drilling, en las gráficas se observa la curva real con línea interpuntada de color rojo donde se evidencia los valores calculados en base a la norma señalada anteriormente, y en las misma graficas se observa la tendencia del comportamiento de las tensiones residuales en relación al espesor del material, aplicando regresión cuadrática polinomial. En la gráfica (b) se observa un promedio de alivio de tensiones de 220MPa y para la gráfica (c) se tienen un promedio de 6.31 MPa. Considerar que en la curva real de la gráfica (c) se tienen resultados de alivio de tensiones que están a tracción y seguidamente a compresión desde +80 MPa hasta - 80 MPa; si se considera todos los valores calculados como absolutos y entendiendo que las tensiones residuales están a tracción en las probetas se tiene una tendencia aproximada de 160 MPa.

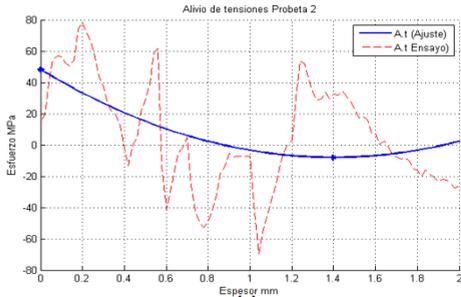
Cuando se aplica el método óptico de correlación de imágenes grafica (d) se observa que la curva real de igual manera oscila entre los -60 MPa hasta +140 MPa, bajo el mismo criterio de análisis de resultado de Hole Drilling se considera una tendencia de alivio de tensiones de 200MPa.



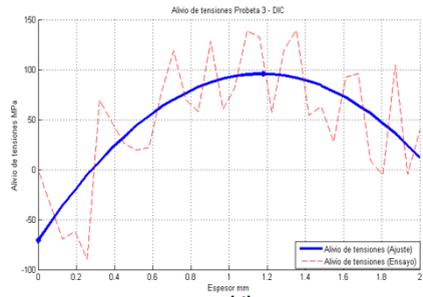
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 50. Alivio de tensiones por diferentes metodologías para probeta con disposición en T.

Fuente: Autor.

CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1 CONCLUSIONES.

El cálculo de tensiones residuales requiere un análisis muy complejo, indistintamente que tipo de metodología se utilice, ya que en cada uno de las mismas involucra una gran variedad de factores considerando desde la construcción de probetas hasta el análisis e interpretación de resultados.

Para obtener los resultados por medio de elementos finitos, se deben considerar la mayoría de condiciones externas que involucra el proceso de soldadura y posteriormente plantear el modelo matemático que más se aproxime a la realidad; para el presente estudio se consideró el modelo matemático de Goldak y un mallado superior al 95% en el cual se obtuvieron resultados de las tensiones residuales en la probeta en relación al espesor del material.

Para validación de resultados que se obtuvieron simulando el proceso de soldadura a través del MEF, se utilizó el ensayo mecánico semidestructivo Hole Drilling bajo la norma ASTM E-837 y el ensayo óptico de correlación de imágenes DIC; para los dos diferentes ensayos que se utilizó, si existe una semejanza de resultados en relación al estudio por elementos finitos.

En la figura 50 se observa la comparación exhaustiva de los métodos que se utilizaron en el presente proyecto para obtener los valores de los esfuerzos residuales; se puede decir que la variación de resultados por medio de las tres diversas metodologías no es tan considerable ya que todas se mantienen en un rango entre 160 MPa a 200 MPa posterior al proceso de soldadura por arco eléctrico GMAW.

La validación de resultados por medio de diferentes métodos es muy poco probable que coincidan exactamente ya que en cada uno de ellos contemplan diversas particularidades; por ejemplo, en el análisis de Hole Drilling se realiza una lectura de 10 deformaciones unitarias por segundo, e incluso por esta ventaja de altísima retención de datos se obtiene defectos de microestructura en el material e incluso en la manufactura del tubo cuadrado. Para el caso del análisis DIC se obtuvo una correlación de 30 fotografías de proceso de forma incremental a la perforación del agujero; para este caso se observa que los valores son más próximos a los resultados obtenidos por elementos finitos ya que el mismo se basa solo en desplazamiento de pixeles de cada una de las fotografías.

Las figuras 36 (a) y 36 (b) se obtuvieron por medio del ensayo Hole Drilling, donde se evidencian valores de los esfuerzos máximos y esfuerzos mínimos que oscilan entre los

1000 MPA y -1500 MPA; estos valores altos se generan cuando en la microestructura del material se encuentran ciertas imperfecciones, es decir cuando la herramienta de perforación tuvo algún inconveniente de penetración sobre el material de la probeta. Por tal razón se utilizó el ajuste por regresión lineal por mínimos cuadrados de orden polinomial con el fin de obtener resultados que evidencien la tendencia a un valor específico en los esfuerzos calculados.

En el presente estudio se determinó que al efectuar el proceso de soldadura eléctrica GMAW para una junta de armado en T se obtiene valores de tensiones residuales aproximadamente que oscilan entre los 160 a 200 MPA y estos valores generalmente no se incluyen en los cálculos estructurales, solo se aplican factores de seguridad que de cierta manera estas constantes se minimizan al no considerarse los esfuerzos residuales existentes, lo que provocaría en ciertas ocasiones que los cálculos sean erróneos y adicional la estructura no cuenta con un factor mínimo de seguridad; esto puede causar a un corto o largo plazo colapsos estructurales seguido de daños materiales, pérdidas económicas e incluso pérdidas mortales.

5.2. RECOMENDACIONES.

En base al presente estudio, se recomienda continuar con estudios de validación de tensiones residuales por medio de ensayos no destructivos y que se apliquen en campo o in situ, como el análisis de tensiones residuales por ultrasonido. Los métodos de aplicación como Hole Drilling y DIC afectan parcialmente a la pieza o elemento a estudiar y adicionalmente deben realizarse en un laboratorio bajo ciertas condiciones muy rigurosas.

En relación a los ensayos que se utilizaron para validar los resultados, es muy importante considerar la sujeción, calibración y preparación de probetas antes y durante el proceso de taladrado, fundamentalmente por jugar un papel muy importante en la obtención de resultados válidos, ya que al fallar o no ser minuciosos en cualquiera de estas etapas los ensayos pueden proyectar resultados erróneos.

De igual manera se recomienda continuar con diversos estudios que intervenga el método óptico de Correlación de imágenes para diferentes procesos de manufactura en la industria, principalmente por que determina el comportamiento de los materiales; este ensayo en el presente estudio demostró ser muy efectivo por la validación de resultados que tienden a ser muy próximos a la realidad, y sobre todo es un método que no involucra un elevado presupuesto económico.

El efecto de las tensiones residuales se podría continuar analizando entorno al proceso de soldadura GMAW, pero modificando las dimensiones de la junta del material como es el caso del espesor del material, adicional también se podría alternar por otro tipo de junta que se utilizan para la fabricación y construcción de estructuras metálicas.

En el presente estudio, únicamente se abarcó el efecto de tensiones residuales para el proceso de soldadura por arco eléctrico GMAW, en futuros estudios se podría continuar el análisis de tensiones residuales en alternar por otros procesos de soldadura como SMAW, SAW y FCAW, con el fin de determinar cuál de estos genera mayores efectos críticos y nocivos sobre las estructuras metálicas.

BIBLIOGRAFÍA.

- A.W.S. (1976). *Welding Handbook. Fundamentals of Welding, 1*, Septima edicion. American Welding Society.
- Alvarez A. (2017). *Determinación de esfuerzos residuales generados por la soldadura GMAW en placas de acero 1018*. México: Universidad Tecnológica de Nuevo Laredo.
- ANSYS. (25 de Septiembre de 2017). *Simulation of laser welding process*.
- Araque O., Arzola N. (2013). *Estado del arte sobre la integridad estructural de uniones soldadas y modelos de propagación de grietas para la gestión de vida en estructuras*. *Ingeniare*, 279-292.
- ASM Metal HandBook. (1990). *Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*. ASM International.
- ASTM E-837. (s.f.). *Determining residual stresses by the hole-drilling strain gage method*. E837, ASTM standard.
- Bezerra A. (2006). *Simulacao Numerica de Soldagem con Aplicacao a caracterizacao do comportmaento dinamico de estruturas soldadadas*. Uberlândia, Brasil: Universidad Federal de Uberlandia.
- Bray, D. E. (1997). *Nondestructive evaluation a tool in design, manufacturing, and service*. Houston, Texas: Taylor y Francis Group.
- Bullon W. (Diciembre de 2010). *Simulación de un proceso de soldadura utilizando un modelo termo-mécanico tridimensioneal con prescripción de temperatura*. Lima, Perú.
- Bullon W., Acosta J., Franco R., Valverde G. (23 al 25 de Octubre de 2007). *Simulacion de un proceso de soldadura mediante un modelo Termo-mécanico considerando el efecto de esfuerzos residuales utilizando el metodo de elementos finitos*. Perú: Pontificia Universidad Católica de Perú.
- Farfan N. (Noviembre de 2010). *Modelación del proceso de soldadura por medio del método de elementos finitos*. Santiago de chile, Chile: Universidad de Chile.
- Flor A. (09 de Junio de 2015). *Medición de tensiones residuales*. Barcelona, España: Universidad Politecnica de Catalunya.

- Fosca C. (2007). Introducción a la metalurgia de la soldadura. Séptima Edición. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Franco R., Quino Valverde, Yopez H. (s.f.). Procedimiento para determinar los campos de temperaturas producidos por el proceso de soldadura en cordones rectilíneos mediante simulación numérica. Lima, Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- García V., Camacho J., Reyes F. (25 - 27 de Septiembre de 2013). Análisis mediante modelación computacional del proceso de soldadura GTAW. . Pachuca, México: Instituto Tecnológico de Morelia.
- García J. (s.f.). Tensiones Residuales en la Soldadura. Métodos para su Atenuación.
- Gorka R. (Septiembre de 2014). Alivio de tensiones residuales: Tratamiento térmico vs. Vibración. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación.
- Harrington J., Schajer G. (2017). Measurement of Structural Stresses by Hole-Drilling and DIC. Society for Experimental Mechanics 2016.
- Hernandez I., Perez J., Aguilera E. (2013). Determinación de esfuerzos residuales en una estructura Tipo I producidos por soldadura. Memorias del XIX internacional anual de la Somin (págs. 1022-1032). Pachuca: Universidad de Guanajato.
- Hoffmann K. (1989). An introduction to measurements using strain gages. Aslbach: Druckerei Drach.
- Holman J. (1998). Transferencia de calor. Madrid: McGraw-Hill.
- J., G. (s.f.). Tensiones Residuales en la Soldadura. Métodos para su Atenuación. Obtenido de www.monografias.com.
- Jimenez R., Delgado Y. (s.f.). Cálculo de uniones soldadas por el metodo de elementos finitos (MEF). Universidad de Cien Fuegos.
- Kudryavtsev Y. (2008). Residual stress. 371-386. Springer handbook of experimental solid mechanics.
- Lahoz M. (s.f.). Simulación numérica del proceso de soldadura. doi:737-TRE-OP-5222
- Lahoz M. (s.f.). Simulación numérica del proceso de soldadura.
- Leyensetter A. (1974). Tecnología de los oficios metalúrgicos. Revertere.

- Lopez E., Lopez R., Dorado R. (s.f.). Aplicación de correlación digital de imágenes para el analisis de problemas de contacto. 8. España: Asociación Española de Ingeniería Mecánica.
- Lopez G., Montenegro B. (Noviembre de 2008). Estudio de las distorsiones producidas en vigas tipo I fabricadas por soldadura a filete con el proceso GMAW. Quito, Ecuador: Escuela Politecnica Nacional.
- Marin A. (2016). Soldadura y Estructuras. Obtenido de <http://soldadurayestructuras.com/proceso-gmaw.html>
- Masubuchi K. (s.f.). Analytical investigation of residual stresses and distortions due to welding. *Welding Journal*, 525s-537s.
- McGinnis m., Pessiki S . (2005). Application of Three-dimensional Digital Image Correlation to the Core-drilling Method. USA: Department of civil engineering, Mustafa Kemal University.
- Mejia I., Maldonado C., Bedolia A., García C. (2006). Esfuerzos residuales generados en la soldadura de placas de acero inoxidable AISI 304 mediante el proceso SMAW. Morelia, Mexico: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Meléndez A., Quelal V. (2009). Análisis y resultados del comportamiento de los esfuerzos residuales y las deformaciones en juntas soldadas a tope de acero A36, aplicando el método SMAW. Quito, Sangolqui: ESPE Facultad de Ingeniería Mecánica.
- Nelson D., Makino A., Schmidt T. (15 de Octubre de 2005). Residual Stress Determination Using Hole Drilling and 3D Image Correlation. 31–38. Society for Experimental Mechanics 2006. doi:DOI 10.1007/s11340-006-5859-0
- Osmar G. (Febrero de 2016). Determinación de deformaciones y tensiones residuales en tuberías unidas por soldadura utilizando simulación numérica para su aplicación en gasoductos. Lima, Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Oxgasa. (2000). Manual del soldador.
- Pozo J., Garcia J., Ramos F. (2009). Metodología de modelación mediante Ansys de la historia térmica, tensiones y deformaciones de soldadura. *Revista de la Facultad de ingeniera U.C.V*, 13-26.
- Pozo J., Quintero P., Cruz A. (s.f.). Análisis térmico de soldadura GTAW sobre placa de acero AISI 3161, empleando el método de elementos finitos. Santa Clara,

Cuba: Centro de investigaciones de soldadura Universidad Central Martha Abreu.

- Price J., Ziara- Paradowska A., Joshi S. . (02 de Septiembre de 2007). Comparison of experimental and theoretical residual stresses in welds: The issue of gauge volume. USA: Elseiver Ltda.
- Ramos F., Duffus A., Rodriguez M., Diaz C., Pozo J. (20 de septiembre de 2007). Modelo de elementos finitos para determinar el campo de temperatura en una costura filete. Santa Clara, Cuba: Universidas Central Marta Abreu.
- Ramos R. (Diciembre de 2013). Estudio de la soldabilidad de la unión disimilar de un cobre con 5% de Zn con acero estructural ASTM A36. Lima, Perú: Pontifica Universidad Catolica del Perú.
- Ribera J.M., Prado J.M. (s.f.). Modelización térmica y estructural de la zona. Revista de Soldadura N° 199, 185 – 198.
- San Millan F., Armendariz I., Garcia J., Salamanca A. (2008). Simulación por elementos finitos del comportamiento en tolerancia al daño de estructuras aeronáuticas. 8vo congreso Iberoamericano de Ingeniería mecánica.
- Sanzi H. (2009). Evaluación del ciclo térmico de un proceso de soldadura tipo GMAW, en chapas de acero,. Buenos Aires, Argentina: Congreso SAM/CONAMET.
- Schajer G., Winiarski B., Withers P. (s.f.). Hole-Drilling Residual Stress Measurement with Artifact Correction Using Full-Field DIC. 255–265. *Experimental Mechanics* (2013) 53. doi:10.1007/s11340-012-9626-0
- Stamenkovic D., Vasovic I. (2009). Finite Element Analysis of Residual Stress in Butt Welding Two similar plates. *Scientific technical review*, 57-61.
- Sutton M.A., Yan J.H., Tiwari V., H. (2008). The effect of out of plane motion on 2D and 3D digital imagen correlation measurements. *Optics and lasers in engineering*, 746- 757.
- Tufaro L., Burgueño A., Svoboda H. (2012). Tensiones residuales en uniones soldadas por FSW en aluminio 7075-T651. *Soldag*, 327-334.
- Vishay Precision Group. (01 de 11 de 2010). Measurement of residual stresses by the Hole Drilling - Strain gage method.
- Yunus A.,Cengel. (2009). *Termodinamica*. Mexico D.F: Mc GrawHill.

Zhang H., Senn M. , & Sui T. (5-7 de Julio de 2017). On the Upper and Lower Bounds of Correlation Window Size in Digital Image Correlation Analysis. Londres, Inglaterra.

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

UNIDAD DE POSGRADOS

MAESTRÍA EN MÉTODOS MATEMÁTICOS Y SIMULACIÓN NUMÉRICA EN INGENIERÍA

Autor:

Aníbal Martín Pintado Pizarro

Dirigido por:

Marco Esteban Amaya Pinos

DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE LA SOLDADURA EN EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO EN LAS ESTRUCTURAS METÁLICAS POR MEDIO DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Este trabajo presenta principalmente los conceptos básicos del proceso de soldadura eléctrica y los efectos de las ZAT que se producen en el material base por el incremento elevado de temperatura que afecta a la microestructura y a las propiedades mecánicas del material. Luego se plantea el modelo matemático para realizar el análisis térmico y el análisis estructural para el proceso de soldadura GMAW.

Una vez obtenido el modelo matemático, se procedió a modelar y simular la junta a través de un software CAE, para determinar las tensiones residuales que se generan en el proceso de soldadura.

Finalmente se realiza la validación de resultados que se obtuvieron en la simulación tridimensional por medio del método de elementos finitos MEF a través del ensayo mecánico semidestructivo Hole Drilling y por el método óptico de Correlación Digital de imágenes DIC.