

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PACHUCA

ANÁLISIS DE LA DISTORSIÓN DE UN ELEMENTO ESTRUCTURAL SOLDADO MEDIANTE EL PROCESO GMAW

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERA MECÁNICA
PRESENTA:

ING. JOSÉ JUAN DÁVALOS BELTRÁN

DIRECTOR:

Luis Manuel Palacios Pineda Ph.D.

CODIRECTOR:

Enrique Esteban Niebles Núñez Ph.D.

SINODALES:

Mario Emigdio Rodríguez Castillo Ph.D.

Erika Osiris Ávila Dávila Ph.D.

112 Paginas

Pachuca de Soto, Hidalgo Junio de 2017.





División de Estudios de Posgrado e Investigación
Maestría en Ingeniería Mecánica
ACTA

Siendo las 13:00 horas del 24 de Febrero de 2017, reunidos en el aula U6, el Consejo de Posgrado en Ingeniería Mecánica manifiesta la APROBACIÓN del trabajo de Tesis titulado: Análisis de la distorsión de un elemento estructural soldado mediante el proceso GMAW, con el siguiente contenido:

Resumen/Abstract
Nomenclatura
Introducción
Contenido
Índice de cuadros, gráficas y figuras.
1. Marco Teórico
2. Metodología
3. Caracterización de un elemento estructural soldado
4. Resultados experimentales
5. Resultados numéricos y comparación con los resultados experimentales
6. Análisis de la distorsión en base a los ciclos térmicos
Conclusiones
Bibliografía
Apéndices

Para cubrir el requisito correspondiente a la Tesis para que el Ing. José Juan Dávalos Beltrán obtenga el grado de Maestría en Ingeniería Mecánica, bajo la dirección del Dr. Luis Manuel Palacios Pineda, profesor de la Maestría en Ingeniería Mecánica de la División de Estudios de Posgrado e Investigación.

ATENTAMENTE
"EL HOMBRE ALIMENTA EL INGENIO EN CONTACTO CON LA CIENCIA"

EL CONSEJO DE POSGRADO



Dr. Mario Emigdio Rodríguez
Castillo



Dr. Luis Manuel Palacios
Pineda



Dra. Erika Osiris Ayala Dávila



Dr. Ignacio Ramírez Vargas



Dr. Celerino Resendiz Rosas

C.p. Archivo
LMPP/lmpp





Pachuca, Hidalgo, **10/NOVIEMBRE/2017**

OFICIO No. DEPI-170-2017

**C. ING. JOSÉ JUAN DÁVALOS BELTRÁN
PRESENTE**

El que suscribe, Jefe de la División de Estudios de Posgrado e Investigación, le comunica que los miembros de la Comisión Revisora, designada por el Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecánica para examinar su Tesis:

“Análisis de la distorsión de un elemento estructural soldado mediante el proceso GMAW”

se han reunido, y después de intercambiar opiniones manifiestan su aprobación de la Tesis, en virtud que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes y en consecuencia, se autoriza su impresión.

Sin otro particular por el momento, quedo de Usted.

ATENTAMENTE

“EL HOMBRE ALIMENTA EL INGENIO EN CONTACTO CON LA CIENCIA”



DR. MARIO EMIGDIO RODRÍGUEZ CASTILLO
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

C.p. Coordinación de Ingeniería Mecánica
Archivo
MERC/lmpp

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL
I.T. PACHUCA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN



RESUMEN

En esta tesis se estudia la distorsión generada durante la soldadura de elementos estructurales mecano-soldados, que se presenta como un problema predominante en la industria metal mecánica. Se analizan juntas de filete para unir dos placas de acero de bajo carbono ASTM-A36 mediante el proceso de soldadura por arco de metal y gas (GMAW, por sus siglas en inglés). Con la finalidad de obtener una mayor uniformidad sobre el proceso de soldadura y asegurar la correcta penetración de la misma se realiza un estudio metalográfico a la unión soldada. Se consideran diferentes secuencias de soldadura en dos tipos de probeta, se registran cuidadosamente las variables del proceso tales como tiempo de soldadura, voltaje, corriente media. Además, se mide tanto la temperatura como la distorsión del material base. Adicionalmente, se construye un modelo de elemento finito para estimar la distribución de temperatura en el material base y compararla con la temperatura obtenida experimentalmente. Por último, se obtiene la secuencia de soldadura que genera la menor distorsión y se puede concluir que las estimaciones numéricas de temperatura son muy cercanas a las medidas experimentalmente.

ABSTRAC

This thesis studies the distortion generated during the welding of mechanized welded structural elements, which presents itself as a predominant problem in the metalworking industry. Fillet joints are tested for joining two ASTM-A36 low carbon steel plates through the metal and gas arc welding (GMAW) process. In order to obtain a greater uniformity on the welding process and to ensure the correct penetration of the same, a metallographic study is carried out on the welded joint. Different welding sequences are considered in two types of specimen, process variables such as welding time, voltage, average current are carefully recorded. In addition, both the temperature and the distortion of the base material are measured. Additionally, a finite element model is constructed to estimate the temperature distribution in the base material and to compare it with the temperature obtained experimentally. Finally, the welding sequence that generates the least distortion is obtained and it can be concluded that the numerical temperature estimates are very close to the experimental measurements.

Dedicatoria a mis profesores:

El termino gratitud, no siempre es asociado o familiarizado con los maestros, estos en la mayoría de ocasiones son vistos con desprecio y asociados con personas que castigan o nos obligan a realizar actividades extracurriculares que causan banalidad en la optimización de nuestro tiempo; pero la realidad es que estas personas son sumamente importantes en nuestro desarrollo como personas, y especialmente en mi caso mis maestros fueron cruciales para la realización de esta tesis.

Quiero agradecerles a ellos por cada detalle y momentos dedicados para aclarar cualquier tipo de duda que me surgieran, agradecerles por la caridad y exactitud con la que me enseñaron cada clase, discurso y lección.

Luis Manuel Palacios Pineda Ph.D.

Enrique Esteban Niebles Núñez Ph.D.

Roque Julio Hernández Donado Ph.D.

Gracias a mis maestros por haber elegido ser maestros, gracias a mis maestros por haberme enseñado tan bien y por haberme permitido el desarrollo de esta tesis. Gracias maestros y le doy gracias a Dios por haberlos puesto en mi camino.

Agradeciendo todo el apoyo tanto a las dos instituciones como el Instituto Tecnológico de Pachuca (México) y la Universidad Autónoma del Caribe (Barranquilla, Colombia) por el apoyo incondicional que me brindaron.

Dedicatoria a mis padres

Las razones que acabo de expresar, dedico esta tesis a mis padres, doy gracias a Dios por permitirme disfrutar cada momento de mi vida al lado de mis padres, agradezco a la vida por permitirme tener tan excelentes padres, y de nuevo agradezco a Dios por hacerme el hijo más feliz de este mundo. Hoy concluye todo el esfuerzo y dedicación que demando la realización de esta tesis, pero el camino continúa por la vida, y dentro de este camino, tengo claridad y certeza de que mis padres me apoyarán y querrán lo mejor para mi hasta el último día de sus vidas.

Gracias mamá y papá.

Didicatoria a mi esposa

Gracias a mi esposa por entenderme en todo, gracias a ella porque en todo momento fue un apoyo incondicional en mi vida, fue la felicidad encajada en una sola persona, fue mi todo reflejado en otra persona a la cual yo amo, y por la cual estoy dispuesto a enfrentar todo y en todo momento.

Este mismo furor y pasión con la que describo el perfecto e incondicional apoyo de mi esposa, fue el mismo con el que desarrollé cada parte y punto de esta tesis, y por esto mismo puedo afirmar y pronosticar su éxito y agrado para cada uno de sus lectores.

Mis sinceras gracias para mi esposa, nunca podré terminar de agradecerle por tantas ayudas.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
1 MARCO TeORICO.....	5
1.1 Análisis del estado del arte y la técnica	5
1.2 Estado del Arte.....	5
1.3 Criterios básicos para una adecuada soldadura en aceros.....	7
1.3.1 Proceso de Soldadura GMAW para Acero bajo en Carbono	7
1.3.2 Mecanismos de Transferencia del metal	8
1.3.3 Ventajas y Limitaciones del Proceso de Soldadura GMAW.....	9
1.3.4 Acero Bajo en Carbono ASTM-A36.....	10
1.3.5 Gases de protección para el Acero Bajo en Carbono ASTM-A36.....	11
1.4 Parámetros del Proceso de Soldadura	16
1.4.1 Relación entre los parámetros.....	17
1.4.2 Extremo libre del alambre electrodo (“stick-out”)	17
1.4.3 Velocidad de desplazamiento	17
1.4.4 Soldabilidad.....	18
1.4.5 Polaridad.....	19
1.4.6 Ángulo de inclinación de la pistola (ángulo de desplazamiento).....	19
1.5 Distorsión Producida por el Proceso de Soldadura.....	19
1.5.1 Tipos de Distorsión.....	20
1.5.2 Tipos de Unión	21
1.5.3 Análisis de la distorsión en junta soldadas en acero al carbono.....	21
1.6 Evaluación de una junta Soldada Mediante el Análisis Metalográfico	21
1.7 Uso de la técnica por Elementos Finitos para el análisis de una junta soldada	22
1.7.1 Efectos de la Temperatura	24
1.7.2 Modelado de la fuente de Calor.....	25
1.7.3 Densidad	25
1.7.4 Módulo de Young.....	25
1.7.5 Capacidad Térmica y Calor Especifico.	25
1.7.6 Módulo de Poisson.....	26
1.7.7 Expansión Térmica.....	27

2	METODOLOGÍA.....	28
2.1	Desarrollo experimental.....	29
2.1.1	Determinación de la identidad del material base.....	30
2.1.2	Análisis del Metal Base.....	30
2.1.3	Diseño y Preparación de juntas	33
2.1.4	Selección de los parámetros del aporte térmico	34
2.1.5	Definición de procedimiento de soldadura y aporte térmico aplicable	36
2.1.6	Determinación experimental de secuencias de soldadura con menores efectos sobre la distorsión.....	38
2.1.7	Análisis de ciclos y aporte térmico.....	39
2.2	Configuración de la Simulación.....	41
2.2.1	Desarrollo del modelo para el análisis numérico	46
2.2.2	Modelo Térmico	47
2.2.3	Simulación numérica con la herramienta ANSYS	47
3	CARACTERIZACIÓN DE UN ELEMENTO ESTRUCTURAL SOLDADO	48
3.1	Determinación de la identidad del material base	48
3.1.1	Análisis Microestructural de Metal Base.....	48
3.1.2	Perfil de dureza del Metal ASTM A-36	49
3.2	Calificación del procedimiento de soldadura.....	50
3.2.1	Criterios de Aceptación de la soldadura	51
3.2.2	Ensayo de Macro-ataque	52
4	RESULTADOS EXPERIMENTALES	53
4.1	Soldaduras Definitivas	53
4.1.1	Análisis Experimental de las Distorsiones	54
4.1.2	Análisis de Ciclos Térmicos	59
5	RESULTADOS NUMÉRICOS Y COMPARACIÓN CON LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES	67
5.1	Modelación Numérica.....	67
5.2	Desarrollo de los Modelos	67
5.3	Modelado en ANSYS	68
5.4	Validación de la Simulación	69

6	ANÁLISIS DE LA DISTORSIÓN EN BASE A LOS CICLOS TÉRMICOS	80
7	Discusión de Resultados.....	90
	CONCLUSIONES.....	91
	REFERENCIAS	92
	ANEXO	94
	A) Cartel Sobre El Análisis de la Distorsión de un Elemento Estructural Soldado	95
	B) Graficas de Velocidad de Calentamiento del Elemento Recto en Junta en T con la Primera Secuencia Con el Código D3S1AR	97
	C)Graficas de Velocidad de Calentamiento del Elemento Recto en Junta en T con la Segunda Secuencia Con El Código D3S2AR.....	99
	D) Graficas de Velocidad de Calentamiento del Elemento Angular en Junta en T con la Primera Secuencia con el Código D3S1AA	101
	E) Graficas de Velocidad de Calentamiento del Elemento Angular en Junta en T con la Segunda Secuencia Con El Código D3S2AA	103

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.-Descripción del Proceso de Soldadura GMAW [5].....	8
Figura 2.-Perfiles de contorno de cordón y penetración por varios gases de protección [12].....	12
Figura 3.-La influencia de la Variación de la distancia entre el tubo de contacto y la pieza	18
Figura 4.-Tipos por Distorsión por Soldadura [19].	21
Figura 5.- Uniones básicas o juntas de Soldadura [17]	21
Figura 6.-Esquema principal de la metodología empleada para el proceso de Investigación	29
Figura 7.-Soporte Principal de frenado	30
Figura 8.-Equipo y muestras extraídas	31
Figura 9.-Equipo Pulidora Metalográfica de 2 paños FORCIPOL	31
Figura 10.-Microscopio Óptico	33
Figura 11.-Modelos Estructurales	34
Figura 12.-Adquisición de datos	34
Figura 13.-Máquina de soldar para el proceso GMAW	35
Figura 14.-Esquema del proceso de soldadura de un elemento estructural soldado	38
Figura 15.-Secuencias Determinadas para el proceso GMAW	39
Figura 16.-Análisis de ciclos Térmicos.....	40
Figura 17.- Ciclos térmicos en tiempo real en base a las soldaduras en junta en T	41
Figura 18.-Flujo de calor.....	43
Figura 19.-flujo de calor.....	44
Figura 20.-Pasajes de enfriamiento	44
Figura 21.-Microestructura del Metal Base.....	49
Figura 22.a)Durómetro Zwick/Roell, 22b) Identaciones aleatorias al material	49
Figura 23.-Grafica de dureza.....	50
Figura 24 a). -Elemento Estructural en junta en T y b).- Criterio de Cortes	51
Figura 25.-Penetración del proceso GMAW	52
Figura 26.-Medidor de caratula.....	54
Figura 27.- Primera Secuencia y obtención de distorsiones por el proceso de soldadura GMAW...	56
Figura 28.-Segunda Secuencia de obtención de distorsiones por el proceso de soldadura GMAW.	57
Figura 29.-Primera Secuencia de obtención de distorsiones por el proceso de soldadura GMAW..	58
Figura 30.-Segunda Secuencia de obtención de distorsiones por el proceso de soldadura GMAW.	59
Figura 31.-Esquema de conexión de datos.....	60
Figura 32.-Distribución de termopares y secuencia de D3S1AR.....	61
Figura 33.-Ciclos térmicos D3S1AR	61
Figura 34.-Distribución de temperaturas del elemento estructural con el código D3S1AR	62
Figura 35.-Velocidad de calentamiento del elemento estructural con el código D3S1AR	62
Figura 36.- Elemento Estructural soldado con termopares por el Proceso GMAW.....	62
Figura 37.-Distribución de termopares de D3S2AR	63
Figura 38.-Ciclos térmicos de D3S2AR.....	63
Figura 39.-Distribuciones de temperatura del Elemento con el código D3S2AR.....	63
Figura 40.- Velocidades de calentamiento del Elemento con el código D3S2AR.....	63
Figura 41.-Distribución de termopares D3S1AA.....	64
Figura 42.-Ciclos Térmicos.....	64
Figura 43.-Distribución de Temperaturas del Elemento con el código D3S1AA.....	64
Figura 44.-Elemento Estructural Angular Soldado	64
Figura 45.- Velocidad de calentamiento del Elemento con el código D3S1AA	65
Figura 46.-Distribución de termopares D3S2AA.....	65
Figura 47.-Ciclos Térmicos.....	65
Figura 48.-Distribución de Temperaturas del Elemento Estructural con el código D3S2AA	66
Figura 49.-Velocidad de Calentamiento del Elemento Estructural con el código D3S2AA.....	66

Figura 50.- Modelos Estructurales realizados en SolidWorks	67
Figura 51.-Modulo Workbench.....	68
Figura 52.-a) modelo Recto y b) Modelo Angular.....	68
Figura 53.-Distribución de temperaturas en los modelos estructurales analizados a) Modelo Recto y b) Modelo Angular	69
Figura 54.-Distorsión Obtenida de la Placa Recta en Junta en T con el código D3S1AR.....	80
Figura 55.-Distribución de Temperatura de la Placa Recta en Junta en T con el código D3S1AR ..	81
Figura 56.-Velocidad de Calentamiento de la Placa Recta en Junta en T con el código D3S1AR...	81
Figura 57.-Velocidad de Enfriamiento de la Placa Recta en Junta en T con el código D3S1AR	81
Figura 58.-Gradiente Espacial de las distancias de los Termopares de T3-T11, T3-T9	82
Figura 59.-Distorsión Obtenida de la Placa Recta en Junta en T con el código D3S2AR.....	83
Figura 60.-Distribución de Temperatura de la Placa Recta en Junta en T con el código D3S2AR ..	83
Figura 61.- Velocidad de Calentamiento de la Placa Recta en Junta en T con el código D3S2AR..	83
Figura 62.-Velocidad de Enfriamiento de la Placa Recta en Junta en T con el código D3S2AR	84
Figura 63.-Gradiente Espacial de las distancias de los Termopares de T3-T11, T3-T9	84
Figura 64.-Distorsión Obtenida de la Placa Recta en Junta en T con el código D3S1AA.....	85
Figura 65.-Distribución de Temperatura de la Placa Angular en Junta en T con el código D3S1AA	85
Figura 66.-Velocidad de Calentamiento de la Placa Angular en Junta en T con el código D3S1AA86	86
Figura 67.-Velocidad de Enfriamiento de la Placa Angular en Junta en T con el código D3S1AA. 86	86
Figura 68.-Gradiente Espacial de las distancias de los Termopares de T3-T11, T3-T9	86
Figura 69.-Distorsión Obtenida de la Placa Recta en Junta en T con el código D3S2AA.....	87
Figura 70.-Distribución de Temperatura de la Placa Recta en Junta en T con el código D3S2AA..	87
Figura 71.-Velocidad de Calentamiento de la Placa Angular en Junta en T con el código D3S2AA87	87
Figura 72.-Velocidad de Enfriamiento de la Placa Angular en Junta en T con el código D3S2AA 88	88
Figura 73.-Gradiente Espacial de las distancias de los Termopares de T3-T11, T3-T9	88

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.- Composición Química [15].....	11
Tabla 2.-Reactivo para atacar el acero bajo en carbono [29]	32
Tabla 3.-Valores de Dureza por Vickers en el metal base. Valores obtenidos con una carga de 3000kgf durante 10 segundos.....	50
Tabla 4. Parametrización y cálculo de los aportes térmicos (HI). Im= corriente media promedio. V= voltaje promedio. Vs= velocidad de soldadura promedio. HI = aporte térmico promedio. η = eficiencia.	50
Tabla 5.-Datos obtenidos de pruebas finales en base a su Parametrización y cálculo de los aportes térmicos (HI). Im= corriente media promedio. V= voltaje promedio. Vs= velocidad de soldadura promedio. HI = aporte térmico promedio. η = eficiencia.	53

Abreviaturas

Ar=Argón.

ASTM=American Society for Testing Materials.

AWS=American Welding Society.

C= Calor específico.

CO₂= Bióxido de carbono

Cu=Cobre.

GMAW= Gas Metal Arc Welding.

Ni=níquel

ρ =Densidad

F=Fosforo

Si= Silicio

S=Azufre

ZAT= Zona afectada Térmicamente

MB= Metal Base

INTRODUCCIÓN

La presente investigación se refiere al análisis de la distorsión, es un tema importante en donde son problemas frecuentes que ocurren dentro de la industria metalmeccánica sobre la distorsión. Se presenta en los materiales que son soldados por cualquier proceso de soldadura, sin embargo, la investigación estará enfocada en un acero bajo en carbono ASTM-A36 por el proceso de soldadura GMAW por sus siglas en inglés (Gas Metal Arc Welding), se estará analizando el comportamiento con base a las variables obtenidas y como consecuencia genera una distorsión en el material por el proceso, puede ser producido producto por la temperatura aplicada en la unión de un elemento estructural.

El proceso de soldadura es importante en la industria metal mecánica en donde se determina si el procedimiento es correcto de acuerdo con las tolerancias dadas dentro de los límites aceptables, porque si se rebasan los límites de la distorsión generada, los costos de producción serán elevados, en donde se estará analizando las variables del proceso.

Principalmente se realizará un modelo de elementos finitos para representar ciertos aspectos del comportamiento del sistema, que en el contexto está compuesto por el problema físico sobre la distorsión por soldadura y así poder simular sus distribuciones de Temperatura en ANSYS y poder discutir dichos resultados y llegar un resultado deseable.

Planteamiento del Problema

En la industria metalmeccánica, en la fabricación de productos soldados uno de los problemas frecuentes es la distorsión de los productos por efecto de inadecuados procedimientos de soldadura, inapropiadas secuencias de soldadura o ausencia de las mismas y restricciones presentes durante la soldadura. La distorsión es producto de las deformaciones generadas en las piezas durante el proceso de soldadura, por efectos de la dilatación y contracción no uniforme del metal de soldadura y del metal base a lo largo del ciclo de calentamiento y enfriamiento [1, 2]. A mayor aporte térmico y menor control de las deformaciones, la distorsión de los productos es mayor [3, 1]. Los efectos ocasionados por la distorsión son la pérdida de tolerancias geométricas dentro de sus límites aceptables de los elementos soldados, como consecuencia se generan grandes costos y pérdidas en los procesos de producción ocasionando generar reprocesos que sean viables y factibles para la fabricación de elementos [1].

Es importante seleccionar el proceso de soldadura utilizado en función del material, de las condiciones de trabajo y la influencia del aporte térmico sobre cambios microestructurales y de las propiedades mecánicas [3, 4]. Existen procesos que aportan mayor o menor régimen de temperatura de mayor a menor aporte térmico de los procesos de soldaduras, en

donde se describen cada uno de ellos son: con aporte alto la Soldadura por Arco Sumergido (SAW), Electroescoria por Soldadura (ESW), seguido con menor aporte térmico por los procesos de Soldadura por Arco con núcleo de fuente (FCAW), Soldadura por Arco de metal y gas (GMAW), Soldadura por Arco de Gas Tungsteno (GTAW), y por último con aporte bajo los procesos de CMT e híbridos con láser [1, 2, 5]. En la industria uno de los más comúnmente utilizados en aplicaciones estructurales es el proceso de soldadura GMAW que emplea un arco entre un electrodo de metal de aporte y el charco de soldadura. Las variables que se deben controlar durante el proceso y que determinan el aporte térmico y flujo de calor en el material durante la soldadura son: Voltaje, longitud libre del alambre, Intensidad de corriente, velocidad de soldadura, gas de protección, eficiencia del proceso, etc. [2, 6]

En la empresa Bombardier Transportation México S.A. de C.V. dedicada a la industria ferroviaria, un caso específico de distorsión de elementos estructurales soldados se presenta en el sistema principal de frenado del tren motriz en la fabricación y ensamble de trenes neumáticos. Los ingenieros de la empresa consideran que este problema de distorsión esto puede ser ocasionado entre otros por: El procedimiento de soldadura utilizado, la geometría de junta en filete y/o la ausencia o inadecuada secuencia de soldadura. Lo anterior genera incertidumbre en el proceso de fabricación y ensamble, incrementos en los costos en la producción y pérdidas económicas por reprocesos constantes en el sistema de producción del tren. Para la empresa esto es un problema que requiere ser corregido o minimizado su efecto.

Un análisis de la soldadura a través del método de elementos finitos (MEF), requiere que el proceso se analice de forma no lineal ocupando un sistema de ecuaciones por valores desconocidos ya que el mismo depende del tiempo y de la variación de las propiedades del material con respecto a la temperatura [7]. El MEF ha adquirido una gran importancia en la solución de problemas ingenieriles, físicos, etc, en donde nos permite resolver casos que hasta hace poco tiempo eran prácticamente imposibles de resolver por métodos matemáticos tradicionales [8].

Para el modelado de cualquier problema de análisis del comportamiento estructural en productos soldados, deben definirse los parámetros geométricos [9]. Un diseño geométrico correcto implica un adecuado modelo físico, que desde aquí se parte para elegir la forma de los elementos, las densidades de mallas y a su vez introducir en el caso específico de la modelación de la soldadura, la carga térmica asociada a las curvas de tiempo, aspecto esencial para lograr la traslación del foco térmico según sea la velocidad de soldadura [7]. Esta circunstancia obligaba, en sentido estricto, a realizar prototipos, ensayarlos e ir realizando mejoras de forma iterativa, lo que traía consigo un elevado costo tanto económico como en tiempo del desarrollo del prototipo [8]. Con el MEF es posible realizar,

a menores costos y tiempos, modelos matemáticos de cálculo del sistema real; siendo más fácil y económico ajustar parámetros de diseño, que realizar grandes cambios durante la fase de fabricación del prototipo. Sin embargo, no deja de ser un método aproximado de cálculo debido a las hipótesis y restricciones básicas del método. Los prototipos, por lo tanto, siguen siendo necesarios y complementarios, pero en menor número, en donde el primero puede acercarse bastante más al diseño óptimo [8].

Para realizar el modelo, se debe recurrir al análisis de la convergencia para seleccionar el tamaño correcto de los elementos y de este modo obtener el mínimo de error en los resultados sobre la distorsión. La convergencia define que, al refinar progresivamente la malla, la solución numérica se aproxima, tanto como se desee, a la solución exacta; este es un factor que debe garantizar, que los resultados del cálculo no dependan de la densidad del mallado en donde se debe de tomar en consideración la transferencia de calor así como la variación de las propiedades del material en función de la temperatura, con el propósito de emplear los resultados para prever posibles problemas de fabricación y aplicación de piezas obtenidas mediante este proceso [7].

Bajo las condiciones previamente expuestas surgen los siguientes interrogantes de investigación:

1. ¿Cómo influye la magnitud del aporte térmico y flujo de calor la distorsión que se pueda presentar en la soldadura de elementos estructurales en juntas de filete?
2. ¿Cómo influye aplicar secuencias de soldadura en el nivel de distorsión de la junta soldada en filete en aceros en carbono?
3. ¿Cómo controlar la distorsión presente en juntas soldadas de filete producto por el proceso de soldadura GMAW?

Hipótesis

Las secuencias aplicadas en los elementos estructurales en junta en T aplicados en el acero bajo en carbono A-36 sufren una mayor distorsión por un mal manejo de las variables por el proceso de soldadura GMAW, lo que se trata en esta investigación es poder determinar las variables correctas en la secuencia para obtener una menor distorsión con el proceso, al igual de la misma manera obtener sus distribuciones de temperatura tanto experimental y numérico.

Objetivo General

Evaluar el comportamiento a la distorsión de un elemento estructural soldado en acero al carbono ASTM A-36, en junta de filete con proceso GMAW, mediante análisis experimental y obtener numéricamente las comparaciones de los ciclos térmicos.

Objetivos Específicos

1. Definir un procedimiento de soldadura en junta de filete, posición 2F, que garantice experimentalmente la integridad de soldadura evaluada por inspección visual, macroataque.
2. Evaluar experimentalmente la distribución de temperatura y el comportamiento a la distorsión, en las direcciones transversal y longitudinal del elemento.
3. Evaluar por análisis de elementos finitos la distribución de temperatura en el elemento estructural soldado.

Justificación

En la actualidad la industria metalmecánica se han desarrollado investigaciones enfocados al problema de las distorsiones en elementos estructurales soldados y se han estado desarrollando procesos de soldadura en base a experiencias previas llevadas a cabo a través del conocimiento de los ingenieros en general que han dado buenos resultados y aun se continúa realizando. La siguiente investigación es del análisis de distorsión de un elemento estructural soldado por junta de filete con proceso GMAW en el cual se pretende conseguir una distorsión mínima con las pruebas experimentales en base a la secuencia realizada, de este modo se realizar una simulación numérica en base a la distribución de la Temperatura generada del elemento soldado y modelarlo en ANSYS.

1

MARCO TEORICO

1.1 Análisis del estado del arte y la técnica

En esta etapa de la investigación fue desarrollada a partir de la obtención de información sobre los tipos de deformaciones y análisis de la distorsión, distribución de temperaturas por soldadura, cargas térmicas, algoritmo y modelación numérica por elementos y diferencias finitas, secuencias de soldadura, normativa aplicable. Para ello, se realiza un análisis del estado del arte y la técnica, con la información registrada en journals y revistas especializadas y seriadas, catálogos de fabricantes, blogs de expertos, etc., verificando que fuera coherente y pertinente con el tema de estudio.

1.2 Estado del Arte

El objetivo de este estudio es investigar los efectos de la transformación de fase de estado sólido en la soldadura tensiones residuales y distorsión en aceros al carbono medio bajo en carbono al igual que las distribuciones de temperatura [10].

Debido a la naturaleza del proceso de la soldadura que implica la generación de calor localizada de la fuente de calor en las estructuras soldadas, y su enfriamiento rápido subsecuente, los problemas tales como tensiones residuales y distorsiones de estructuras soldadas siguen siendo grandes desafíos a los profesionales de la soldadura, diseñadores [11].

Las distorsiones de soldadura en una estructura o componente pueden resultar en la degradación de sus tolerancias dimensionales, seguida de costosas rectificaciones y posibles retrasos en la línea de producción. Además, las tensiones residuales de la soldadura pueden influenciar el funcionamiento de la fatiga y la fuerza de pandeo del producto. Por, la comprensión y el control de la formación de soldadura inducida las distorsiones y las tensiones residuales son de suma importancia en la industria manufacturera.

En la literatura disponible relativamente menos atención se da a la última Categoría de simulaciones especialmente a la influencia de la termomecánica propiedades de diferentes grados de acero en la soldadura residual tensiones y distorsiones [12].

En los últimos años, los investigadores han elaborado diversos aspectos e intereses en el modelado numérico de la soldadura de tensiones residuales y distorsiones, sobre todo utilizando el método de elementos finitos. Teng & Lin (1998) predijo las tensiones residuales durante la soldadura por arco de un paso en la placa de acero utilizando el software ANSYS y discutió los efectos de la velocidad de viaje, tamaño de la muestra, las restricciones mecánicas externas y el precalentamiento de las tensiones residuales. Tsai et al. (1999) estudiaron los mecanismos de distorsión y el efecto de la secuencia de soldadura en la distorsión [11].

Durante las últimas tres décadas, con la evolución de la informática capacidades, el método del elemento finito (FE) se ha demostrado como un herramienta alternativa y aceptable para la predicción de la soldadura residual tensiones y distorsiones. Las simulaciones de FE para la soldadura proceso se puede dividir en tres categorías, aunque todo un motivo común que es la evaluación de las tensiones residuales de soldadura y distorsiones. Las tres categorías son las siguientes:

1. las simulaciones en las cuales la influencia de las especificaciones de proceso de la soldadura (entrada del calor, grueso de la placa, secuencia etc.) se investigan.
2. las simulaciones en las que se encuentra una nueva estrategia numérica se utiliza para obtener los resultados con una precisión aceptable, pero con menos tiempo computacional.
3. las simulaciones en las cuales los parámetros de la entrada del FEM (tamaño de acoplamiento, elemento Mecanografía, modelo de la fuente de calor, características materiales y material modelos etc.) son manipulados para estudiar su influencia sobre tensiones residuales y distorsiones.

Un método de elementos finitos elástico (FEM) para predecir soldar distorsiones de estructuras soldadas grandes es desarrollado. En el FEM elástico propuesto, la deformación inherente se usa para modelar la deformación local inducida soldándose, y el elemento de la interfaz es introducido para simular el proceso unitivo y la corrección de la abertura entre las partes soldadas. En este estudio, nuestro énfasis es en el que se enfocó la atención examinar la influencia de abertura inicial en la distorsión final de la soldadura. Primera, la utilidad del método propuesto se verifica por el experimento con estructuras soldadas simples. En segundo lugar, la distorsión de la soldadura de una estructura curvada

asimétrica del plato sin abertura inicial es predicha usando a este FEM elástico. Finalmente, la influencia de las aberturas iniciales en la distorsión final de la soldadura [13]

Los ciclos térmicos complejos de la calor y enfriamiento encontrados en las soldaduras conducen a tensiones térmicas transitorias e incompatibles con las producidas en la región cerca de la soldadura. Después de que los ciclos del calor de la soldadura disminuyeran, las tensiones incompatibles permanecen y provocando tensiones bloqueadas o denominadas con frecuencia como tensiones residuales de la soldadura [11].

En base a las investigaciones anteriores nos podemos dar cuenta de algo importante de que están basadas sobre el análisis de la distorsión en juntas rectas en T y tanto a la distribución de temperatura tomando un punto correspondiente en dichos estudios, sin embargo esta tesis de investigación trata sobre una junta en T angular ya que no hay estudios en este tipo de juntas angulares, sin embargo se analizara sus distorsiones de ambos elementos estructurales en junta en T como la comparación de las distorsiones experimentales, también se analizara la distribución de Temperatura de la junta recta en T como la angular obtenidas experimentalmente y numéricamente por medio de ANSYS ya que los estudios de la comparaciones de temperatura solamente analizan un punto, ya que esto analiza ciertos puntos específicos sobre su distribución de temperatura en el metal base y saber cómo es el comportamiento de cada uno de ellos en base a las secuencias que se analizaron.

1.3 Criterios básicos para una adecuada soldadura en aceros

Los criterios se toman en cuenta en base al estudio realizado y a las investigaciones hechas anteriormente sobre los procesos de soldadura y determinar los criterios adecuados para una buena soldadura ocupando el proceso de soldadura GMAW.

1.3.1 Proceso de Soldadura GMAW para Acero bajo en Carbono

EL proceso de soldadura GMAW, emplea un arco entre un electrodo continuo de metal de aporte y el charco de soldadura. El proceso se realiza bajo un escudo de gas suministrado externamente y sin aplicación de presión[2]. Este proceso GMAW puede operar en modalidades mecanizada, semiautomática o automática. Todos los metales de importancia comercial como el acero bajo en carbono, el acero baja aleación de alta resistencia mecánica y en todos los metales se pueden soldar en cualquier posición con este proceso escogiendo el gas protector electrodo y variables de la soldadura apropiada, el proceso se describe en la Figura 1 en donde se describen las partes del proceso de soldadura [6, 2].

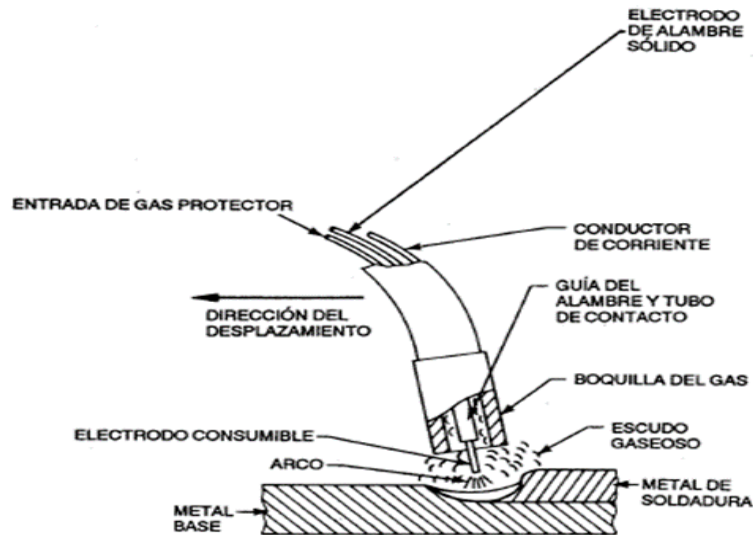


Figura 1.-Descripción del Proceso de Soldadura GMAW [5].

1.3.2 Mecanismos de Transferencia del metal

Las características del proceso GMAW [4, 2] es en términos de los tres mecanismos básicos empleados para transferir metal del electrodo al trabajo:

- 1.-Transferencia en cortocircuito
- 2.-Transferencia Globular
- 3.-Transferencia por aspersion

El tipo de transferencia está [2, 6] determinado por varios factores, entre los más influyentes estos están:

- 1.- Magnitud y tipo de corriente de soldadura.
- 2.-Diámetro del electrodo
- 3.-Composicion del electrodo
- 4.-Extension del electrodo
- 5.-Gas protector

1.3.2.1 Transferencia en corto circuito

Este tipo de transferencia abarca el intervalo más bajo de corrientes de soldadura y de diámetros de electrodo asociados al proceso GMAW. La transferencia en cortocircuito produce un charco de soldadura pequeño, de rápida solidificación, que generalmente es apropiado para unir secciones delgadas, soldar fuera de posición y tapan aberturas de raíz

anchas. El metal se transfiere del electrodo al trabajo solo durante el periodo en que el primero está en contacto con el charco de soldadura, no se transfiera metal a través del espacio del arco [2, 4].

El electrodo hace contacto con el charco de soldadura a razón de 20 a más de 200 veces por segundo la secuencia de sucesos durante la transferencia de metal, y la corriente y el voltaje correspondientes. [4]

1.3.2.2 Transferencia Globular

En la transferencia globular, se utilizan gases ricos en bióxido de carbono y los glóbulos se impulsan mediante las fuerzas de transferencia del arco eléctrico del metal, lo que produce bastantes salpicaduras. Se usan altas corrientes que posibilitan una mayor penetración de la soldadura y mayor velocidad que la que se alcanza con la transferencia por aspersion. Es común unir las piezas más pesadas por medio de este método [2].

1.3.2.3 Transferencia por Aspersion

Por aspersion, pequeñas gotas de metal fundido del electrodo pasan al área de soldadura con una frecuencia de varios cientos por segundo. La transferencia no tiene salpicaduras y es muy estable. Se utilizan altas corrientes, tensiones directas y electrodos de gran diámetro con argón, o con una mezcla de gas rica en argón, como gas de protección. Se puede reducir la corriente promedio necesaria para este proceso mediante el uso de un arco por pulsos, que sobrepone pulsos de gran amplitud a una corriente baja y estable. El proceso puede utilizarse en todas las posiciones de soldar.

1.3.3 Ventajas y Limitaciones del Proceso de Soldadura GMAW

El proceso de soldadura GMAW es uno de los mejores, cuenta con grandes ventajas frente a otros procesos de soldeo entre los que destacan sus ventajas y las limitaciones que tiene como se describen.

1.3.3.1 Ventajas

Las ventajas [14, 2, 4] del proceso GMAW son:

- 1.-Es el único proceso de electrodo combustible que puede servir para soldar todos los metales y aleaciones comerciales.
- 2.-GMAW no tiene la restricción de tamaño de electrodo limitado que se presenta con la soldadura por arco de metal protegido.
- 3.-Puede soldarse en todas las posiciones, algo que no es posible con la soldadura de arco sumergido.

- 4.-Se logran tasas de posición bastante más altas que con la soldadura por arco de metal protegido.
- 5.-Las velocidades de soldadura son más altas que con soldadura por arco de metal protegido gracias a la alimentación continua del electrodo y a las mayores tasas de deposición del metal de aporte.
- 6.-Como la alimentación de alambre es continua, es posible depositar soldaduras largas sin parar.
- 7.-Cuando se usa transferencia por aspersion, es posible lograr mayor penetración que con la soldadura de arco protegido, lo que puede permitir el uso de soldaduras de filete más pequeñas para obtener una resistencia mecánica equivalente.
- 8.-Casi no se requiere limpieza después de la soldadura porque no se produce mucha escoria.

1.3.3.2 Limitaciones de GMAW

Las limitaciones [4, 6] son del proceso GMAW son:

- 1.-El equipo de soldadura es más complejo, más costoso y menos transportable [4, 6].
- 2.-GMAW es más difícil de usar en lugares de difícil acceso porque la pistola soldadora es más grande que un portaelectrodos.
- 3.-el arco de soldadura debe protegerse contra corrientes de aire que puedan dispersar al gas protector. Esto limita las aplicaciones en exteriores a menos que se coloquen barreras protectoras alrededor del área de soldadura.
- 4.-Los niveles relativamente altos de calor radiado y la intensidad del arco pueden hacer que los operadores se resistan a utilizar el proceso.

1.3.4 Acero Bajo en Carbono ASTM-A36

El acero es una aleación relativamente compleja y los aceros comerciales disponibles no son aleaciones binarias de hierro carbono, dado que contienen otros elementos secundarios presentes debido a los procesos de fabricación. En estas condiciones será necesario considerar dos tipos fundamentales de acero [15].

El acero estructural A36 o acero estructural con carbono, es hasta hace poco tiempo, el acero estructural básico utilizado más comúnmente en construcciones de edificios y puentes [15].

Acero ASTM A36. Es un acero estructural al carbono, utilizado en construcción de estructuras metálicas, puentes, torres de energía, torres para comunicación y edificaciones remachadas, atornilladas o soldadas, herrajes eléctricos y señalización como se muestra en la siguiente Tabla 1 su composición química [15].

Tabla 1.- Composición Química [15].

Acero bajo en carbono ASMT-A36				
C	Cu	P	S	Si
0.26%	.20%	.04%	.05%	.40%

Como la mayoría de los aceros, el A36, tiene una densidad de 7850 kg/m^3 (0.28 lb/in^3). El acero A36 en barras, planchas y perfiles estructurales de sus propiedades mecánicas con espesores menores de 8 pulga (203,2 mm) tiene un límite de fluencia mínimo de 250 MPA (36 ksi), y un límite de rotura mínimo de 410 MPA (58 ksi). Las planchas con espesores mayores de 8 plg (203,2 mm) tienen un límite de fluencia mínimo de 220 MPA (32 ksi), y el mismo límite de rotura [15].

Los aceros al carbono y de baja aleación presentan una variedad amplia de composición y propiedades mecánicas que permiten cubrir un gran campo de aplicaciones estructurales.

Las clasificaciones pueden estar vinculadas con: formas de suministro, propiedades mecánicas, composición química, microestructuras, usos o aplicaciones etc., y pueden estar superpuestas en composición química [15].

1.3.5 Gases de protección para el Acero Bajo en Carbono ASTM-A36

Como se muestra a continuación sobre el comportamiento de las propiedades de los gases que se ocupan en el proceso GMAW el cual se le aplicaran al acero bajo en carbono.

1.3.5.1 Propiedades físicas de los gases

Conductividad Térmica

La conductividad térmica se define como la capacidad o habilidad para conducir el calor. Esta conductividad térmica del gas afecta a la forma del arco y el perfil de penetración que produce.

El argón tiene una conductividad térmica baja y produce un arco con dos zonas diferenciadas. En el centro se establece una zona estrecha de alto calor. La baja conductividad térmica provoca que este calor no se transmita hacia fuera fácilmente por lo que la zona exterior del arco es mucho más fría y menos afilada. El perfil de penetración que se obtiene al soldar con argón como gas de protección refleja directamente la existencia de estas dos zonas diferenciadas: un cilindro central caliente envuelto por un cono más frío. Una sección transversal del cordón muestra un cordón estrecho con elevada penetración en el centro (ver Figura. 2 [16]).

En el extremo opuesto respecto a conductividad térmica tenemos gases como el helio, argón-hidrógeno y argón-CO₂. Estos gases tienen conductividad térmica elevada y, por tanto, provocan más conducción de calor radial desde el centro del arco. Esta expansión radial del calor provoca una columna de arco caliente más ancha que da lugar a un cordón menos afilado [16].

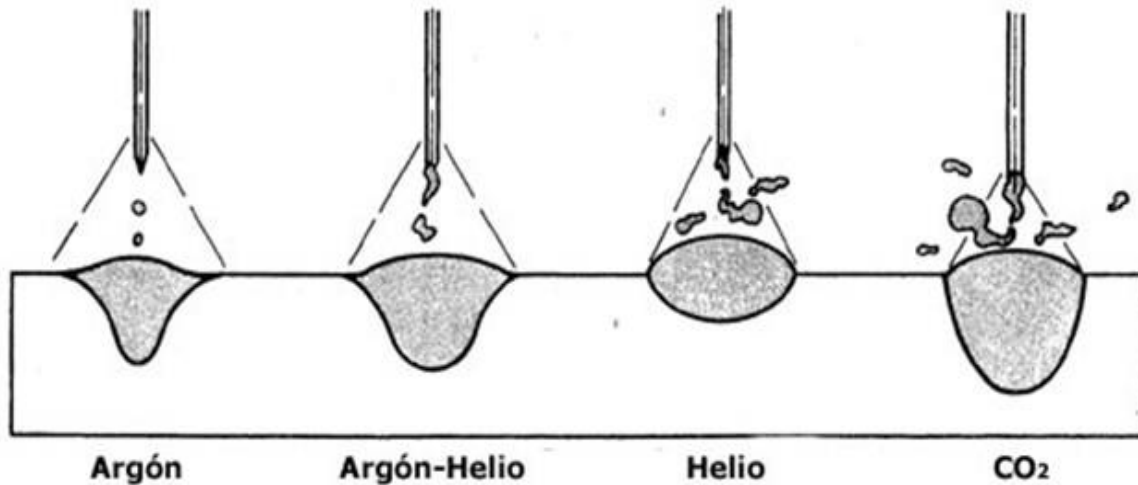


Figura 2.-Perfiles de contorno de cordón y penetración por varios gases de protección [12].

Disociación y Asociación

Algunos gases tienen como unidad básica un átomo. Otros tienen como unidad básica varios átomos unidos, es decir moléculas.

Cuando los gases se calientan en el arco se “rompen” o disocian en sus átomos. Estos átomos se ionizan para producir electrones libres y flujo de corriente. Las moléculas disociadas buscan el equilibrio. Para conseguirlo se desplazan a la superficie de trabajo, que está más fría, y allí se recombinan. Este proceso de recombinación produce más calor en la superficie de trabajo. Debido a esta rotura y recombinación de moléculas, los gases como el dióxido de carbono, el hidrógeno o el oxígeno crean más calor en la superficie de trabajo. Son, por tanto, gases más “calientes” que el argón o el helio, y provocan mayor penetración en el metal base. [16]

Reactividad

La reactividad es la capacidad o habilidad de los gases para reaccionar con el metal fundido. Hay dos tipos de gases según su reactividad: inertes y reactivos. Cada tipo de gas tiene un efecto diferente en la composición química del metal soldado. [16]

1.3.5.2 GASES Y SUS APLICACIONES

Argón

El argón proporciona una estabilidad de arco excelente. Se usa normalmente mezclado con otros gases como oxígeno, dióxido de carbono y helio. El argón se utiliza en metales no férricos, como aleaciones base níquel, cobre, aluminio o magnesio, y también en aceros inoxidables y de baja aleación, y metales reactivos como titanio y circonio.

Gracias a su bajo potencial de ionización, el argón crea un excelente “camino” para la corriente y un arco muy estable. Además, crea un perfil de penetración en forma de dedo que es único del argón. El arco plasma que se crea al utilizar argón como gas de protección se caracteriza por un cono interno muy caliente rodeado por otro externo de menor energía. [16]

Dióxido de Carbono

El dióxido de carbono (CO₂) es un gas reactivo muy usado para la soldadura GMAW de aceros al carbono y de baja aleación. Es el único gas reactivo adecuado para ser usado puro (100% CO₂) como gas de protección para el proceso GMAW. El uso extensivo del CO₂ como gas de protección se ha visto potenciado por algunas de sus características como las mayores velocidades de soldadura y penetración del cordón que proporciona, y el menor coste. [16]

El uso de CO₂ como gas de protección limita los tipos de transferencia en GMAW a corto circuito y globular. La transferencia en arco spray es característica del argón y no se puede conseguir con CO₂. Al soldar con transferencia globular se produce un elevado nivel de salpicaduras. Para disminuirlas es necesario reducir el voltaje, es decir, la longitud de arco.

En comparación con el argón, el CO₂ produce un cordón de excelente penetración, pero con superficie más rugosa y peor mojado de paredes. [16]

Mezclas Argón- CO₂

Las mezclas argón-CO₂ se utilizan ampliamente en la soldadura de aceros al carbono y de baja aleación, pero tienen limitadas aplicaciones en aceros inoxidables. En general la adición de dióxido de carbono al argón provoca un aumento en las proyecciones.

La utilización de mezclas argón- CO₂ en GMAW provoca que sean necesarias corrientes más elevadas para conseguir transferencia en arco spray. Niveles superiores a un 20% de

dióxido de carbono provoca transferencia arco spray inestable con aumento de las proyecciones y disminución de la eficiencia.

Mezclas de hasta un 10% de CO₂ pueden utilizarse para transferencia en arco pulsado o en corto circuito par un amplio rango de espesores. Para arco pulsado en soldadura en posición y con aceros de baja aleación pueden usarse mezclas de menor contenido en CO₂. Este arco será mucho más tolerable a la presencia de cascarilla y proporcionará un baño más controlable que otras mezclas. Las mezclas con un 10% de CO₂ provocan una mayor aportación de calor (heat input) resultando en un baño de soldadura más ancho y más fluido. Mezclas de hasta un 25% de pueden ser usadas genéricamente como gas de protección multiuso para aceros al carbono y de baja aleación. Con arco en corto circuito se pueden obtener máxima productividad y mínima penetración en chapa fina. Por otro lado, esta mezcla no es capaz de establecer transferencia en arco spray. [16]

1.3.5.3 Ciclos Térmicos y Estructura de uniones soldadas

En el estudio de una unión soldada se pueden distinguir las siguientes zonas:

Zona fundida: zona en la que se supera la temperatura de “líquidos” del material. Esta zona está constituida por el material fundido y solidificado, sirviendo de nexo de unión entre las dos piezas soldadas.

Zona afectada térmicamente (ZAT): zona del material base adyacente al cordón de soldadura que sufre una serie de transformaciones como consecuencia del ciclo térmico al que se ve sometida.

Zona sin afectar: zona del material base alejada del cordón, en la cual no se han producido cambios estructurales y de propiedades de consideración

➤ Zona fundida

En esta zona las velocidades de enfriamiento son muy elevadas. Los principales fenómenos que se pueden producir en la zona fundida son:

Variación de composición química: debida fundamentalmente a la pérdida de elementos por oxidación y al aporte voluntario de ciertos elementos para mejora de propiedades.

Absorción de gases: fundamentalmente los gases atmosféricos y el hidrogeno ocasionando la precipitación de compuestos (óxidos y nitruros) que modifican las propiedades mecánicas del cordón de soldadura y la aparición de porosidad y sopladuras si las

cantidades absorbidas son elevadas. La absorción de hidrogeno en la zona fundida está relacionada principalmente con la presencia de humedad en las inmediaciones del arco eléctrico. La influencia de este gas es variada siendo su influencia más directa la fragilización y agrietamiento de uniones soldadas.

Precipitación de compuestos: este tipo de transformaciones perjudican seriamente la soldabilidad de una aleación. En los aceros pueden producirse fundamentalmente por la presencia de impurezas como el azufre y el fosforo.

Modificaciones estructurales: se producen transformaciones que afectan a la estructura del grano y modificaciones fisicoquímicas. En el primer caso en función de la cantidad de material fundido se dará más o menos tiempo al crecimiento del grano de solidificación y se obtendrá una estructura más o menos basta. En el caso de modificaciones fisicoquímicas hay que considerar los posibles cambios de composición química, fenómenos de segregación y las velocidades de enfriamiento.

En lo que se refiere a las fases existentes en la zona fundida de la unión soldada de un acero al carbono, debemos recordar que el diagrama Fe-C meta estable está basado en enfriamientos de equilibrio. Estas velocidades son lentas y rara vez se producen al soldar. Seguidamente describiré las estructuras que se obtienen para un acero con 0,2% de carbono en función de la velocidad de enfriamiento:

Velocidad de enfriamiento lenta: la estructura resultante es una estructura de equilibrio de ferrita y perlita.

Velocidades de enfriamiento medias: se forma estructura de Widmanstaetten.

Velocidades de enfriamiento rápidas: la micro estructura que se obtiene es vainita superior (precipita cementita entre las agujas de ferrita).

Velocidades de enfriamiento muy rápidas: en estos rangos de velocidades se puede formar vainita inferior o martensita.

Las estructuras de la zona fundida de una unión soldada pueden ser predichas conociendo el ciclo térmico y los diagramas temperatura-tiempo de transformación continua (diagramas TTT).

➤ Zona afectada térmicamente

Debido al flujo térmico por conducción, en el material base adyacente se produce un ciclo térmico que afecta a su estructura y propiedades. Cuanto más cerca este del cordón de

soldadura, las temperaturas alcanzadas son mayores y las velocidades de enfriamiento obtenidas superiores.

Los ciclos térmicos de las uniones soldadas provocan en el material base modificaciones que determinan:

- ✓ Crecimiento de grano
 - ✓ Fenómenos de re cristalización
 - ✓ Modificaciones fisicoquímicas
- Crecimiento de grano

Las características del calentamiento inducido durante el ciclo térmico por el soldeo provocan, en la mayoría de los casos, el crecimiento del tamaño de grano en la ZAT. La presencia de zonas de grano grueso tiene singular importancia debido principalmente a la distribución de la tenacidad resultante. El crecimiento del tamaño de grano en las ZAT de las soldaduras tiene lugar preferentemente cuanto mayor sean las temperaturas alcanzadas y los tiempos de permanencia a temperatura elevada.

- Procesos de re cristalización

La recristalización de un metal agrio tiene lugar cuando se calienta por encima de su temperatura de re cristalización y supone, en primer lugar, la reorganización de la estructura cristalina del metal y posteriormente, un fuerte crecimiento de grano que conducen al ablandamiento de la aleación.

- Modificaciones fisicoquímicas

Estas modificaciones incluyen las posibles transformaciones alotrópicas y precipitaciones que puedan ocurrir como consecuencia de los ciclos térmicos sufridos por el material.

1.4 Parámetros del Proceso de Soldadura

Los parámetros fundamentales que entran a formar parte de las características de soldeo, y por tanto de la calidad de soldadura, son [4]:

- ✓ Tensión
- ✓ Velocidad de alimentación
- ✓ Longitud libre del alambre o “stick-out”
- ✓ Velocidad de desplazamiento
- ✓ Polaridad

- ✓ Ángulo de inclinación de la pistola

El conocimiento y control de estos parámetros es esencial para obtener soldaduras de calidad. Estas variables no son independientes ya que el cambio de una de ellas produce o implica el cambio de alguna de las otras [4].

1.4.1 Relación entre los parámetros

La tensión se mide en voltios (V) y es regulable en la fuente de energía, o bien a distancia desde la unidad alimentadora de alambre. Se transmite de forma regular desde la fuente al alambre, sin embargo, se distribuye entre la prolongación del alambre y el arco de un modo desigual. Aproximadamente el 90% de la energía se concentra en el arco y el 10% restante en el alambre. Por tanto, cuanto mayor sea la longitud del arco mayor será la tensión. La intensidad, sin embargo, está muy relacionada con la velocidad de alimentación del alambre, de forma que cuanto mayor es la velocidad de alimentación mayor es la intensidad. La tasa de deposición también está muy relacionada con la intensidad; cuanto mayor es la intensidad más rápidamente se producirá la fusión y, por tanto, la deposición [4].

1.4.2 Extremo libre del alambre electrodo (“stick-out”)

El extremo libre del alambre es la distancia desde el tubo de contacto hasta el extremo del alambre y está relacionada con la distancia entre el tubo de contacto y la pieza a soldar. Esta variable tiene suma importancia para el soldeo y en especial para la protección del baño de fusión. Cuando aumenta el extremo libre del alambre la penetración se hace más débil y aumenta la cantidad de proyecciones. Éstas pueden interferir con la salida del gas de protección y una protección insuficiente puede provocar porosidad y contaminación excesiva [4].

La mayoría de los fabricantes recomiendan longitudes de 6 a 13 mm para transferencia por cortocircuito y de 13 a 25 mm para otros tipos de transferencia. Disminuyendo la longitud en transferencia por cortocircuito, aunque la tensión suministrada por la fuente de energía sea baja, se consigue buena penetración [4].

En la Figura 3 se ha representado la influencia de la variación de la distancia entre el tubo de contacto y la pieza [4].

1.4.3 Velocidad de desplazamiento

Si se mantienen todos los demás parámetros constantes, cuanto menor sea la velocidad de la soldadura mayor será la penetración. Sin embargo, una pistola se puede sobrecalentar si

se suelda con intensidad alta y baja velocidad de soldeo. Una velocidad de soldeo alta producirá una soldadura muy irregular [4].

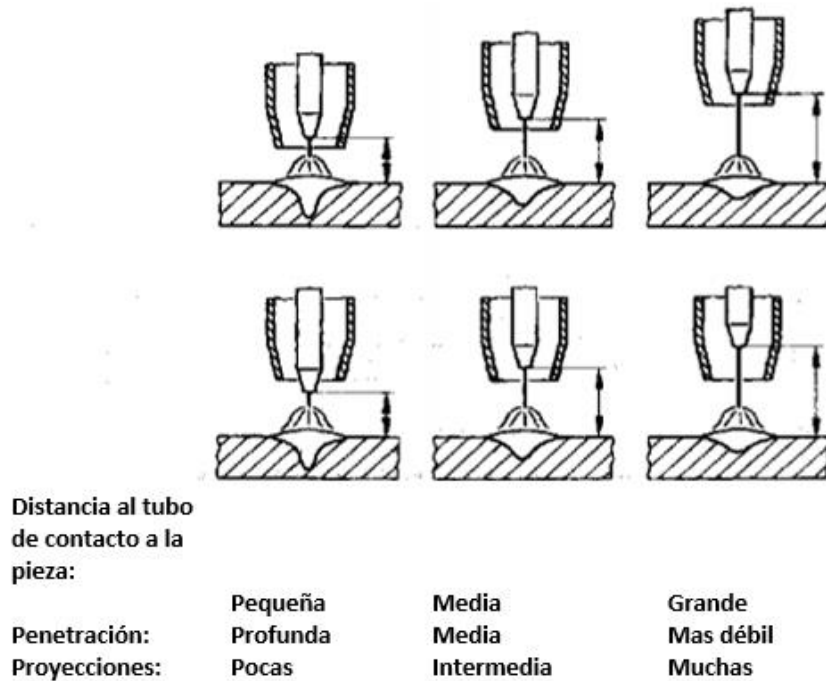


Figura 3.-La influencia de la Variación de la distancia entre el tubo de contacto y la pieza

1.4.4 Soldabilidad

La soldabilidad puede definirse como la mayor o menor facilidad que presenta un metal para ser soldado; permitiendo la obtención de soldaduras sanas, homogéneas, que respondan a las necesidades para las que fueron realizadas, incluyendo los requisitos de fabricación.

Por su parte la definición establecida por el instituto Internacional de Soldadura dice que “un material metálico es considerado soldable en un grado dado, para un proceso y para una aplicación específica, cuando una continuidad metálica puede ser obtenida mediante el uso de un proceso adecuado tal de que la junta cumpla completamente con los requerimientos especificados tanto en las propiedades locales como en su influencia en la construcción de la cual forma parte” [4].

En el caso particular de la soldadura de aceros también la soldabilidad puede ser definida, simplemente, como la mayor o menor facilidad que presentan los aceros para ser unidos mediante soldadura. De esta forma podemos decir que la soldabilidad de un acero depende

de gran medida de su composición química, tanto por el contenido de carbono como de otros elementos de composición que actúan de manera análoga [4].

1.4.5 Polaridad

Para la mayoría de las aplicaciones del soldeo GMAW se utiliza la polaridad inversa (DC+) ya que se obtiene un arco estable, con una buena transferencia de metal de aportación, pocas proyecciones, un cordón de soldadura de buenas características y gran penetración. La polaridad directa (DC-) casi no se utiliza porque, aunque la tasa de deposición es mayor, generalmente solo se consigue transferencia globular. La corriente alterna no se utiliza en el soldeo MIG/MAG ya que el arco se hace inestable y tiende a extinguirse [4].

1.4.6 Ángulo de inclinación de la pistola (ángulo de desplazamiento)

Cuando se utiliza la técnica de soldeo hacia delante disminuye la penetración y el cordón se hace más ancho y plano, por lo que se recomienda para el soldeo de pequeños espesores. La máxima penetración se obtiene con el soldeo hacia atrás con un ángulo de desplazamiento de 25°. Para la mayoría de las aplicaciones se utiliza el soldeo hacia atrás con un ángulo de desplazamiento de 5-15°. En el soldeo del aluminio, sin embargo, se suele preferir el soldeo hacia delante pues se mejora la acción limpiadora. Para el soldeo en ángulo (posición PB) se recomienda un ángulo de trabajo de 45° [4].

1.5 Distorsión Producida por el Proceso de Soldadura

La soldadura es fundamental para una gran variedad de trabajos relacionados con la ingeniería. Alcanzar una mayor compresión de los procesos usados para unir materiales similares y disímiles tiene gran importancia técnica y científica [17]. Durante el ciclo de calentamiento y enfriamiento del proceso de soldadura por arco eléctrico, generan deformaciones térmicas en el cordón de soldadura y en el metal base en las regiones cercanas y no cercanas al cordón. Estas deformaciones son acompañadas por deformaciones plásticas no-uniformes. La deformación plástica produce esfuerzos residuales y a su vez estos esfuerzos causan distorsiones [18].

Este proceso de fabricación es de los más versátiles y disponibles para la fabricación de grandes estructuras complejas forman común de la matrícula, hoja y sección. Sin embargo, el proceso se basa en una potencia térmica intensamente localizada, que tiende a generar distorsiones permanentes indeseables en el producto terminado [19].

Uno de los factores que hace que la aplicación de soldadura sea problemática es que el resultado es difícil de predecir. No toda la variación es necesariamente causada por soldadura como tal, pero se ha encontrado que es debido al control de calidad inadecuada de las operaciones asociadas, tales como la manipulación de materiales, corte y montaje [19]

La distorsión en una estructura soldada es el resultado de la expansión no uniforme y la contracción de la soldadura y material de base que rodea, causado por el ciclo de calentamiento y enfriamiento durante el proceso de soldadura. La distorsión de soldadura tiene efectos negativos, la apariencia externa y esfuerzos residuales en las estructuras soldadas. En muchos casos, los costos adicionales y retrasos en el programa de producción ya que incurren de enderezar la distorsión de soldadura. Por otro lado, cada vez más, el diseño de componentes y estructuras de ingeniería se basa en el logro de pequeña tolerancia. Por estas razones, la predicción y el control de la deformación de soldadura han sido de importancia crítica. [17]

1.5.1 Tipos de Distorsión

Durante los procesos de soldadura, la expansión no uniforme y la contracción de la junta de soldadura conducen a la soldadura a tensiones residuales y distorsiones permanentes.

La distorsión se puede clasificar en seis tipos principales Figura.4: [20].

- Contracción longitudinal
- Contracción transversal
- Distorsión angular
- Inclinación lateral
- Pandeo
- Torsión [20].

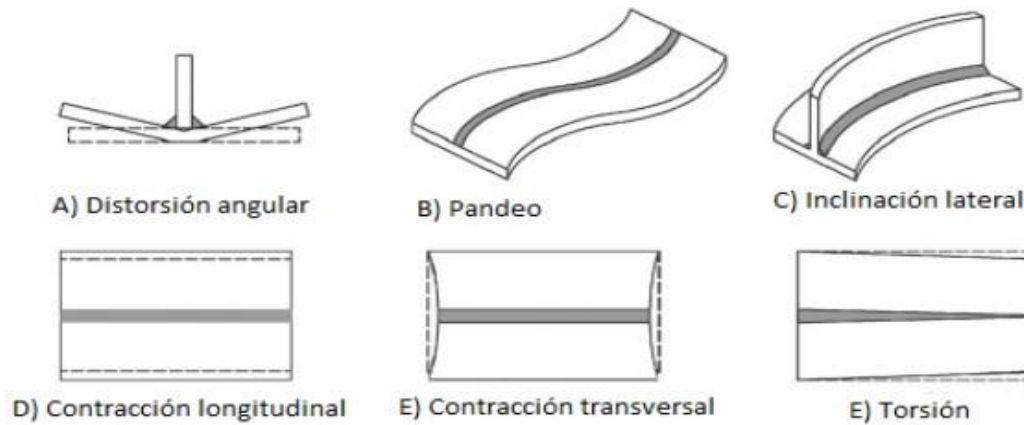


Figura 4.-Tipos por Distorsión por Soldadura [19].

1.5.2 Tipos de Unión

Como se muestra en la siguiente Figura. 5 se representa los diferentes tipos de uniones de soldaduras básicas (juntas) que son utilizadas para cualquier proceso de soldadura.

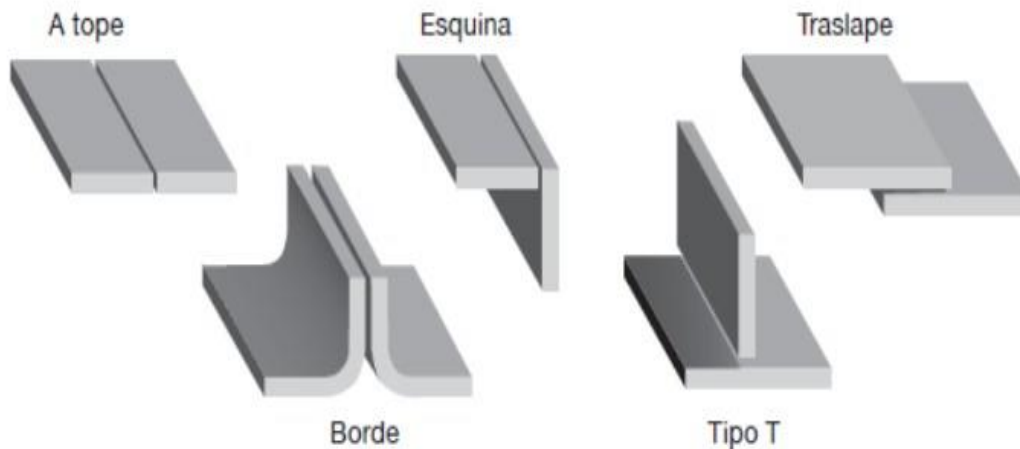


Figura 5.- Uniones básicas o juntas de Soldadura [17]

1.5.3 Análisis de la distorsión en junta soldadas en acero al carbono

En este análisis se obtendrán las distorsiones de las placas el antes y el después de ser soldadas, para verificar los cambios de su distorsión.

1.6 Evaluación de una junta Soldada Mediante el Análisis Metalográfico

El objetivo de la caracterización metalográfica es clasificar las fases de la microestructura de un material de acuerdo con su forma, distribución y tamaño, de tal manera que el análisis es actualmente una herramienta básica para el metalurgista.

El procedimiento de preparación de las probetas para la examinación metalográfica, abarco las siguientes etapas:

Extracción de probetas
Acondicionamiento
Lijado
Pulido
Ataque químico [21]

1.7 Uso de la técnica por Elementos Finitos para el análisis de una junta soldada

Las ecuaciones de los elementos finitos correspondientes a térmico y mecánico se obtienen eligiendo una forma de función de interpolación que representa la variación de las variables del campo, como la temperatura T y el desplazamiento, U , dentro de los elementos finitos del modelo estructural y aplicando adicionalmente el argumento residual o variacional ponderado a los modelos matemáticos. Además, con la imposición de las condiciones limitantes y sus condiciones iniciales, las ecuaciones discretizadas obtenidas se resuelven mediante técnicas de elementos finitos a través de las cuales se podría obtener la solución aproximada sobre el modelo de elementos finitos considerado [22].

La ecuación del elemento finito térmico incluyendo con la condición de contorno puede escribirse como:

$$[C]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{F_T\}, \quad \text{ec. (1)}$$

El cual:

$$[C] = \int_V \rho c [N]^T [N] dV, \quad \text{ec. (2)}$$

$$[K] = \int_V k[B]^T [B] dV + \int_S h_f [N]^T [N] dS, \quad \text{ec. (3)}$$

$$\{F_T\} = \int_V Q [N]^T dV + \int_S h_f T_{ref} [N]^T dS \quad \text{ec. (4)}$$

Donde:

ρ es densidad (Kg/m^3)

c es calor específico ($\text{J}/\text{Kg}\cdot\text{K}$)

k es la conductividad ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)

h_f es el coeficiente conductivo de la transferencia de calor ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$)

Q es la tasa de generación interna de calor por unidad de volumen (W/m^3)

$[N]$ es la matriz de las funciones de la forma del elemento

$[B]$ es la matriz de funciones de forma derivada

$\{T\}$ es el vector de temperatura nodal

Los resultados de la distribución de la temperatura y la historia obtenida de la Ec. (1) se insertan entonces en el modelo mecánico en forma de carga térmica. Incorporando el análisis elasto-plasticidad, la ecuación mecánica de elementos finitos puede escribirse en forma de incremental como:

$${}^{i+1}[K_1]\{\Delta U\} - {}^{i+1}[K_2]\{\Delta T\} = {}^{i+1}\{R\} - {}^i\{R\}, \quad \text{ec. (5)}$$

En cual:

$$[K_1] = \int_V [B]^T [D^{ep}] [B] dV, \quad \text{ec. (6)}$$

$$[K_2] = \int_V [B]^T [C^{th}] [M] dV, \quad \text{ec. (7)}$$

$$\{R\} = \int_S [N]^T \{p\} dS + \int_V [N]^T \{f\} dV, \quad \text{ec. (8)}$$

$$[D^{ep}] = [D^e] [D^p], \quad \text{ec. (9)}$$

Donde:

$\{\Delta U\}$ Es el incremento de desplazamiento nodal

$\{\Delta T\}$ Es el incremento de la temperatura nodal

$[B]$ Es la matriz de deformación-desplazamiento

$[D^e]$ Es la matriz de rigidez elástica

$[D^p]$ Es la matriz de rigidez plástica

$[C^{th}]$ Es la matriz de rigidez térmica

$[M]$ Es la función de la forma de la temperatura

$\{p\}$ Es el vector de tracción o fuerza superficial

$\{f\}$ Es el vector de la fuerza del cuerpo

i Es el paso actual del análisis

El vector de desplazamiento nodal en el siguiente paso de análisis, ${}^{i+1}\{U\}$ podría obtenerse de:

$${}^{i+1}\{U\} = {}^i\{U\} + \{\Delta U\}, \quad \text{ec. (10)}$$

Además, la condición actualizada de tensión en la estructura podría obtenerse a partir de la siguiente relación tensión-deformación:

$${}^{i+1}\{\sigma\} = {}^i\{\sigma\} + \{\Delta\sigma\}, \quad \text{ec. (11)}$$

$$\{\Delta\sigma\} = [D^{ep}] [B] \{\Delta U\} + [C^{th}] [B] \{\Delta T\}, \quad \text{ec. (12)}$$

Comúnmente, el método iterativo de Newton-Raphson se emplea en el solver de elementos finitos para resolver las ecuaciones no lineales. Para un tratamiento posterior, véase (Bathe, 1996). Obsérvese también que, a partir de los resultados del análisis térmico, se obtienen ahora las condiciones de tensión y desplazamiento actualizadas [22].

1.7.1 Efectos de la Temperatura

Cuando la temperatura de un cuerpo sin restricciones se incrementa de manera uniforme, éste se dilata y su deformación unitaria normal de la ecuación es [23]:

$$\epsilon_x = \epsilon_y = \epsilon_z = \alpha(\Delta T) \quad \text{ec. (13)}$$

Donde:

α = coeficiente de dilatación termica

ΔT = Cambio de Temperatura en grados

En esta acción, el cuerpo experimenta un incremento simple del volumen y las componentes de la deformación por cortante son iguales a cero.

Si una barra recta se restringe en sus extremos para prevenir la dilatación longitudinal, y luego su temperatura se somete a un incremento uniforme, se desarrolla un esfuerzo de compresión debido a la restricción axial. El esfuerzo está dado por

$$\sigma = -\epsilon E = \alpha(\Delta T)E \quad \text{ec. (14)}$$

De manera similar, si se restringen los bordes de una placa plana uniforme y su temperatura también se somete a un incremento uniforme, el esfuerzo de compresión que se desarrolla está dado por la ecuación [23]

$$\sigma = -\frac{\alpha(\Delta T)E}{1-\nu} \quad \text{ec. (15)}$$

Los esfuerzos expresados por las ecuaciones (2) y (3) se llaman esfuerzos térmicos y estos se originan debido a un cambio de temperatura en un elemento sujeto o restringido [23].

1.7.2 Modelado de la fuente de Calor

El modelado de la distribución de energía en el arco de soldadura es el núcleo del análisis ya que de esto depende mucho de la exactitud de los resultados.

Para el caso de la soldadura por arco, no toda la energía eléctrica que provee la fuente se convierte en energía térmica para elevar la temperatura tanto en metal base como del electrodo. Una parte de esta energía si disipa es decir se pierde, por lo tanto, la energía neta que ingresa al metal base está dado por la siguiente ecuación.

$$Q = n \frac{VI}{\nu} \quad \text{ec. (16)}$$

1.7.3 Densidad

La densidad o masa específica ρ de un cuerpo se define como la relación de su masa m con respecto a su volumen V [24].

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{ec. (17)}$$

1.7.4 Módulo de Young

El módulo de Young, E , es la pendiente de la curva esfuerzo – deformación en su región elástica. Esta relación es la ley de Hooke [24].

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{ec. (18)}$$

Donde σ es el esfuerzo y ε es la deformación. Este módulo está es una medida de la rigidez de un material [24].

1.7.5 Capacidad Térmica y Calor Especifico.

El fotón es tratado como una partícula con una energía única o como una radiación electromagnética con longitud de onda o frecuencia particular. Algunas de las propiedades

térmicas de los materiales también se pueden caracterizar de esta misma manera dual igual a las propiedades ópticas. Sin embargo, estas propiedades quedan determinadas por el comportamiento de los fonones [25].

Al cero absoluto, los átomos de un material tienen una energía mínima. Al aplicarles calor, los átomos adquieren energía térmica y vibran con amplitud y frecuencia particular. La vibración de cada átomo se transfiere a los átomos vecinos, produciendo una onda elástica conocida como fonón. La energía del fonón se puede expresar en función de la longitud de onda o de la frecuencia. Un material adquiere o cede calor al adquirir o ceder fonones. Por tanto, la energía o el número de fonones que se requieren para cambiar en un grado la temperatura del material adquieren una importancia. Se puede expresar esta energía como capacidad térmica o calor específico [25].

La capacidad térmica es la energía requerida para elevar en un grado la temperatura de una mol. de materia. La capacidad térmica se puede expresar ya sea a presión constante CP o a volumen constante Cv. A temperaturas elevadas, la capacidad térmica para un volumen dado de material se aproxima a [25]:

$$C_p = 3R \frac{\text{cal}}{\text{mol}} * K \quad \text{ec. (19)}$$

En la mayoría de los cálculos ingenieriles, es más conveniente utilizar el calor específico que la capacidad térmica. Ni la capacidad térmica, ni el calor específico dependen de manera significativa de la estructura del material, así, cambios en la densidad de las dislocaciones, en el tamaño de grano o en las vacancias causan poco efecto. El factor más importante que afecta al calor específico es la vibración de la red de los fonones [25].

1.7.6 Módulo de Poisson.

Siempre que un cuerpo se somete a la acción de una fuerza, se deforma en la dirección de la fuerza. Las deformaciones laterales que se producen tienen una relación constante con las deformaciones axiales. Mientras que la materia mantenga dentro del rango elástico de esfuerzos, esta relación es constante [26].

$$\mu = \frac{\text{Deformacion Lateral}}{\text{Deformacion Axial}} \quad \text{ec. (20)}$$

El término μ se llama módulo de Poisson, en honor de S.D. Poisson, quien expuso este concepto en 1828. En general el valor de μ para la mayoría de los materiales está

comprendido entre 0.25 y 0.35 aunque las deformaciones laterales se producen en todos los cuerpos sometidos a esfuerzos, generalmente no afectan los esfuerzos longitudinales. La única excepción se presenta cuando se impide que se efectúe libremente el movimiento lateral [26].

1.7.7 Expansión Térmica

Un átomo que gana energía térmica empieza a vibrar se comporta como si tuviera un radio atómico mayor. La distancia promedio entre átomos se incrementa y las dimensiones generales del material aumentan. El cambio de dimensiones por unidad de longitud Δl en el material está dado por el coeficiente lineal de expansión térmico α [25]:

$$\alpha = \frac{l_f - l_0}{l_0(T_f - T_0)} = \frac{\Delta l}{l_0 \Delta T} \quad \text{ec. (21)}$$

Donde T_0 y T_f son las temperaturas inicial y final, y l_0 y l_f son las dimensiones iniciales y finales del material. También se puede definir un coeficiente volumétrico de expansión térmica (α_v) para describir el cambio en volumen al modificarse la temperatura del material. Si el material es isotópico, entonces $\alpha_v = 3\alpha$ [25].

El coeficiente de expansión térmica está relacionado con la intensidad de los enlaces atómicos. Para que se muevan los átomos, saliéndose de sus posiciones de equilibrio, debe introducirse energía al material. Si es característica del material una brecha muy profunda de energía, causada por un enlace atómico fuerte, los átomos se separan menos y el material tendrá un bajo coeficiente de expansión lineal. Esta relación también sugiere que aquellos materiales con una alta temperatura de fusión, también causada por intensas atracciones atómicas, tendrán bajos coeficientes de expansión térmica. Cuando un material isotrópico se calienta lenta y uniformemente, se expande de manera uniforme sin crearle un esfuerzo residual. Sin embargo, si se evita que se mueva el material, podrían no suceder los cambios dimensionales y en su lugar se desarrollarían esfuerzos. Estos esfuerzos térmicos, están relacionados con el coeficiente de expansión térmica, con el módulo de elasticidad E del material térmico y con el cambio de temperatura ΔT de temperatura [25].

Conductividad térmica

La conductividad térmica K es una medida de la rapidez a la cual se transfiere calor a través de un material. La conductividad (figura 2.14) relación al calor Q transferido por segundo a través de un plano dado de área A , cuando existe un gradiente de temperatura $\Delta T/\Delta x$:

$$\frac{Q}{A} = k \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad \text{ec. (22)}$$

La energía térmica se transfiere mediante dos mecanismos importantes: la transferencia de electrones libres y de vibraciones en la red (o fenómenos). Los electrones de valencia adquieren energía, se mueven hacia áreas más frías del material y transfieren su energía a otros átomos. La cantidad de energía transferida depende del número de los electrones excitados y de su movilidad; éstos, a su vez dependen del tipo de material, de las imperfecciones de la red y de la temperatura. Además, las vibraciones de los átomos térmicamente inducidas transfieren energía a través del material [25].

2

METODOLOGÍA

El trabajo tomará en cuenta enfoques: cuantitativo, descriptivo y experimental de acuerdo al desarrollo de la investigación [27]. El trabajo tiene por finalidad analizar la distorsión de un elemento estructural soldado en junta de filete con el proceso GMAW con los elementos finitos y ANSYS. Se obtendrán pruebas experimentales y serán analizadas las distorsiones generadas por efectos de la temperatura durante la soldadura con proceso GMAW, con base en valores experimentales y análisis por modelación numérica.

Para el desarrollo de la investigación sobre el análisis de la distorsión es necesario desarrollar la metodología utilizada es mostrada en la Figura 6.

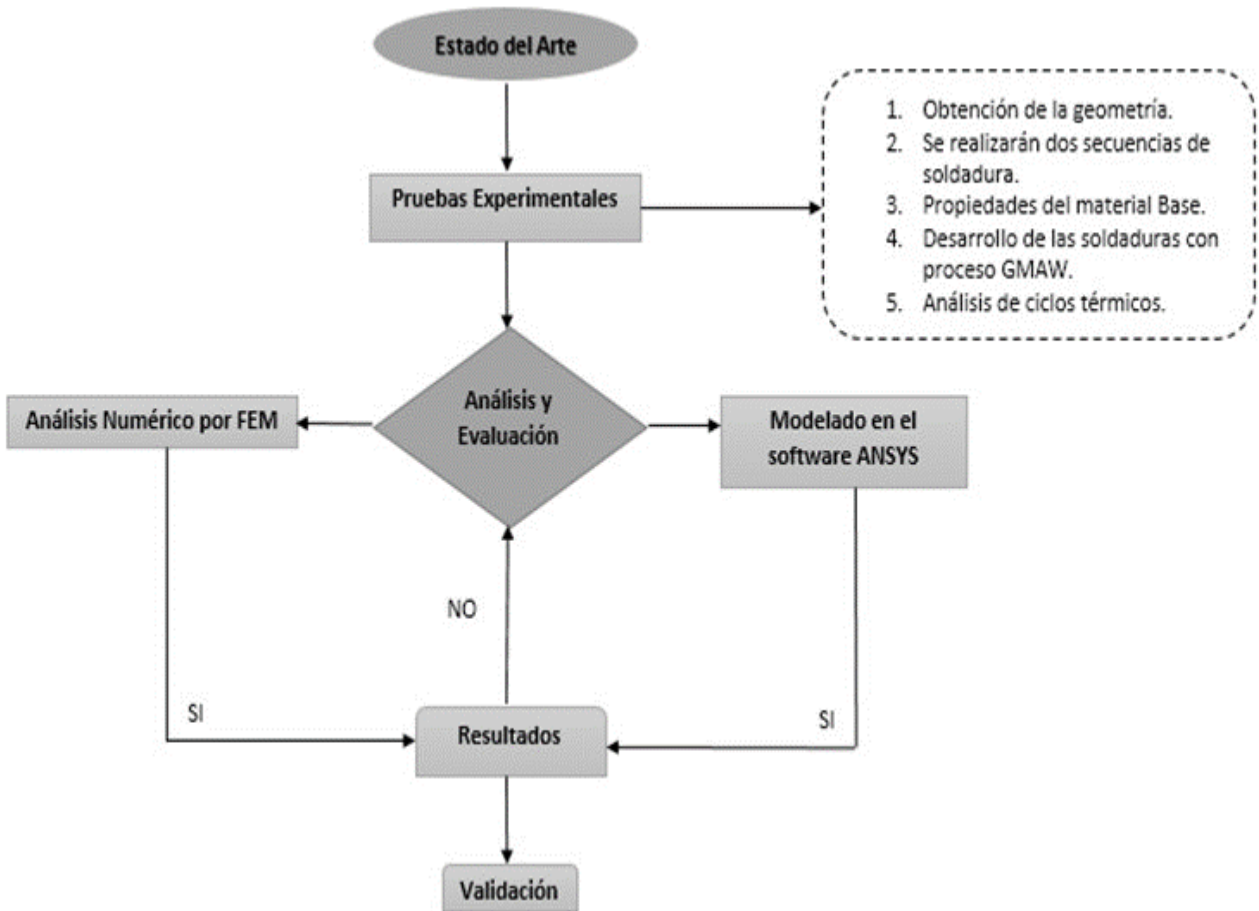


Figura 6.-Esquema principal de la metodología empleada para el proceso de Investigación

2.1 Desarrollo experimental

Se diseñaron las probetas físicas con las placas de acero bajo en carbono, tomando en cuenta el modelo tomado de la empresa Bombardier que es el soporte principal de Frenado que se ocupa para los trenes suburbanos como se muestra en la Figura 7 en base a sus dimensiones, de una longitud de 400mm y un ancho de 200mm con un ángulo de dobles de 45° con una placa del alma de 100mm de ancho con la misma longitud de la placa con su ángulo de 45°, realizándose dos modelos, con las mismas dimensiones y de igual manera poder observar su comportamiento de su distorsión y su distribución de temperatura, donde fueron donde fueron realizados por el proceso GMAW realizadas por un soldador de la UAC (Barranquilla, Colombia) ocupando la posición 2F, contando con la experiencia necesaria para realizar el procedimiento de soldadura, en base por la AWS.

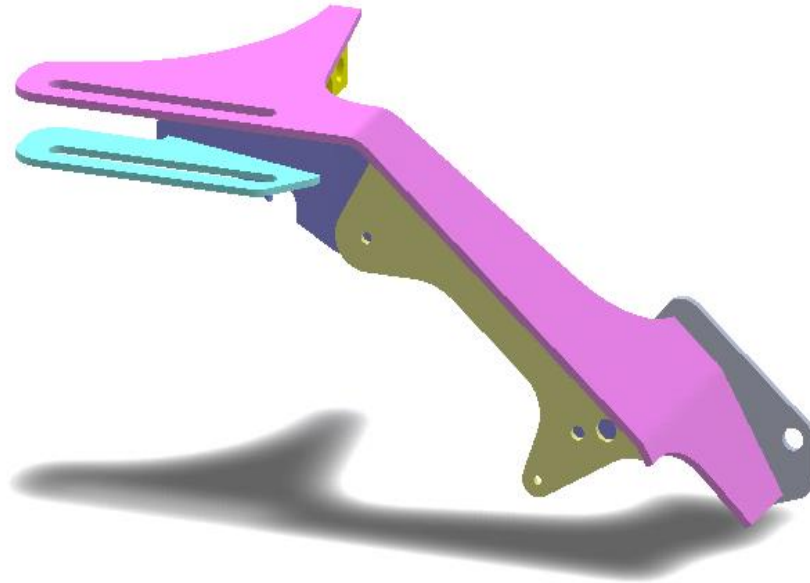


Figura 7.-Soporte Principal de frenado

2.1.1 Determinación de la identidad del material base

Determinar el material base que ya fue analizado por proceso de soldadura GMAW, tanto que se determinaron la posición para poder soldar. Para poder desarrollar las pruebas experimentales en donde las propiedades mecánicas del material constitutivo juegan un papel preponderante en el comportamiento de miembros estructurales y el diseñador debe estar familiarizado con dichas propiedades para los diversos tipos de acero que se usan para fabricar los perfiles laminados en frío [28].

2.1.2 Análisis del Metal Base.

El análisis de metal base se determinará si el material es el correcto por lo tanto se realizó las pruebas correspondientes.

2.1.2.1 Extracción y Montaje del material Base

En esta etapa se realizó la extracción de la muestra para metalografía de 10mm x 10mm mediante un corte por hilo con abundante refrigeración con el fin de no modificar su microestructura como se muestra en la Figura 8 (Equipo proporcionado por la Universidad Autónoma del Caribe, Barranquilla, Colombia), y se muestran la ubicación en las diferentes direcciones LT= lado transversal, LL=lado longitudinal y LS= lado superficial teniendo como finalidad observar los cambios microestructurales en cada uno de sus lados como se indican en la norma, donde se realizó el montaje en frío en un molde polimérico de una

pulgada de diámetro en la Figura 8, con una mezcla homogénea de una resina polimérica en polvo y líquido autopolimerizante, dejándose solidificar durante 15 minutos para ser extraída la muestra del molde, con el propósito del proceso metalográfico.

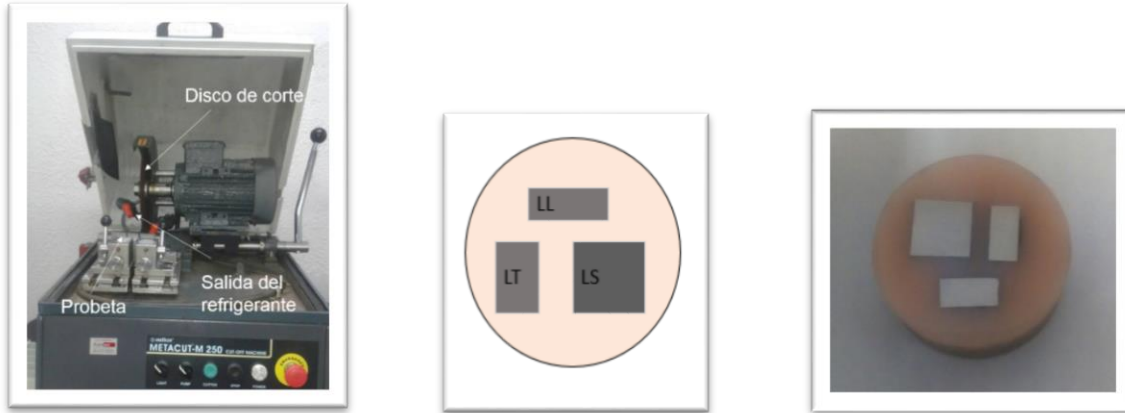


Figura 8.-Equipo y muestras extraídas

2.1.2.2 Desbaste y Pulido del material base

El proceso de desbaste de la probeta se realizó con lijas de carburo de cilio de diferentes espesores (240, 320, 400, 600,) de menor a mayor, girando la probeta a 90° realizando el cambio de las lijas. Posterior se pulió la probeta, utilizando la pulidora metalográfica de 2 paños FORCIPOL 2V marca Metkon ®, con un disco giratorio de 8 pulgadas como se muestra en la Figura 9, (Equipo proporcionado por la Universidad Autónoma del Caribe, Barranquilla, Colombia).



Figura 9.-Equipo Pulidora Metalográfica de 2 paños
FORCIPOL

2.1.2.3 Preparación de solución química

Se determinaron los reactivos más relevantes que sirven para atacar el acero bajo en carbono A-36 y ver la microestructura del acero, sin embargo, se determinara qué tipo de reactivo es más relevante se precisó por la norma ASM Metal Handbook [29] se muestra en la siguiente **Tabla 2**.

Tabla 2.-Reactivo para atacar el acero bajo en carbono [29]

Ácido nítrico (nital)	Ácido nítrico blanco: 1-5 ml Alcohol metílico o etílico (98% o absoluto) (También alcohol amílico): 100 m	En aceros al carbón: a) para oscurecer perlita y dar contraste entre colonias de perlita, b) para revelar fronteras de perlita, c) para diferenciar la ferrita de la martensita.	La rapidez de ataque aumenta; la selectividad disminuye y se incrementan los porcentajes de HNO ₃ . El reactivo 2 (ácido pícrico) generalmente es superior. El tiempo de ataque es de unos cuantos segundos a un minuto.
Cloruro férrico y ácido hidroclicóric	Cloruro férrico: 5 g Ácido hidroclicóric: 50 ml Agua: 100 ml	Aceros auténticos al níquel y aceros inoxidables.	
Hidróxido de amonio y peróxido de hidrógeno	Hidróxido de amonio: 5 partes Peróxido de hidrógeno: 2-5 partes	Generalmente empleado para cobre y muchas de sus aleaciones	El contenido de peróxido varía directamente con el contenido de cobre de la aleación que será atacada. Inmersión o frotamiento por casi un minuto. Usar peróxido fresco para buenos resultados
Persulfato de amonio	Persulfato de amonio: 10 mg Agua 90 mg	Cobre, latón, bronce, plata, níquel, bronce alumínico	Utilizarlo frío o hirviendo; inmersión
Reactivo de Palmerton	Oxido crómico: 200 g Sulfato de sodio: 15 g Agua: 1000 m	Reactivo general para zinc y sus aleaciones	Inmersión con agitación moderada.

Eligiendo como reactivo el Ácido Nítrico (Nital), se logró atacar el material en 5 segundos y por lo tanto visualizar su microestructura del acero bajo en carbono ocupando un microscopio óptico (Equipo proporcionado por la Universidad Autónoma del Caribe, Barranquilla, Colombia) como se muestra en la Figura 10, en donde se pudo obtener la

microestructura de cada lado con un aumento de 200X aplicadas en cada lado correspondiente.

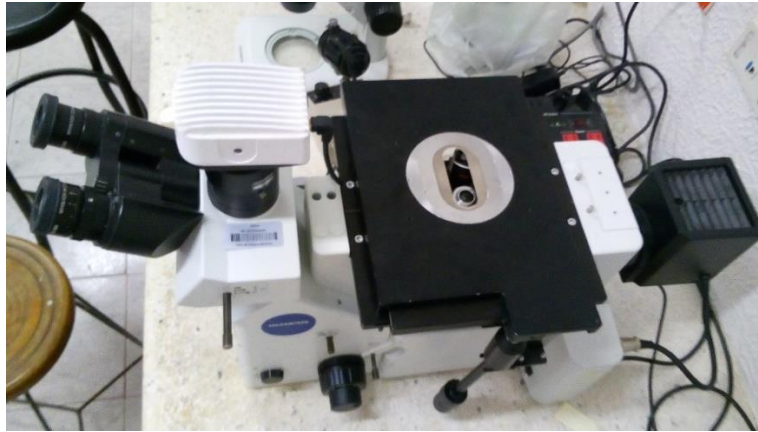


Figura 10.-Microscopio Óptico

2.1.3 Diseño y Preparación de juntas

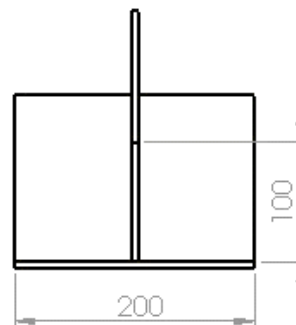
El material base bajo en carbono en una junta en T a tope, se determinó las dimensiones de las probetas se dividieron en dos fases, 6 placas planas de un espesor de 4.8 mm, con una longitud de 400 mm y de ancho 200 mm, 100 mm de ancho y 400 mm de longitud y 6 probetas con las mismas especificaciones con un ángulo a 45°.

Estas juntas estructurales en T se tienen con la finalidad de determinar el aporte térmico con las variables como el voltaje y la velocidad de soldadura posteriormente se evaluará su influencia sobre la microestructura como se muestran en la Figura 11. Modelos Estructurales.

PERFIL RECTO



PERFIL ANGULAR



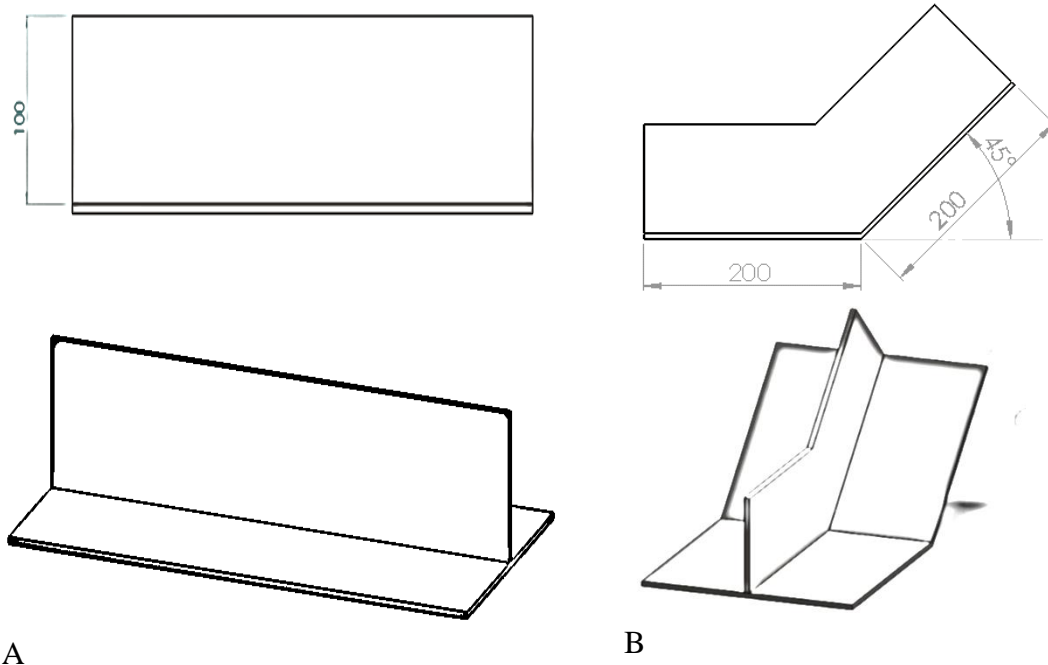


Figura 11.-Modelos Estructurales

2.1.4 Selección de los parámetros del aporte térmico

En esta fase se seleccionaron los parámetros del aporte térmico (intensidad de corriente, voltaje, velocidad de avance) y también del mismo modo la penetración de la soldadura de acuerdo a los ensayos previos realizados para poder llegar a realizar las soldaduras finales en las juntas en T de ambos modelos como se muestra en la Figura 12 la Adquisición de datos.

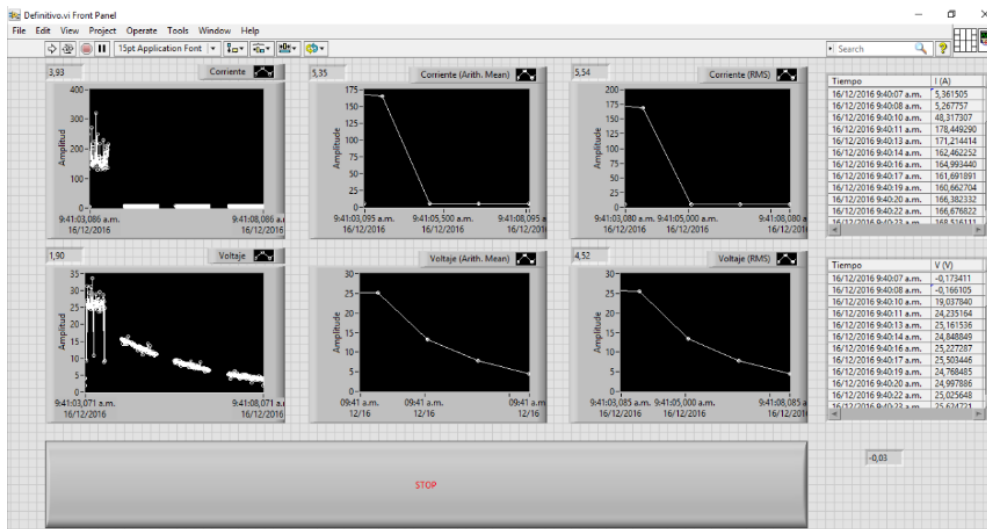


Figura 12.-Adquisición de datos

La mezcla de gases para la protección para esta investigación se utilizó una mezcla de gases, compuesta por 80 % Argón y 20% Oxígeno. El material de aporte utilizado según la clasificación AWS D1.1 es con designación ER- 309L marca Indura ® con diámetro de 0,050 in. La posición de soldadura fue la 2F. Los parámetros para la aplicación de la soldadura se determinaron de manera experimental. La máquina utilizada fue la MIG WELD 260-D marca Lincoln Electric ® como se muestran en la Figura 13, que tiene un intervalo de amperaje continuo de 30 a 340 A y un intervalo de voltaje de arco de 10 a 28,5V [30] (ubicada en el laboratorio de procesos de la UAC, Barranquilla, Colombia).



Figura 13.-Máquina de soldar para el proceso GMAW

Para el cálculo del aporte térmico se utilizó la ecuación 23:

$$HI = \frac{I_m * V_m * 60 * \eta}{V_s * 1000} \quad [kJ/cm] \quad \text{ec. (23)}$$

La medición del tiempo se hizo mediante un cronómetro digital, cuyos resultados se usaron para calcular la velocidad de soldadura con la ecuación (24).

$$Velocidad\ de\ Soldadura\ (cm/min) = \frac{Distancia\ (cm)}{Tiempo\ (min)} \quad \text{ec.(24)}$$

La
med

ición de la intensidad de corriente y voltaje se obtuvo con un sistema de recolección de datos y señales proveniente de la tesis de maestría en Ingeniería Mecánica titulado “Sistema de procesamiento de señales eléctricas de soldadura GMAW y GTAW para el monitoreo y análisis de las variables eléctricas de soldadura y calidad superficial de soldaduras por inspección visual. Así mismo, para la adquisición de temperaturas se apoyó

correspondiente con la investigación que adelanta en su proyecto de maestría “Influencia del aporte térmico sobre la acumulación de esfuerzos residuales en juntas soldadas a tope de acero inoxidable AISI 316L y AISI 430 con proceso GMAW”.

2.1.5 Definición de procedimiento de soldadura y aporte térmico aplicable

En este punto es importante la recolección de información necesaria para el desarrollo del procedimiento ya que permite identificar que se va a producir, que material se empleará, rango de espesores del material a soldar, tipos de juntas presentes en la construcción soldada y todas aquellas características y especificaciones indispensables para el producto con respecto a la unión soldada. [31]

Para la elaboración del procedimiento de soldadura es necesario determinar qué tipo de construcción soldada se va a trabajar, para posteriormente seleccionar e implementar el código que más se adecue según los requerimientos [31].

Es vital la definición de variables que permitan asegurar la compatibilidad entre material base y depósito de soldadura asegurando la calidad del producto acorde a las especificaciones de diseño y ejecución de la soldadura, entre las variables de soldadura se pueden identificar: las esenciales, esenciales suplementarias y las no esenciales [31].

La inspección visual por inspección visual análisis de calidad de soldadura bajo norma AWS D1.1 [31] Velocidad de soldadura Velocidad alimentación alambre, Amp, Voltaje, Eficiencia lo anterior permite medir aporte térmico promedio, es desarrollada antes, durante y después de la soldadura y tiene en cuenta aspectos como: i) conformidad con el procedimiento de soldadura especificado para la unión soldada, ii) control en la preparación de la junta a soldar, iii) verificación de condiciones operativas de: equipos de soldadura (calibrados y en buen estado), materiales de aporte y consumibles, gases, materiales base, iv) calidad del cordón de soldadura de raíz, v) preparación de la raíz de la junta antes de soldar por el otro lado, vi) temperatura de precalentamiento y entre pasadas, vii) secuencia de pases de soldadura, viii) calidad de los cordones de relleno y presentación de la soldadura, ix) limpieza entre pasadas, x) apariencia, dimensionamiento final de la soldadura, xi) distorsión y deformación generada en la soldadura, xii) tratamiento post soldadura, xiii) otros detalles [31].

2.1.5.1 Desarrollo de soldaduras con proceso GMAW

En el desarrollo del proceso de las soldaduras se hicieron dos secuencias distintas en el proceso de soldadura para poder analizarlas para poder obtener resultados favorables y

viables en donde se desarrollará un diagrama se debe de tener en cuenta lo siguiente y como resultado que se obtendrá como muestra Figura 14.

2.1.5.1.1 Elaboración del procedimiento de soldadura

Para seleccionar el proceso de soldadura se requiere conocer el comportamiento del metal base ante un determinado ciclo térmico y la compatibilidad existente con los materiales de aporte, la configuración geométrica y facilidad de soldadura, la relación de costos/tiempos /beneficios acordes con el volumen de producción y la satisfacción de calidad de soldadura especificada y los niveles de habilidad y destreza de los soldadores y operarios de soldadura disponibles [32].

Como resultado de este trabajo se definen las siguientes actividades:

- ✓ Conformar el elemento estructural según geometría determinada para el análisis.
- ✓ Se realizarán soldaduras acordes con la junta y secuencias definidas con proceso GMAW sobre láminas de acero al carbono ASTM A36, con gas protector 80Ar20CO₂.
- ✓ Se realizarán mediciones de voltaje, corriente y velocidad de soldadura para la determinación del aporte térmico.
- ✓ Se evaluará por inspección visual las soldaduras obtenidas definiendo la calidad superficial de las mismas.

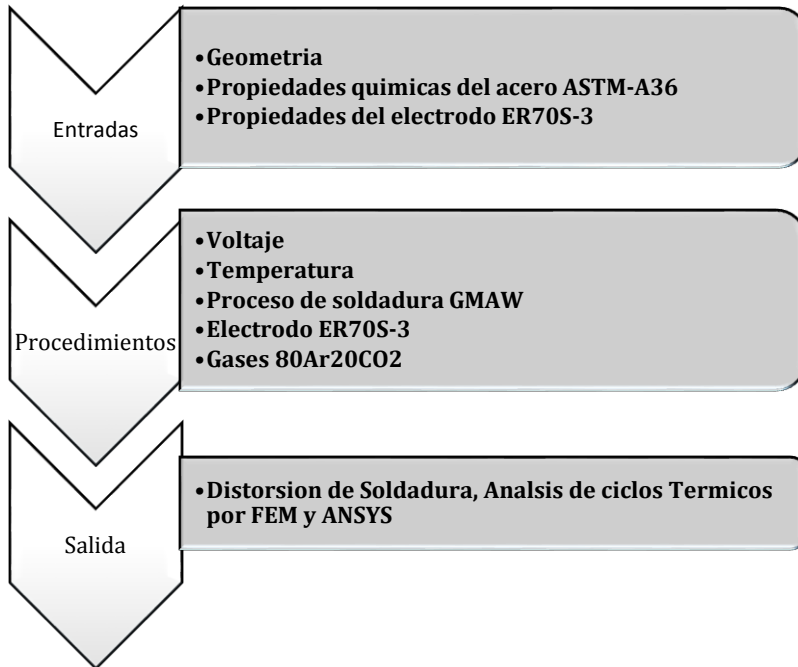


Figura 14.-Esquema del proceso de soldadura de un elemento estructural soldado

2.1.6 Determinación experimental de secuencias de soldadura con menores efectos sobre la distorsión

Se realizo una fase previa donde se experimentó las secuencias de soldadura, continua e intermitente en donde estas se analizaron las secuencias y así poder elegir correctamente la secuencia de las pruebas experimentales que se estarán analizando en el desarrollo de la investigación, como se muestra a continuación en la Figura 15. Secuencias Determinadas para el proceso GMAW.

Perfil	Esquema de probeta	Secuencia 1	Secuencia 2
(RECTO)			
Perfil	Esquema de probeta	Secuencia 1	Secuencia 2

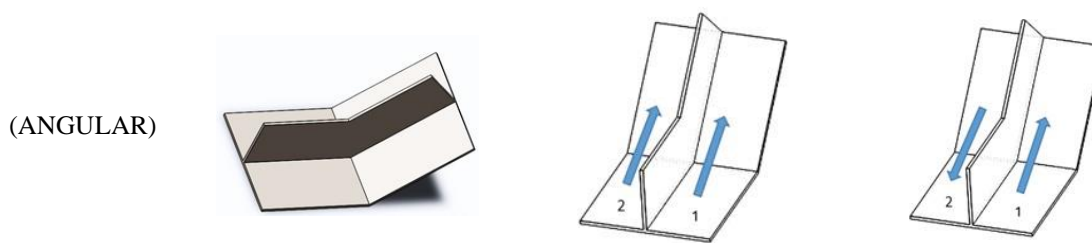


Figura 15.-Secuencias Determinadas para el proceso GMAW

Esta fase de investigación, se realizará los diseños experimentales ocupando un acero bajo en carbono, para poder desarrollar el análisis de la distorsión en base a un elemento estructural soldado en juntas de filete mediante el proceso GMAW, en donde se pueda tener resultados esperados en base al proceso. Estos diseños serán útiles de acuerdo con los parámetros dados cuyos resultados dependen de las variables que no controlamos, en donde se buscare que proceso es más viable de acuerdo con el análisis de la distorsión generada en el elemento soldado.

Se desarrollarán dos secuencias de soldadura con el proceso GMAW en donde ocuparemos un acero bajo en carbono con la geometría de la pieza dada el cual se hará una breve explicación de cada diseño a realizar.

1.- Se hará una secuencia de soldadura en el elemento estructural soldando en junta de filete, en donde se dividirá en 4 lados aplicando la soldadura intercaladamente de un lado a otro.

2.-La segunda secuencia de soldadura en el elemento estructural también soldada en junta de filete se le aplicara en los ambos lados de la pieza.

Con estos experimentos obtendremos diferentes datos, en base a los experimentos realizados.

2.1.7 Análisis de ciclos y aporte térmico

Tener en cuenta la distribución de las Termocuplas tipo K en las pruebas de experimentación, esto es para cada observación del tratamiento, el cual están fabricadas por una aleación de 90% de níquel y 10% de cromo es el conductor positivo y un conductor compuesto de 94% de níquel, 2% de Aluminio, 3% de manganeso y 1% de Silicio como

elemento negativo. Este termopar puede medir temperaturas de hasta 1200° C. Ya que el níquel lo hace resistente a la oxidación. Se los utiliza con mucha frecuencia en los hornos de tratamientos térmicos.

Se obtiene el comportamiento de la temperatura a lo largo de todo el tiempo de un punto cualesquiera del metal durante la soldadura el ciclo térmico representa la historia térmica de un punto cualquiera del metal y por ello tiene influencia notable en la microestructura final de dicho metal y en sus propiedades mecánicas.

Los elementos estructurales en la experimentación, se ocuparon para las pruebas experimentales por el proceso de soldadura GMAW, se realizó el análisis de los ciclos térmicos en 4 elementos estructurales, dos rectos y dos con un ángulo de 45°, ocupando 15 termopares de tipo K en cada prueba para de los elementos estructurales en junta de filete, cuyos puntos fueron en la Zona Afectada por la Temperatura (ZAT) de la junta de filete y del Metal Base (MB) cuyas distancias entre cada punto de los termopares fue de 100 mm de cada uno de los puntos, se describe los siguientes esquemas como estarán ubicados los termopares, el cual cuenta con una ranura de 1mm de diámetro y una profundidad de perforación de 2.5 mm en el elemento estructural en juntas de filete, En donde los ciclos térmicos son para poder medir el comportamiento de la temperatura aplicada en el material base y la zona afectada por la temperatura el cual se va expandiendo térmicamente durante el proceso de soldado Figura 16 Análisis de ciclos.

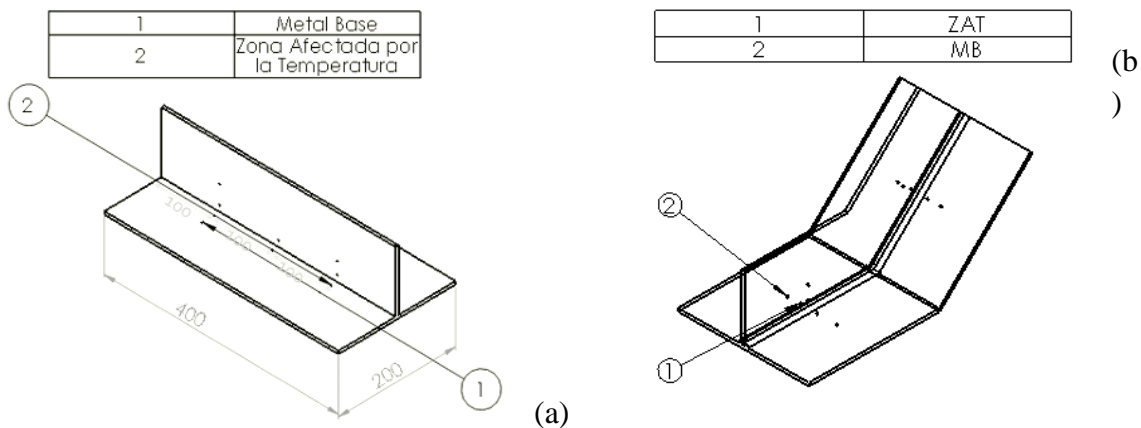


Figura 16.-Análisis de ciclos Térmicos

De la misma forma como se muestra en la Figura 17 se obtuvo la adquisición de datos de los ciclos térmicos en tiempo real en base a las soldaduras en junta en T sobre las 4 placas analizadas de ambos modelos con las diferentes secuencias que se determinaron

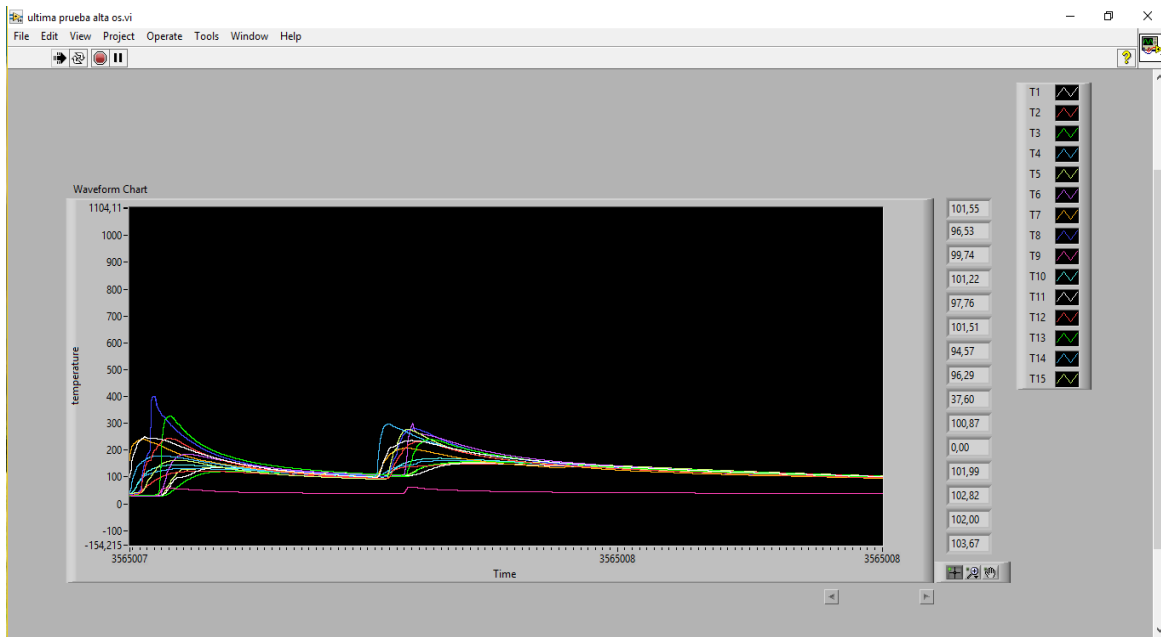


Figura 17.- Ciclos térmicos en tiempo real en base a las soldaduras en junta en T

2.2 Configuración de la Simulación

Fue desarrollado un análisis numérico en el cual se estará obtenido un resultado ocupando los datos obtenidos experimentalmente y a su vez ocupando el software ANSYS en donde se podrá obtener el comportamiento térmico sobre el elemento estructural como se muestra.

para la configuración de la simulación de las formulaciones matemáticas que respaldan ANSYS MECHANICAL APLD son principalmente convección y conducción ocupando la primera ley de la termodinámica establece que la energía térmica se conserva. Especializándose en un volumen de control diferencial:

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \{L\} T \right) + \{L\}^T \{q\} = \ddot{q} \quad \text{ec. (25)}$$

Donde:

ρ = densidad

c = calor específico

t = tiempo

T = Temperatura ($T=(x,y,z,t)$)

$$\left\{ \begin{array}{c} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{array} \right\} = \text{vector operador}$$

$$\{V\} = \left\{ \begin{array}{c} V_x \\ V_y \\ V_z \end{array} \right\} = \text{vector de velocidad para el transporte masivo de calor}$$

Donde:

$\{q\}$ = Flujo de calor

\ddot{q} = Tasa de generación de calor por unidad de volumen

Debe ser observado que los términos $\{L\}T$ y $\{L\}^T\{q\}$ también pueden ser interpretados como ∇T y $\nabla \cdot T$, respectivamente donde ∇ represente el operador de Grad. $\nabla \cdot Y$ representa el operador de divergencia.

La ley de Fourier se utiliza para relacionar el vector de flujo de calor a los gradientes térmicos

$$\{q\} = -[D]\{L\}T \quad \text{ec. (26)}$$

Donde

$$\begin{bmatrix} K_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz} \end{bmatrix} = \text{Matriz de conductividad}$$

K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} = conductividad en las direcciones x, y, y z del elemento, respectivamente

Combinando las ecuaciones 25 y 26

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \{L\}T \right) + \{L\}^T ([D]\{L\}T) + \ddot{q} \quad \text{ec. (27)}$$

Expandiendo la ecuación 27 a su forma más familiar.

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \ddot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad \text{ec. (28)}$$

Se asumirá que todos los efectos están en el sistema cartesiano global

Se consideran tres tipos de condiciones de limite. Se presume que están sobre el elemento entero.

1.- Temperaturas especificadas que actúan sobre la superficie S_1 :

$$T = T^* \quad \text{ec. (29)}$$

2.- Cuando T^* es la temperatura especificada

3.- flujos de calor especificados sobre la superficie S_2

$$\{q\}^T \{n\} = -q^* \quad \text{ec. (30)}$$

Donde:

$\{n\}$ = vector normal exterior de la unidad

$-q^*$ = Flujo de calor especificado

Flujo de calor especificado como se muestra en la Figura 18.

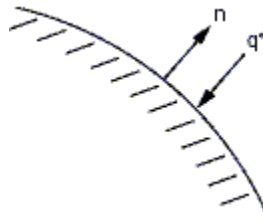


Figura18.-Flujo de calor

Superficies de convección especificadas que actúan sobre la superficie S_3
 (Ley de enfriamiento de Newton):

$$\{q\}^T \{n\} = h_f (T_S - T_B) \quad \text{ec. (31)}$$

h_f = coeficiente de temperatura

T_B = Temperatura a granel del líquido adyacente

T_S = Temperatura en la superficie del modelo

Superficies de convección indicadas

Para un fluido que fluye más allá de una superficie sólida, la temperatura a granel T_B es igual a la temperatura de corriente libre T_{FS} .

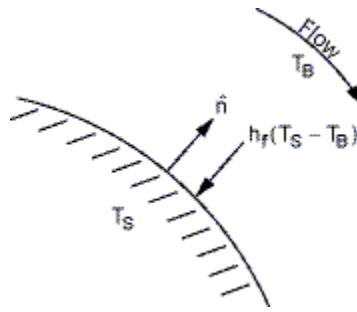


Figura 19.-flujo de calor

Para el caso de los orificios de purga en un sólido, la efectividad de la película (η) explica el escape del refrigerante a través de los orificios de enfriamiento a la superficie externa del sólido. La temperatura a granel T_B es entonces una combinación de la temperatura de flujo libre de T_{FS} y la temperatura del refrigerante que sale, T_{EX} .

$$T_B = T_{FS}(1 - \eta) + T_{EX}(\eta) \quad \text{ec. (32)}$$

$$0 < \eta < 1.$$

Pasajes de enfriamiento en un sólido como se muestra en la Figura 20.

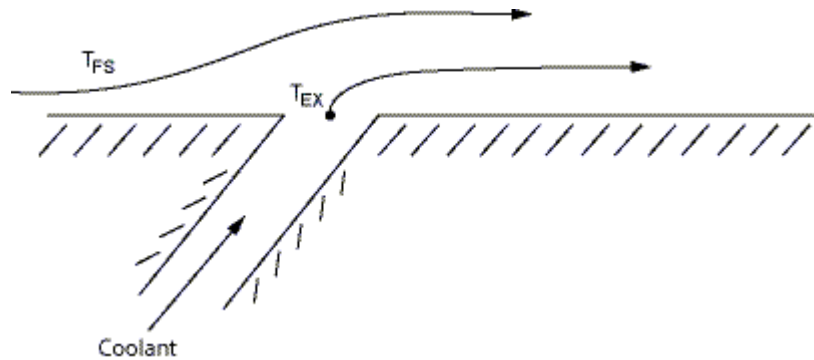


Figura 20.-Pasajes de enfriamiento

Tenga en cuenta que el flujo de calor especificado positivo está en el límite (i.e, en la dirección opuesta a \hat{n}), el cual explica los signos negativos en la ecuación 30 y 31
 Combinando la ecuación 26, 30 y 31

$$\{\hat{n}\}^T [D]\{L\} T = q^* \quad \text{ec. (33)}$$

$$\{n\}^T [D]\{L\} T = h_f(T_B - T_S) \quad \text{ec. (34)}$$

Premultiplicando la ecuación 27 por un cambio virtual de temperatura, integrando sobre el volumen del elemento, y combinando con la ecuación 32-33 y la ecuación 34 con cierta manipulación se obtiene:

$$\int_{vol} (\rho c \delta T \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{V\}^T \{L\} T \right) + \{L\}^T \{ \delta T \} ([D] \{L\} T)) d(vol) = \int_{S_2} \delta T q^* d(S_2) + \int_{S_3} \delta T h_f (T_B - T) d(S_3) + \int_{vol} \delta T \ddot{q} d(vol) \quad \text{ec. (35)}$$

Donde:

Vol= volumen del elemento

δT =Una temperatura virtual permisible (= $\delta T(x,y,z,t)$)

Estrés térmico

Una de las propiedades de los metales es que transfiere calor. Los cambios físicos que ocurren con esta transferencia incluyen la expansión cuando la temperatura aumenta y la contracción cuando la temperatura disminuye. Esta expansión y contracción se produce en las tres dimensiones.

El estrés térmico es el estrés que se produce como resultado de la expansión térmica de los miembros estructurales metálicos cuando su temperatura cambia. Los cambios en la temperatura causan deformación térmica a los miembros estructurales, y los valores de estas deformaciones se dan por la siguiente relación

$$\delta_t = \alpha * L * (T - T_0) \quad \text{ec.(36)}$$

Donde:

Delta (t) = deformación del miembro estructural debido al cambio de temperatura

alfa = coeficiente de la temperatura de la extensión, que es una característica material

L = longitud original del miembro

T = temperatura final

T_0 = temperatura inicial

Cuando el miembro es libre de moverse y expandirse, no hay tensión ejercida sobre ella. Sin embargo, cuando el movimiento y la expansión son restringidos, entonces se produce estrés térmico.

El valor de la fuerza de reacción causada por la restricción del movimiento en la dirección de la expansión es igual al valor de la fuerza necesaria para comprimir el haz en la dirección opuesta a la misma cantidad de deformación, que se da en la siguiente fórmula:

$$F = \frac{\delta * E * A}{L} \quad \text{ec.36}$$

donde:

El Delta es la desviación de la viga debido a la fuerza de reacción, que es igual a la desviación del rayo debido a la extensión termal, pero en la dirección opuesta en los metros para el S.I. y los pies para el sistema inglés.

A es el área de la sección seccionada transversalmente en m² o pies².

E es el módulo de elasticidad del material del cual se fabrica el haz en PA o lb/pies².

y L es la longitud de la viga en m o ft.

Desde:

$$\alpha * L * (T - T_0) = \frac{F * L}{E * A} \quad \text{ec. (37)}$$

Sigue,

Donde

$$\sigma = \alpha * E * (T - T_0) \quad \text{ec. (38)}$$

$$\delta_T = \delta_F \quad \text{ec. (39)}$$

Sigue, la fórmula se podría reorganizar para convertirse en como

$$\frac{F}{A} = \sigma \quad \text{ec. (40)}$$

Sigma es el estrés causado por la expansión térmica.

2.2.1 Desarrollo del modelo para el análisis numérico

Se realizo un modelo numérico con los variables obtenidas, como la temperatura, el voltaje, el tiempo requerido sobre su proceso y el calor aplicado en la pieza con base a las pruebas experimentales realizadas, en donde se modelara ocupando el análisis de elemento finito y obteniendo resultados correspondientes sobre la distribuciones de temperatura de cada una de las probetas realizadas de los diferentes secuencias por proceso de soldadura y con

resultados podemos comparar cada una de las probetas realizadas por el proceso de soldadura por GMAW.

Obteniendo las pruebas de los procesos experimentales de la pieza se llevara a cabo a realizar el modelado de cada uno de los diferentes procesos en el cual se obtendrán en el software de Elemento Finito en el software (ANSYS), el cual se ocupara para realizar el análisis correspondiente a la distorsión de cada uno de los proceso que se harán, obteniendo el análisis de cada proceso de la pieza se podrán obtener los resultados obtenidos de las simulaciones que se realizaran para poder hacer comparaciones de la distorsión de la pieza soldada.

2.2.2 Modelo Térmico

Los tratamientos termo mecánicos son tratamientos de procesado que combinan deformación plástica con tratamientos térmicos en orden de producir microestructuras y mejoras en las propiedades que no se pueden obtener por la aplicación independiente de un tratamiento térmico convencional u operaciones de deformación plástica. Generalmente, los objetivos de los tratamientos termomecánico son el aumento de la resistencia mecánica con el mejoramiento de la ductilidad y/o tenacidad [33]. También tomando en cuenta el ciclo térmico de la distorsión será aplicado tomando en cuenta su carga térmica (Q) en donde se presentarán combinaciones generando la distorsión en el elemento soldado estructuralmente y por lo cual se estará analizando numéricamente en donde se obtendrá un resultado deseado en base al estudio del elemento estructural por los datos obtenidos de su análisis de su distorsión del elemento soldado.

2.2.3 Simulación numérica con la herramienta ANSYS

Obteniendo resultados del modelo, se hará dicha comparación con el análisis numérico, para poder comparar los resultados de cada uno de los procesos, se analizará cual es el que menos genera distorsión y así poder generar una propuesta de que proceso es el más conveniente y confiable el cual tenga una menor distorsión en la pieza soldada para poder elegir el proceso. Sin embargo, si es el caso de que ninguno de los procesos coincide con el resultado del análisis numérico y su resultado de la simulación se tendrá que realizar de nuevo los procesos de soldadura para poder llegar a un resultado concreto tanto en análisis como en la simulación y así tener un valor más exacto y poder obtener el mejor optimo proceso.

3

CARACTERIZACIÓN DE UN ELEMENTO ESTRUCTURAL SOLDADO

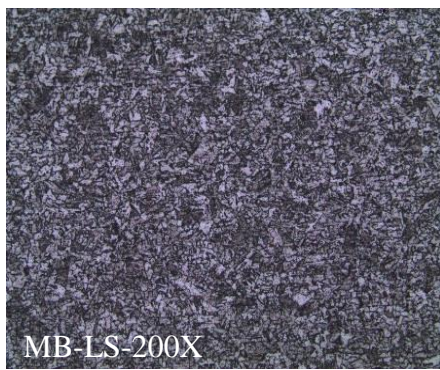
En esta etapa se comprobará la caracterización del material base a ocupar y por lo cual se determinará el estudio del material para desarrollar el proceso de soldadura en elemento estructural soldado.

3.1 Determinación de la identidad del material base

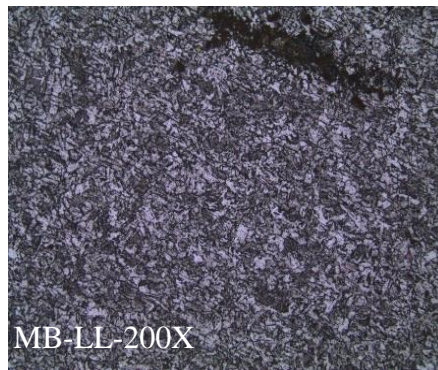
Se determinó si el acero ASTM A-36 bajo en carbono es el correcto en donde la empresa nos certifica del material, pero también se determinó con un análisis si el material es apropiado, se trabajó con la identidad del material base con los siguientes procedimientos y normas que están aplicadas a esta investigación.

3.1.1 Análisis Microestructural de Metal Base

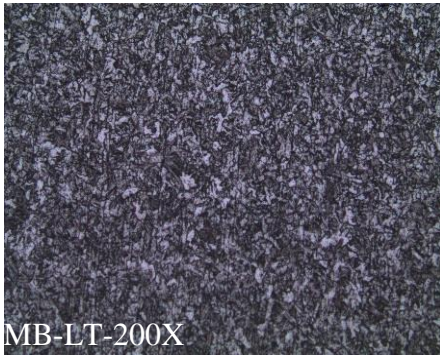
Se muestra la microestructura del metal base en estado de suministro en la Figura 21. del acero bajo en carbono ASTM-A36 a 200 X, siendo los lados analizados del material gracias al ataque químico realizado ocupando el microscopio óptico obtenido en el laboratorio de química (equipo proporcionado por la UAC, Barranquilla, Colombia). a.-Lado superficial, b.- Lado longitudinal y c.- Lado transversal.



a)



b)



c)

Figura 21.-Microestructura del Metal Base

3.1.2 Perfil de dureza del Metal ASTM A-36

Se muestran en la Figura 17.b los valores de dureza del acero bajo en carbono ASTM-A36 realizándose 4 indentaciones aleatorias del material en la dirección, transversal y longitudinal ocupando el durómetro Zwick/Roell y punta de diamante en forma piramidal como se muestra en la Figura 22.a (equipo proporcionado por la UAC, Barranquilla, Colombia) cuya carga dada fue de 3000 kgf durante 10 segundos, los valores obtenidos fueron promediados como se muestra en la Tabla 3 y se muestra su comportamiento en una gráfica en la Figura 23.

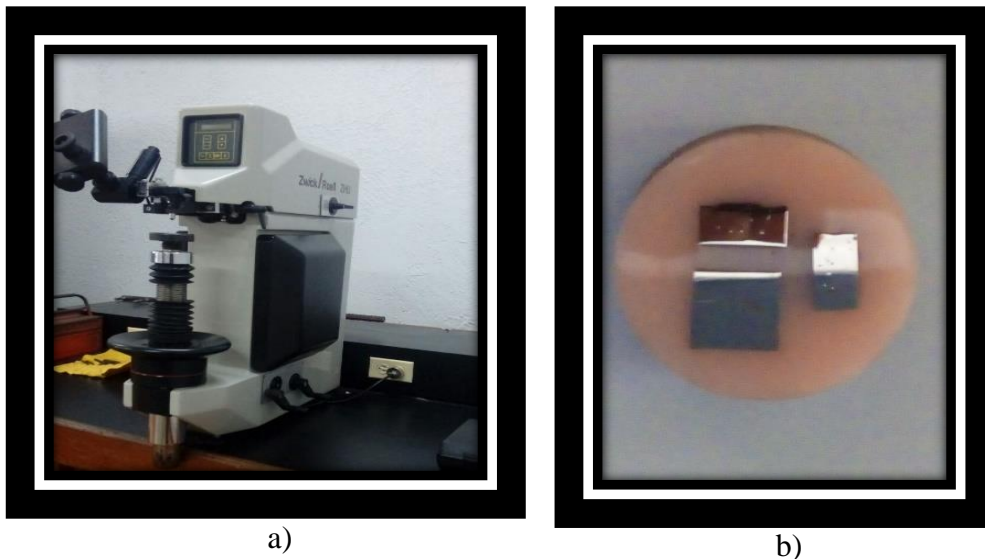


Figura 22.a)Durómetro Zwick/Roell, 22b) Identaciones aleatorias al material

Tabla 3.-Valores de Dureza por Vickers en el metal base. Valores obtenidos con una carga de 3000kgf durante 10 segundos

Dureza por Vickers (HV)						
Material	Lados	Puntos				Valor promedio
		1	2	3	4	
ASTM-A36	Lado Transversal	61.8	55.6	45.6	55.5	54.625
	Lado Lateral	97	95.7	90.5	95	94.55

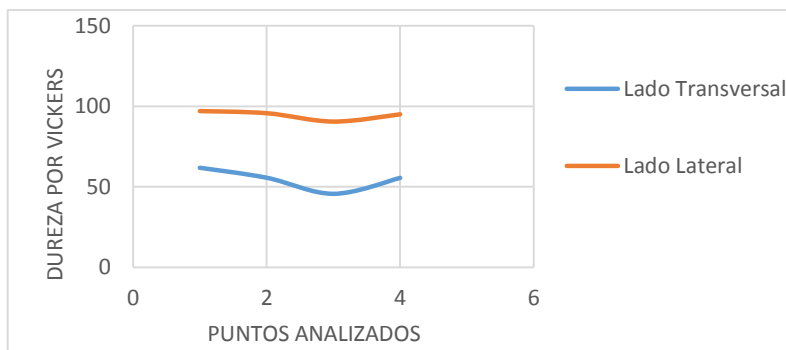


Figura 23.-Grafica de dureza

3.2 Calificación del procedimiento de soldadura

En la Tabla 4. Se muestra los parámetros utilizados en la realización de las soldaduras previas con el proceso GMAW, para determinar la fase final con los parámetros obtenidos.

Tabla 4. Parametrización y cálculo de los aportes térmicos (HI). I_m = corriente media promedio. V = voltaje promedio. V_s = velocidad de soldadura promedio. HI = aporte térmico promedio. η = eficiencia.

SOLDADURAS PREVIAS ASTM -A36 - Proceso GMAW_MatAporte ER70S3_MG 80Ar20CO ₂							
CUPON		I_m (A)	V (V)	V_s (cm/min)	V_a (pulg/min)	η teórico*	HI_ASTM - A36 [KJ/cm]
Pr 1	a	144.30	24.04	42.86	370	0.60	2.91
	b	144.53	24.09	37.50	370	0.60	3.34
Pr 2	a	144.36	24.26	37.50	370	0.60	3.36
	b	144.66	24.26	40.00	370	0.60	3.16
Pr 3	a	139.90	23.90	32.73	370	0.60	3.68
	b	139.02	23.94	29.51	370	0.60	4.06
Pr 4	a	155.07	24.14	41.86	395	0.60	3.22
	b	150.18	24.27	36.73	395	0.60	3.57
Pr 5	a	167.87	24.95	45.08	470	0.60	3.34
	b	167.19	24.93	44.67	470	0.60	3.36

Los valores obtenidos de los ensayos previos, sirvieron como referencia para la realización de las soldaduras definitivas, ya que se estuvo analizando el tiempo aplicado en la soldadura el grosor y que estas no tuvieran alguna fisura como la penetración de la soldadura en las juntas de filete de los ensayos previos, decidiendo que la prueba ultima en la junta de filete en T se logró una buena penetración de la soldadura, basándonos por la norma AWS D1/D1.M:2010, ocupando los métodos de ensayo y criterios de aceptación para la clasificación de WPS en donde se realizó lo siguiente cuyas dimensiones se utilizaron en base a la norma de 150 mm de ancho por 300 mm de largo [34]:

3.2.1 Criterios de Aceptación de la soldadura

Las soldaduras deben de cumplir con los siguientes requerimientos [34]:

- ✓ Cualquier fisura debe ser inaceptable sin importar el tamaño
- ✓ Todos los cráteres deben de ser llenados hasta la sección transversal completa de la soldadura.
- ✓ El perfil de la soldadura debe de cumplir con los requerimientos.
- ✓ La socavación del metal base no debe de exceder 1/32 pulg. [1 mm]

Cumpliendo con estos requerimientos visuales en las pruebas realizadas con el proceso de Soldadura GMAW se hizo lo siguiente: tres cortes de una pulgada en la junta en T como se muestra en la Figura.24 a).-Elemento estructural analizado, en base a la AWS D1/D1.M:2010 se muestra en la Figura 24.b).-Criterio de cortes para la penetración de la soldadura en las tres secciones [34].

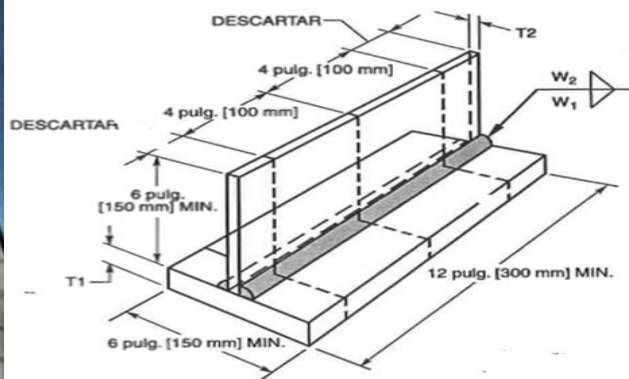


Figura 24 a).-Elemento Estructural en junta en T y b).- Criterio de Cortes

3.2.2 Ensayo de Macro-ataque

Las probetas se prepararon con un adecuado acabado en sus caras y se pulieron cada una de las caras a examinar, se aplicó la solución química Nital, pudiéndose observar la profundidad de penetración de la soldadura en la probeta cuyos parámetros correspondientes se eligieron como los más adecuados en el cupón Pr5 de las soldaduras previas y certificar bajo la norma de la soldadura y presentación en los cupones soldados como se muestra en la Figura 25.

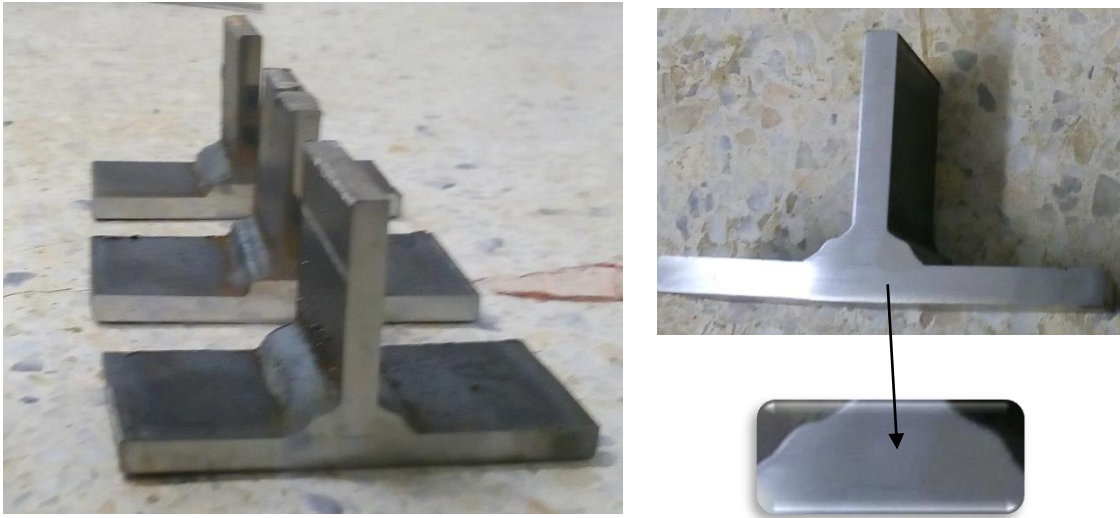


Figura 25.-Penetración del proceso GMAW

4

RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos en base a las pruebas previas para poder lograr obtener las variables requeridas y así obtener dichos resultados como se muestran a continuación.

4.1 Soldaduras Definitivas

En este proceso se definieron los parámetros en base a los ensayos realizados correspondientes conforme a la soldadura previa y la obtención variables; voltaje y corriente media, en esta fase las soldaduras definitivas se desarrollaron con forme a las dos secuencias discutidas anteriormente ocupando el proceso de soldadura en GMAW (en las instalaciones ubicadas en la Universidad Autónoma del Caribe, Barranquilla, Colombia), realizando 12 pruebas definitivas en los elementos estructurales en junta de filete, de las cuales 4 fueron analizadas sus ciclos térmicos y cuya obtención de datos se muestran en la Tabla 5, los tiempos cada uno de los elementos soldados.

Tabla 5.-Datos obtenidos de pruebas finales en base a su Parametrización y cálculo de los aportes térmicos (HI). Im= corriente media promedio. V= voltaje promedio. Vs= velocidad de soldadura promedio. HI = aporte térmico promedio. η = eficiencia.

SOLDADURAS DEFINITIVAS ASTM -A36 - Proceso GMAW_MatAporte ER70S3_MG 80Ar20CO ₂							
CUPON	Replica	Im (A)	V (V)	Vs (cm/min)	Va (pulg/min)	η teórico*	HI_ASTM - A36 [KJ/cm]
Perfil Recto							
D1S1AR	R1	166.39	24.92	46.65	470	0.60	3.20
D1S1BR		170.94	25.34	43.12	470	0.60	3.62
D1S2AR	R2	175.73	24.95	45.37	470	0.60	3.48
D1S2BR		165.68	24.92	42.62	470	0.60	3.49
D2S1AR	R1	175.83	24.95	45.49	470	0.60	3.47
D2S1BR		165.68	24.92	45.32	470	0.60	3.28
D2S2AR	R2	170.88	24.85	47.78	470	0.60	3.20
D2S2BR		170.44	24.85	46.88	470	0.60	3.25
TERMOPARES							
D3S1AR	R3	155.61	25.36	38.4677032	470	0.60	3.69311641

D3S1BR		166.18	24.74	44.83	470	0.60	3.30
D3S2AR	R3	155.71	25.36	40.00	470	0.60	3.55
D3S2BR		167.02	25.15	36.36	470	0.60	4.16
PERFIL ANGULAR							
D1S1AA	R1	173.52	24.90	49.33	470	0.60	3.15
D1S1BA		171.95	24.86	53.79	470	0.60	2.86
D1S2AA	R2	167.92	24.86	45.06	470	0.60	3.34
D1S2BA		174.97	24.94	51.35	470	0.60	3.06
D2S1AA	R1	169.33	24.90	44.79	470	0.60	3.39
D2S1BA		172.18	24.82	44.25	470	0.60	3.48
D2S2AA	R2	162.45	24.83	51.25	470	0.60	2.83
D2S2BA		174.71	24.85	45.76	470	0.60	3.42
TERMOPARES							
D3S1AA	R3	164.3	25.02	33.6889388	470	0.60	4.39278592
D3S1BA		172.2	29.87	40.7331976	470	0.60	4.54592605
D3S2AA	R3	157.88	24.58	40	470	0.60	3.49262136
D3S2BA		164.32	25.05	43.02	470	0.60	3.44453222

4.1.1 Análisis Experimental de las Distorsiones

La obtención de las distorsiones en los elementos estructurales se realizó con el medidor de caratula de marca MITUTOYO como se muestra en la Figura 26 (Equipo proporcionado por la Universidad Autónoma del Caribe Barranquilla, Colombia) cuyo proceso fue la obtención de datos de los elementos estructurales en junta en T sobre su distorsión antes y después de ser soldadas por el proceso de Soldadura GMAW para poder observar su comportamiento de las distorsiones generadas por el proceso en base a las secuencias realizadas.

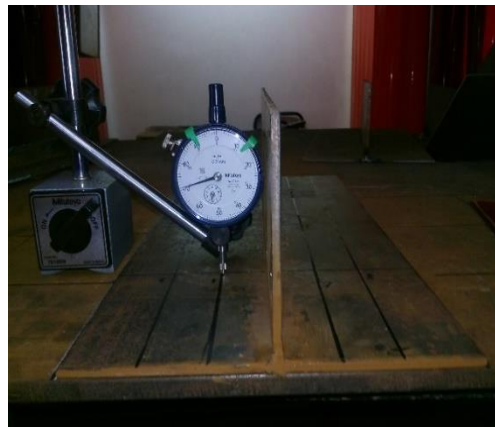
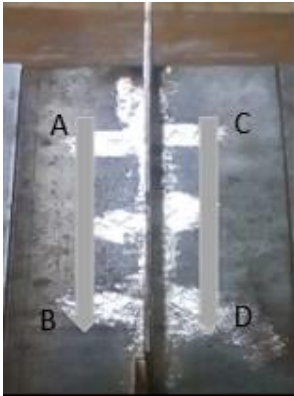


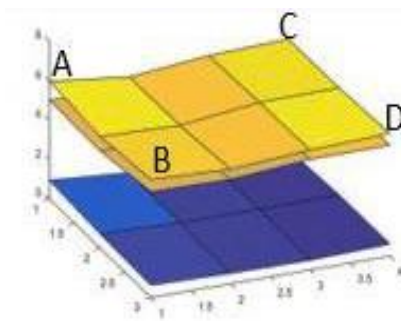
Figura 26.-Medidor de caratula

Obteniendo las distorsiones correspondientes de los elementos estructurales en junta de filete soldadas se llevó a realizar la comparación de las distorsiones antes y el después respecto a las secuencias que se ocuparon se obtuvo la distorsión de cada uno de los elementos estructurales como se muestra en la Figura 27 se analizó la primera secuencia y se adquirió las mediciones de sus distorsiones totales de la junta en T y por último la distorsión obtenida por el proceso de soldadura GMAW el cual nos da entender como es el comportamiento de su distorsión después de ser soldada .

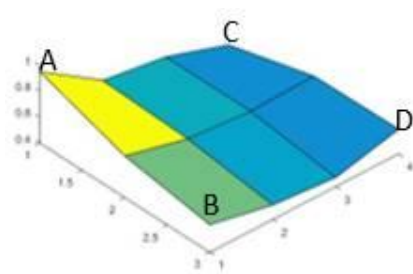
Secuencia D1S1AR



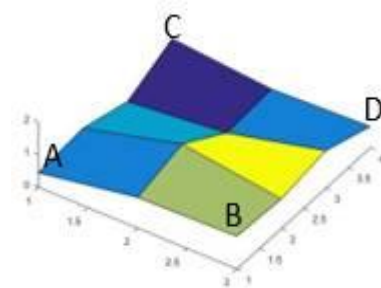
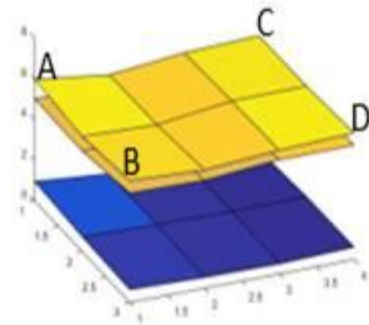
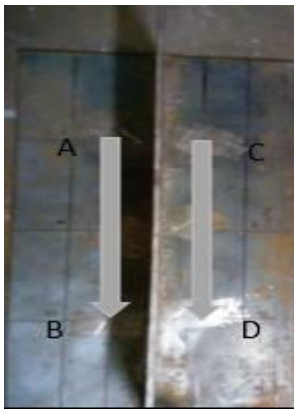
Distorsiones



Distorsión obtenida



Replica D1S2AR



REPLICA D3S1AR

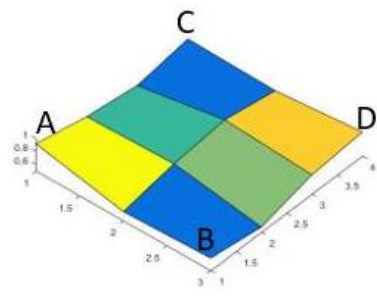
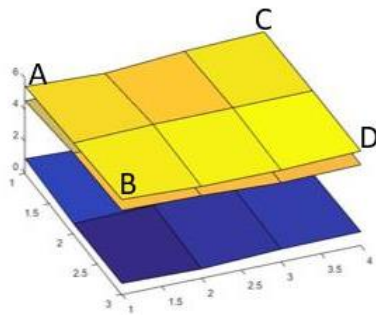
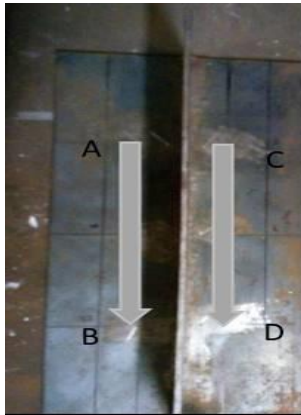
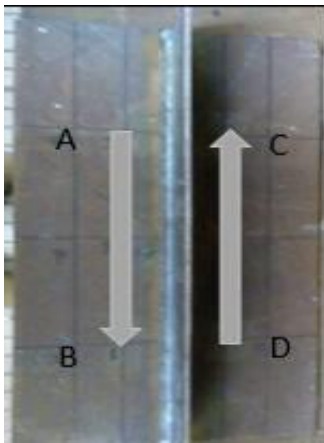
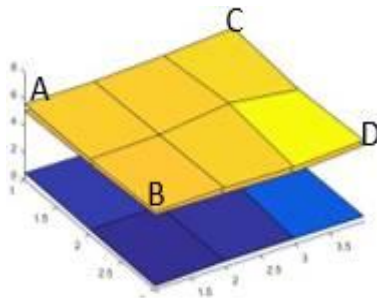


Figura 27.- Primera Secuencia y obtención de distorsiones por el proceso de soldadura GMAW. En la siguiente Figura 28 se presenta la segunda Secuencia con su código de la junta y obtención de distorsiones por el proceso de soldadura GMAW.

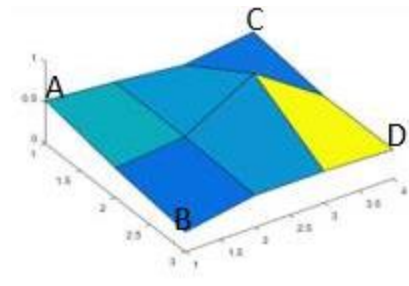
Secuencia D2S1AR



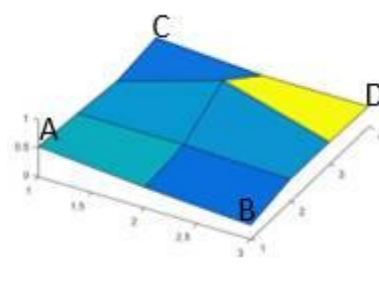
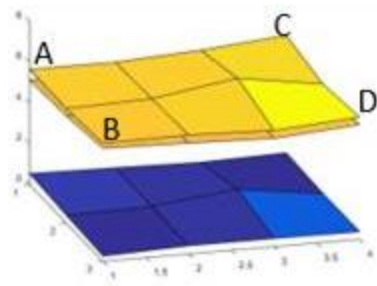
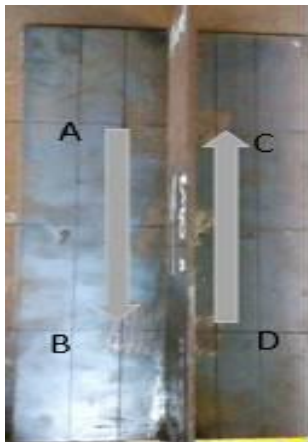
Distorsiones



Distorsión obtenida



REPLICA D2S2AR



REPLICA D3S2AR

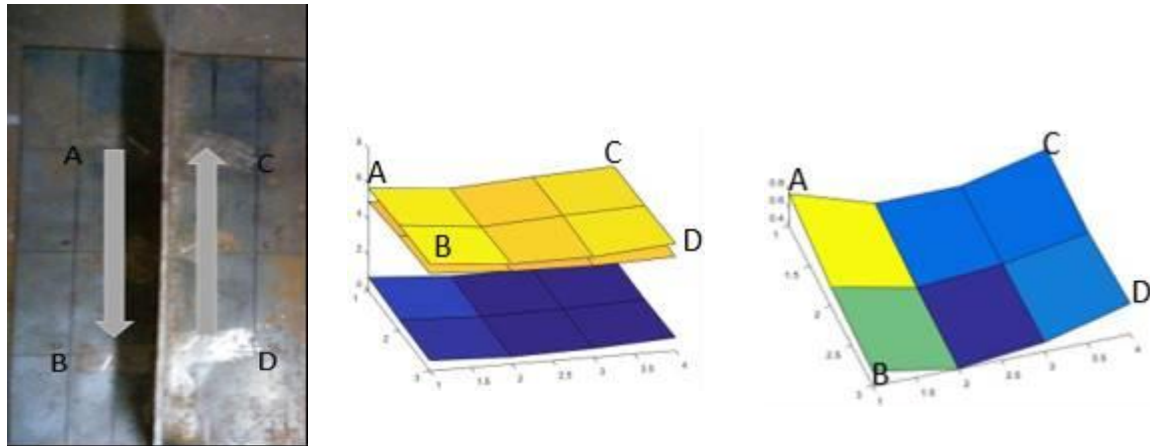


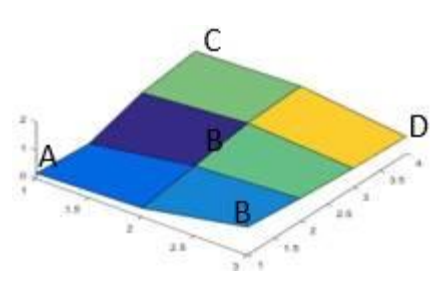
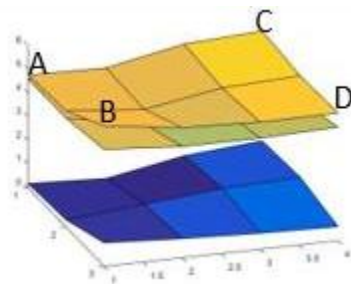
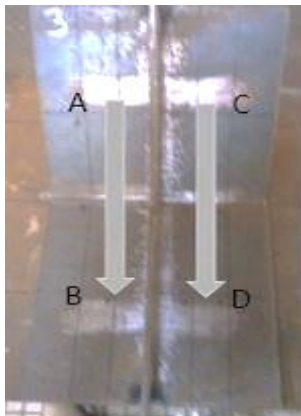
Figura 28.-Segunda Secuencia de obtención de distorsiones por el proceso de soldadura GMAW

En las Figuras 27y 28 se obtuvieron las distorsiones de los elementos estructurales rectos y como se muestra en la Figura 29 y 30 es la obtención de la primera y segunda secuencia de las distorsiones angulares en base al proceso de soldadura GMAW.

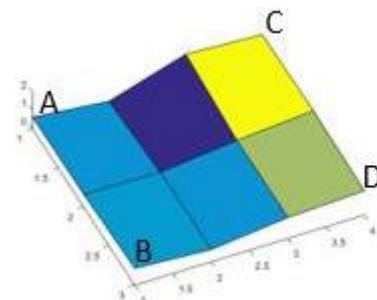
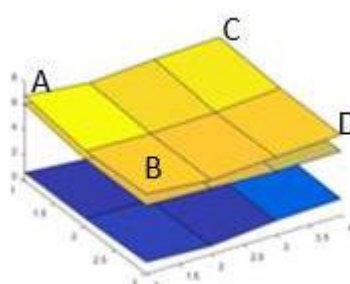
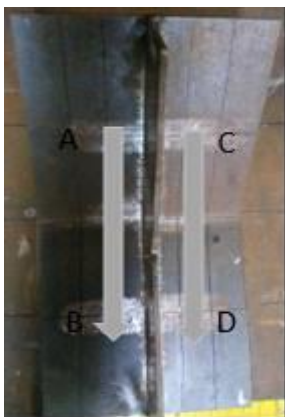
Secuencia D1S1AA

Distorsiones

Distorsión Obtenida



REPLICA D1S2AA



REPLICA D3S1AA

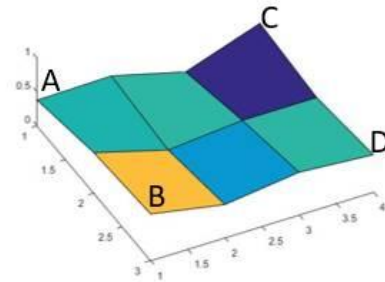
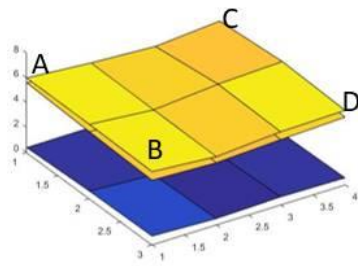
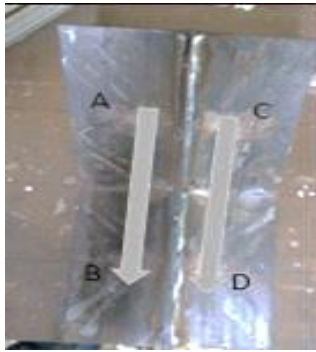
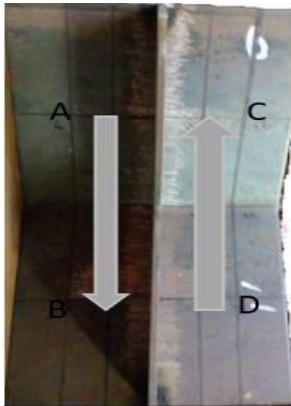
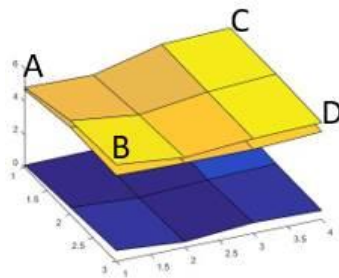


Figura 29.-Primera Secuencia de obtención de distorsiones por el proceso de soldadura GMAW

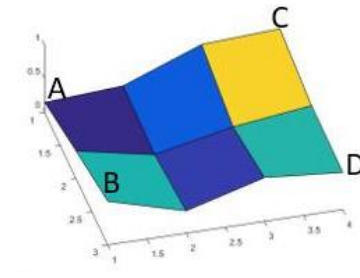
Secuencia D2S1AA



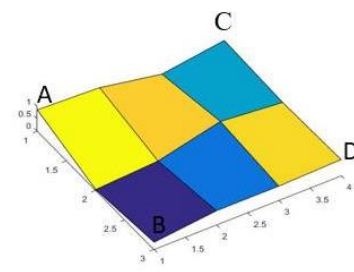
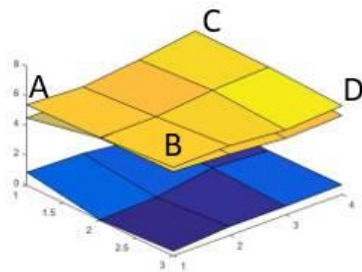
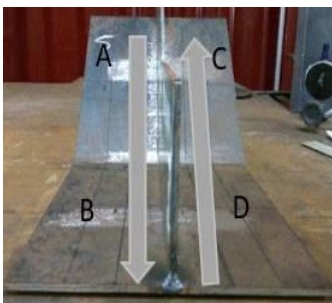
Distorsiones



Distorsión Obtenida



REPLICA D2S2AA



REPLICA D3S2AA

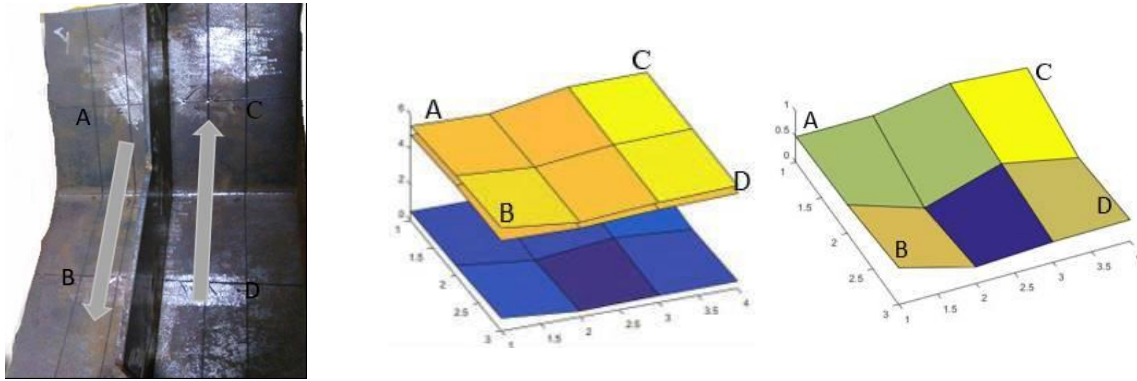


Figura 30.-Segunda Secuencia de obtención de distorsiones por el proceso de soldadura GMAW

Como resultado en base a las mediciones obtenidas experimentalmente por el proceso de soldadura GMAW, se pudo comprobar que los elementos estructurales en junta de filete rectos generaron una mayor distorsión ya que con los datos obtenidos se puede observar gracias que tuvieron una de distorsión ya se puede ver en la imagen de las distorsiones obtenidas en la primera secuencia, sin embargo, los elementos estructurales en T ocupando la secuencia intermitente generaron una menor distorsión como se puede observar en las gráficas obtenidas de los elementos soldados dando como resultado en comparación con las secuencias que la secuencia que nos da una menor distorsión es la intermitente .

4.1.2 Análisis de Ciclos Térmicos

La medición de la temperatura en los elementos estructurales durante el enfriamiento se realizó con la ayuda de 15 termocuplas tipo K, ubicadas cerca del cordón de soldadura. Las termocuplas van conectadas a un módulo de entrada, montada sobre el chasis y esta a su vez acoplada al PC, como se muestra en el diagrama presentado en la Figura 31, para la visualización de los resultados se emplea el software LabView.

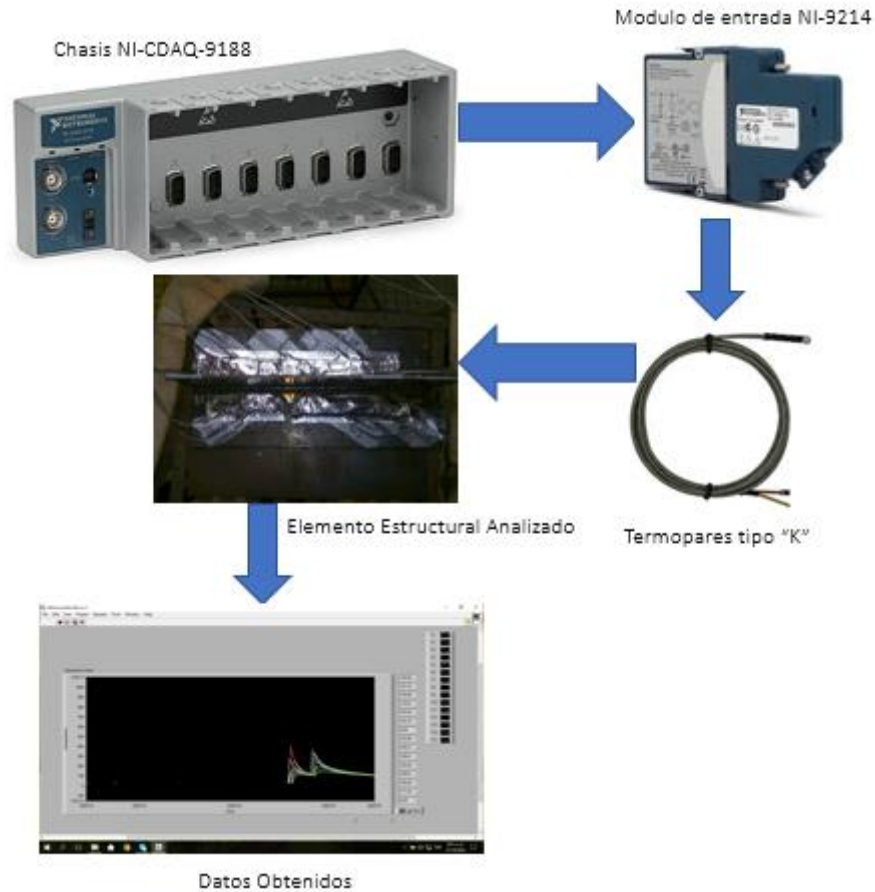


Figura 31.-Esquema de conexión de datos

Los ciclos térmicos fueron obtenidos con el software LABIEW y manejo del módulo de entrada NI-9214 cuenta con 15 entradas para termopares isotérmicos.(Equipo proporcionado por la UAC, Barranquilla, Colombia), ocupando los termopares tipo "K", donde se colocaron la ZAT a una distancia de 10mm y MB a 30 mm de la soldadura de los elementos estructurales el cual se utilizó como adherente yeso y cinta industrial para fijar los termopares, sin embargo para que no se generara un desprendimiento de los termopares del yeso con el acero bajo en carbono se colocó una cinta de aluminio Fiback para tener una mejor adherencia y como resultado la obtención de las temperaturas deseadas.

4.1.2.1 Elementos Estructurales Analizados de sus Ciclos

Se realizaron 4 ciclos térmicos en los elementos estructurales en junta de filete, dos elementos rectos y dos angulares, ocupando las secuencias determinadas por proceso de soldadura GMAW, entre cada pasada se dejó un tiempo de enfriamiento de 4 minutos para volver a soldar y por ultimo un tiempo de enfriamiento general por cada elemento de 30

minutos, como resultado se obtuvieron las siguientes graficas de temperaturas de los termopares en los elementos estructurales soldados con la siguiente código

El código D3S1AR, consta es un elemento recto en junta en T ocupando la primera secuencia y la distribución de los termopares se muestra en la Figura 32 en donde se obtuvo la gráfica de los ciclos térmicos por medio de LABIEW y del módulo como se muestra en la Figura 33.

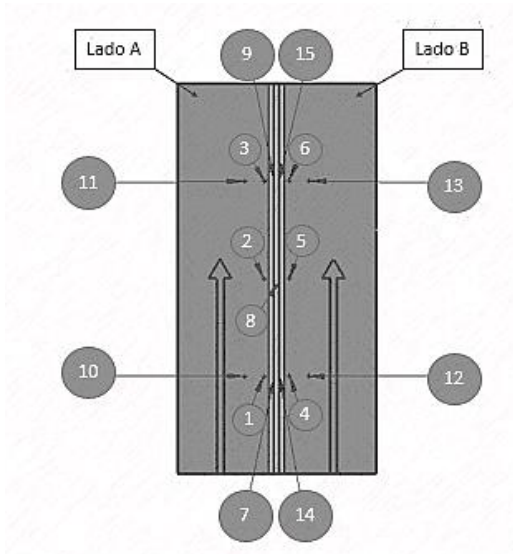


Figura 32.-Distribución de termopares y secuencia de D3S1AR

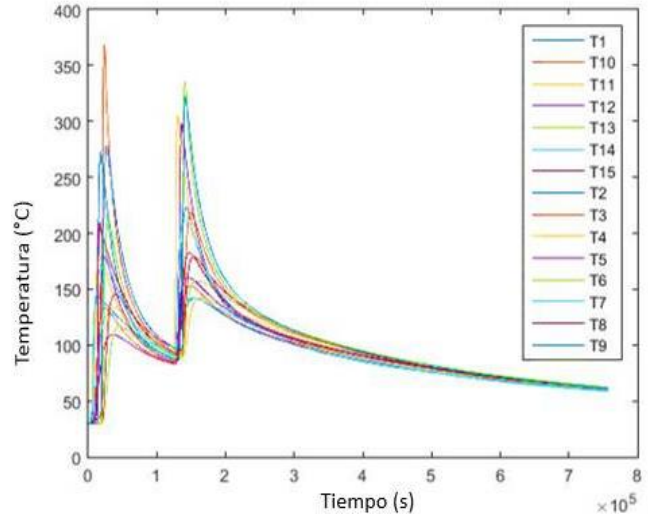


Figura 33.-Ciclos térmicos D3S1AR

Los ciclos térmicos se dividieron en sus lados correspondientes del elemento estructural soldado y ver cuyo comportamiento de su distribución de temperaturas de la ZAT y MB del acero al carbono como se muestra en la Figura 34.-Distribución de temperaturas del elemento D3S1AR, y en la Figura 36.-Elemento Estructural soldado con termopares por el Proceso GMAW, al igual de dicha manera se obtuvieron las velocidades de calentamiento de ambos lados para ver que puntos son los mayores que registran un mayor calentamiento en la placa donde se ubicaron los termopares ya que como se puede observar en la Figura 35.

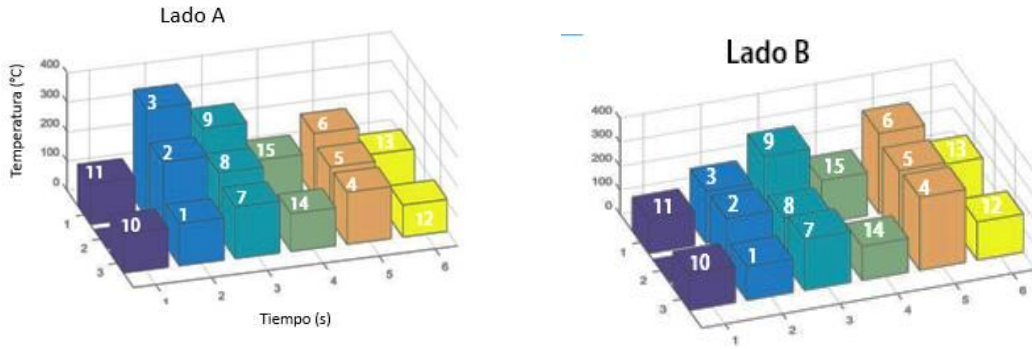


Figura 34.-Distribución de temperaturas del elemento estructural con el código D3S1AR

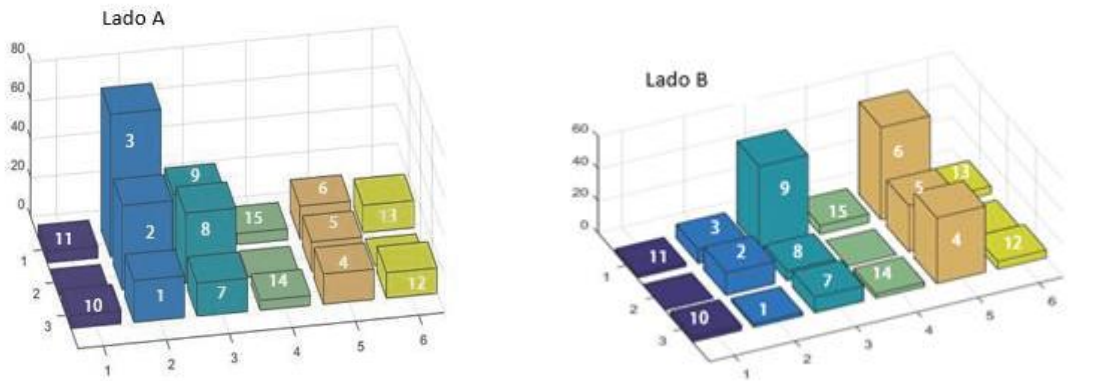


Figura 35.-Velocidad de calentamiento del elemento estructural con el código D3S1AR



Figura 36.- Elemento Estructural soldado con termopares por el Proceso GMAW

El siguiente código D3S2AR, elemento recto en junta en T, ahora ocupando la segunda secuencia y con diferente distribución de los termopares como se muestra en la Figura 37, y la gráfica de los ciclos térmicos obtenidos se muestra en la Figura 38.

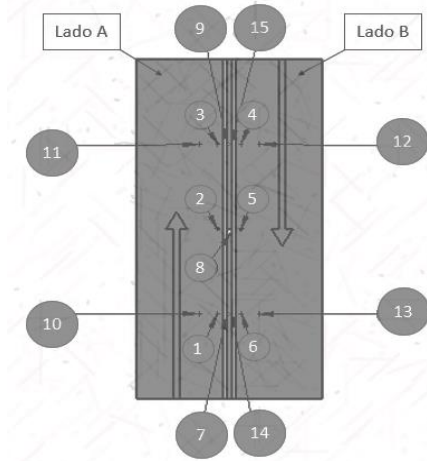


Figura 37.-Distribución de termopares de D3S2AR

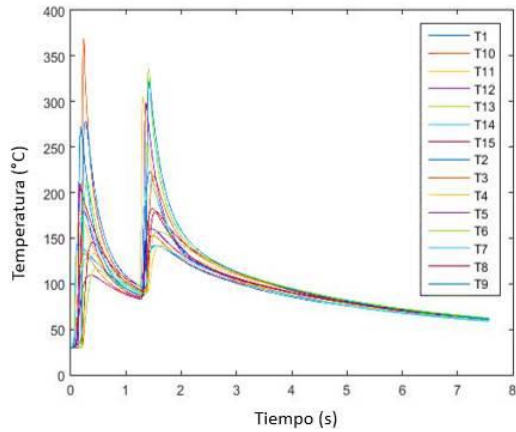


Figura 38.-Ciclos térmicos de D3S2AR

Se repite el mismo proceso en los ciclos térmicos de la división de ambos lados A y B sobre la Distribución de las Temperaturas para poder observar el comportamiento de una mejor manera en ambos lados sobre el elemento como se muestra en la siguiente Figura 39, de tal manera como sus velocidades de calentamiento en ambos lados para observar su comportamiento como se muestra en la Figura 40.

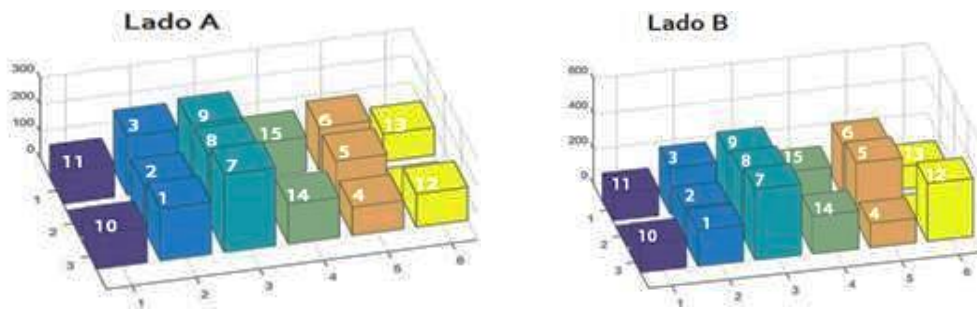


Figura 39.-Distribuciones de temperatura del Elemento con el código D3S2AR

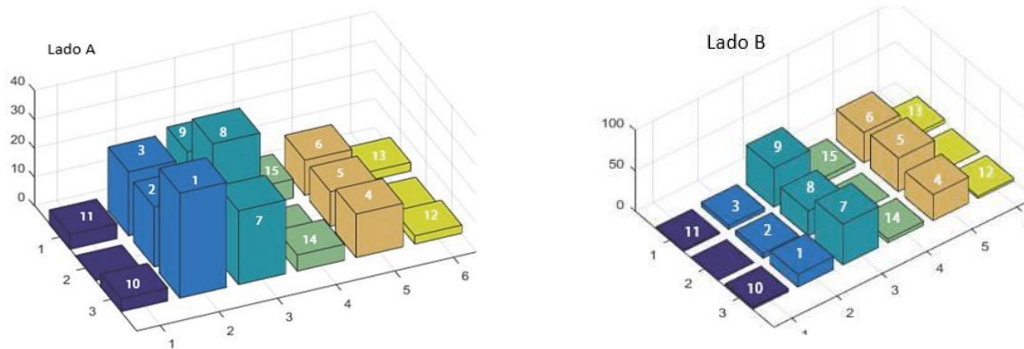


Figura 40.- Velocidades de calentamiento del Elemento con el código D3S2AR

En los últimos elementos estructurales analizados donde cuenta con un ángulo de dobles a 45°, se realizó el mismo procedimiento con las secuencias determinadas anteriormente, el código D3S1AA y las mismas posiciones de los termopares del elemento como se muestra en la Figura 41 y en la Figura 42 se muestra los de ciclos térmicos.

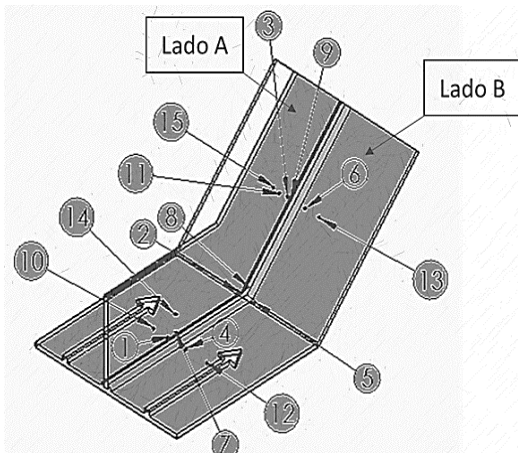


Figura 41.-Distribución de termopares

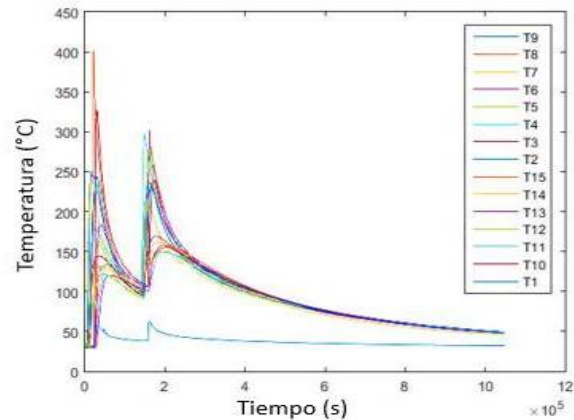


Figura 42.-Ciclos Térmicos

Obteniendo los ciclos térmicos se hace la división de ambos lados A y B sobre la Distribución de las Temperaturas sobre el elemento como se muestra en las Figura 43 A y B de los lados analizados, cuyo elemento soldado se muestra en la Figura 37 también se muestra en la Figura 45 su velocidad de calentamiento.

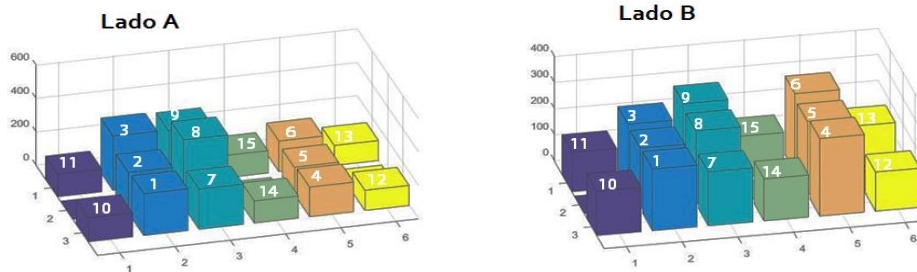


Figura 43.-Distribución de Temperaturas del Elemento con el código D3S1AA



Figura 44.-Elemento Estructural Angular Soldado

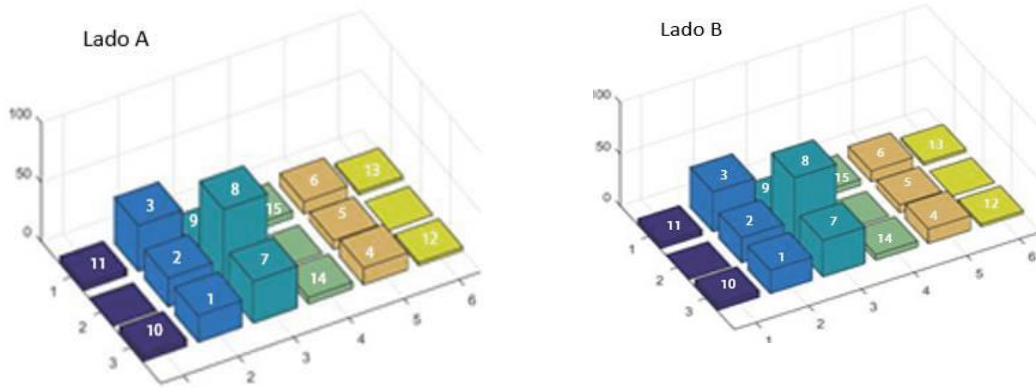


Figura 45.- Velocidad de calentamiento del Elemento con el código D3S1AA

Dando por concluido con el último análisis de ciclos térmicos con el elemento estructural con el código D3S2AA, en la Figura 46 se muestra la distribución de los termopares y en la Figura 47 la gráfica de los ciclos térmicos obtenidos mediante LABIEW.

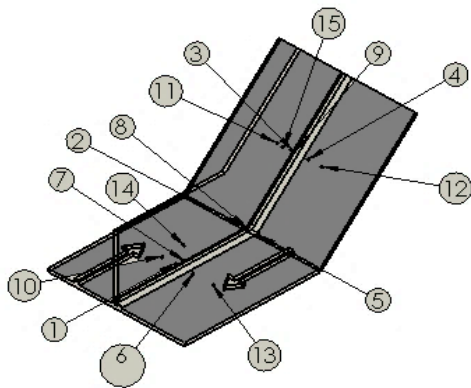


Figura 46.-Distribución de termopares D3S2AA

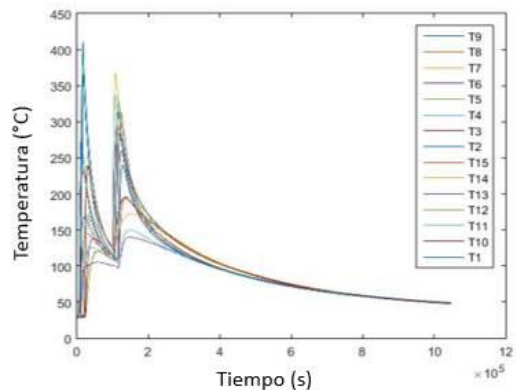


Figura 47.-Ciclos Térmicos

Se obtuvo el último ciclo térmico y la separación de las temperaturas de los lados A y B sobre la Distribución de las Temperaturas sobre el elemento como se muestra en las Figura 48 A y B de los lados analizados, al igual que la velocidad de calentamiento del elemento estructural en sus ambos lados como se muestra en la Figura 49.

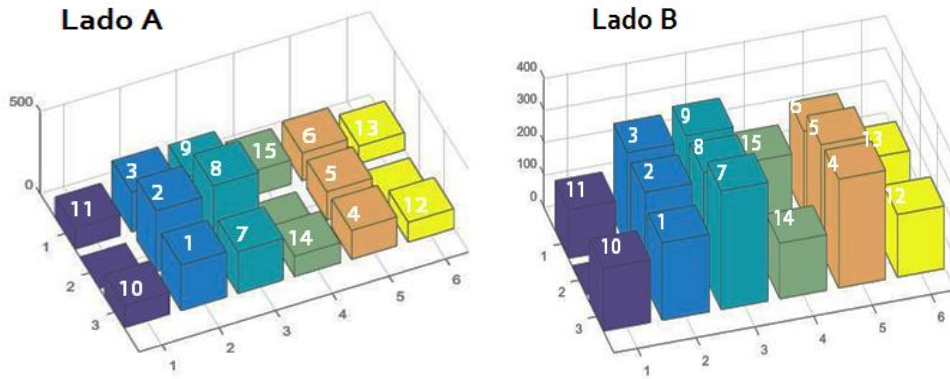


Figura 48.-Distribución de Temperaturas del Elemento Estructural con el código D3S2AA

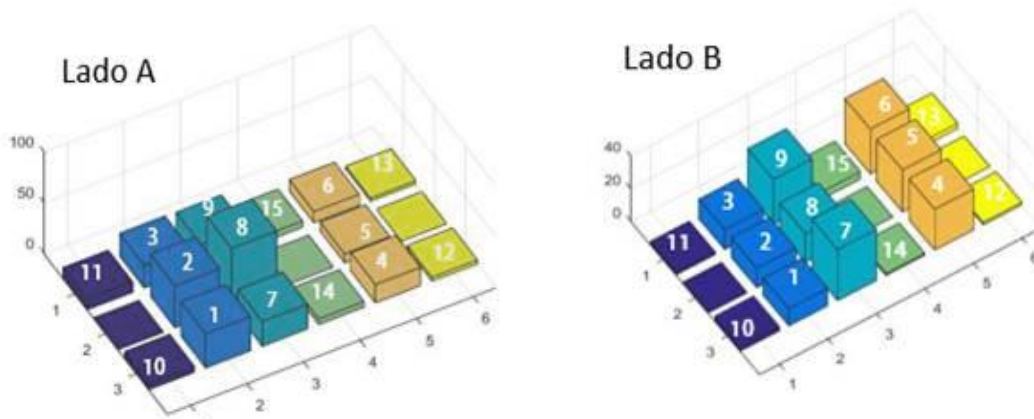


Figura 49.-Velocidad de Calentamiento del Elemento Estructural con el código D3S2AA

La obtención de temperaturas en los diferentes perfiles y secuencias podemos ver como es el comportamiento de cada uno de los elementos estructurales en junta en T y poder ver su distribución de la temperatura con el proceso de soldadura GMAW, sin embargo, también se observó que la distribución de temperatura es diferente de los rectos que los angulares, ya que los elementos angulares manejan una mayor concentración de Temperatura durante el proceso de Soldadura.

Con las comparaciones de la obtención de la distorsión como de la distribución y por último la de la velocidad de calentamiento haciendo detalladamente las comparaciones en sus puntos más altos esto nos da que la mayor distorsión que nos genera en las secuencias seleccionas es la primera secuencia en donde podemos corroborar donde tuvo mayor influencia en el metal donde se tomaron los puntos seleccionados, la segunda secuencia nos dio como resultado una distribución de temperatura mejor distribuida en el meta como resultado podemos decir que la mejor secuencia que nos dio una menor distorsión es la intermitente.

5

RESULTADOS NUMÉRICOS Y COMPARACIÓN CON LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.1 Modelación Numérica.

El modelo matemático se realizó en un equipo de cómputo con las siguientes características: una memoria Ram de 8 GB, con un procesador AMD-8 a 2.6GHz. Por lo cual el tiempo de cómputo puede ser variable al ser simulado por otro tipo de equipo de mayor rendimiento. Se desarrolló tomando en cuenta las propiedades físicas y mecánicas dependientes de la temperatura, asemejando el modelo lo más parecido a la realidad.

5.2 Desarrollo de los Modelos

Los modelos fueron diseñados virtualmente mediante el software SolidWorks 2016 dibujando las piezas con las dimensiones correspondientes, sin embargo, estas fueron seccionadas para obtener los puntos para medir los ciclos térmicos correspondientes como se muestra en las Figura 50 se muestran los dos modelos estructurales.

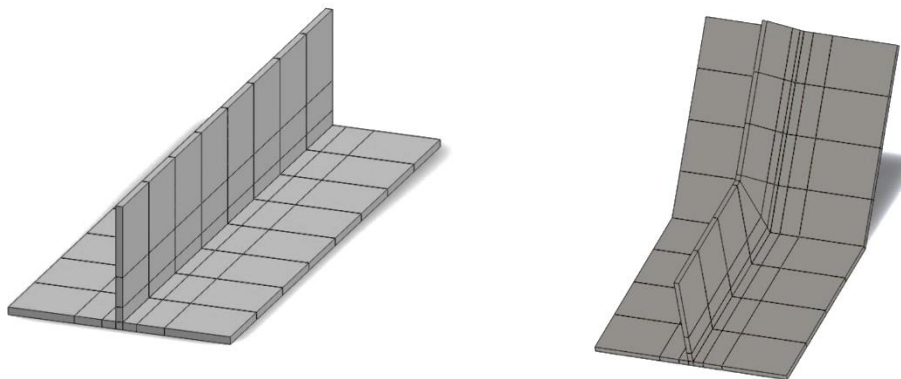


Figura 50.- Modelos Estructurales realizados en SolidWorks

5.3 Modelado en ANSYS

Se desarrollaron los modelos en “ANSYS” el cual este programa puede ser un poco más preciso ya que cuenta con modelos matemáticos en su programación para poder analizar cualquier modelo que uno quiera realizar, cuenta con diferentes paqueterías se analizara y simulara el modelo ocupando las variables que se utilizaron en las pruebas experimentales, ocupando el módulo WORKBENCH 15 se determinó ocupar la librería Transient Thermal para simular el modelo estructural correspondiente como se muestra en la Figura 51.

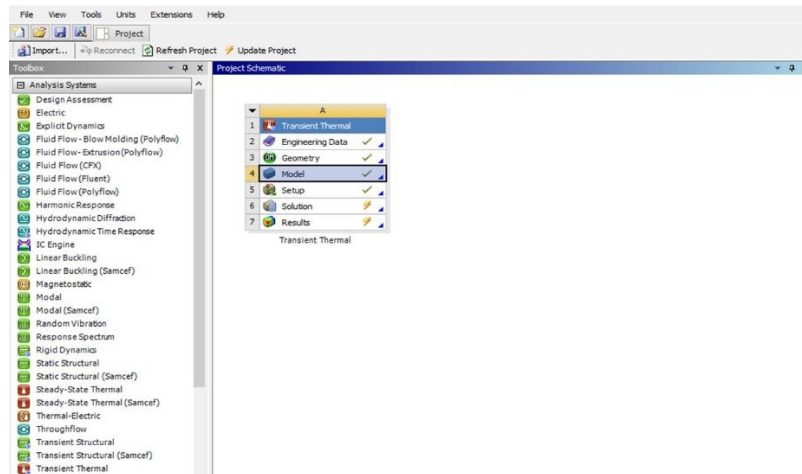


Figura 51.-Modulo Workbench

Se introdujeron las propiedades del material, como calor específico, densidad y conductividad térmica en ANSYS, y por lo tanto de haber aplicado sus respectivas propiedades del material se procedió a trabajar con los mallados modelos estructurales en junta de filete como se presenta en la siguiente Figura 52 a) modelo Recto y b) Modelo Angular.

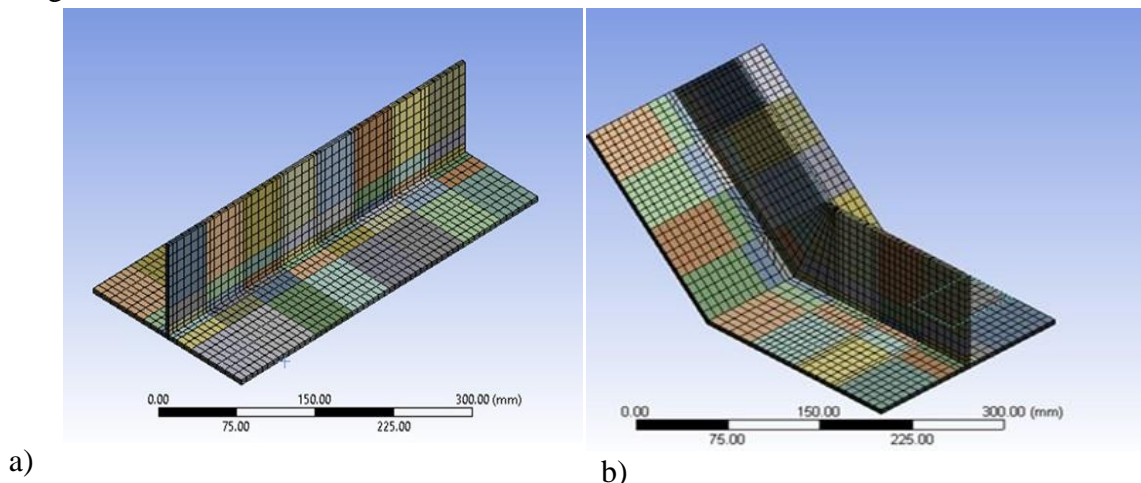


Figura 52.-a) modelo Recto y b) Modelo Angular

Se establecieron sus condiciones de frontera para los elementos estructurales conseguidas por las pruebas experimentales por proceso de soldadura GMAW, el tiempo determinado de cada pasada de las 2 secuencias realizadas por el proceso de soldadura en ambos modelos estructurales en junta de filete, la temperatura de fusión del material de aporte fue de 1400°C, para los cuatro modelos estructurales realizados los modelos que se analizaron en el Software ANSYS.

5.3.1.1 Distribución de Temperatura

Para el análisis de los ciclos térmicos de la temperatura se establecieron los puntos analizados experimentalmente con las mismas distancias de cada elemento estructural en junta de filete ahora en el modelo numérico para obtener sus distribuciones de temperatura y poder realizar dichas comparaciones del modelo numérico con el experimental.

Obtenida la simulación de los modelos numéricos realizados en ANSYS con se obtuvo el comportamiento de la distribución de temperatura en los elementos estructurales como se muestra en la Figura 53 a) Modelo Recto y b) Modelo Angular

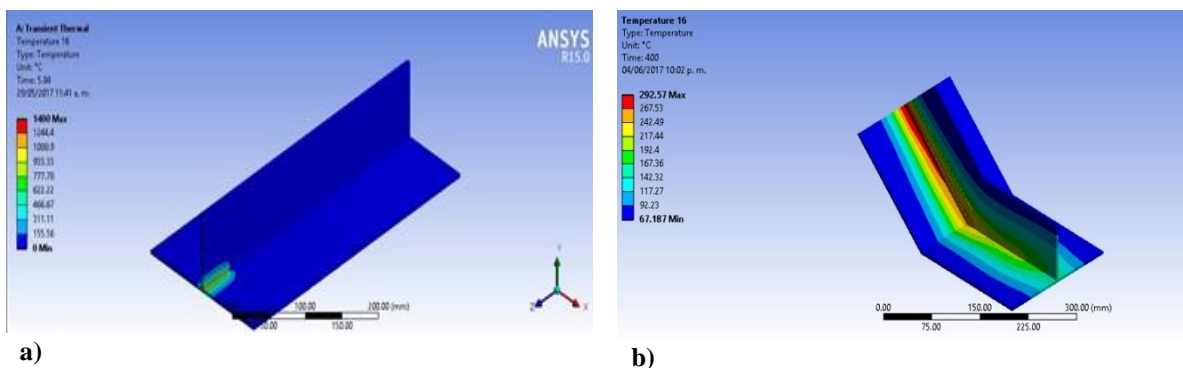


Figura 53.-Distribución de temperaturas en los modelos estructurales analizados a) Modelo Recto y b) Modelo Angular

5.4 Validación de la Simulación

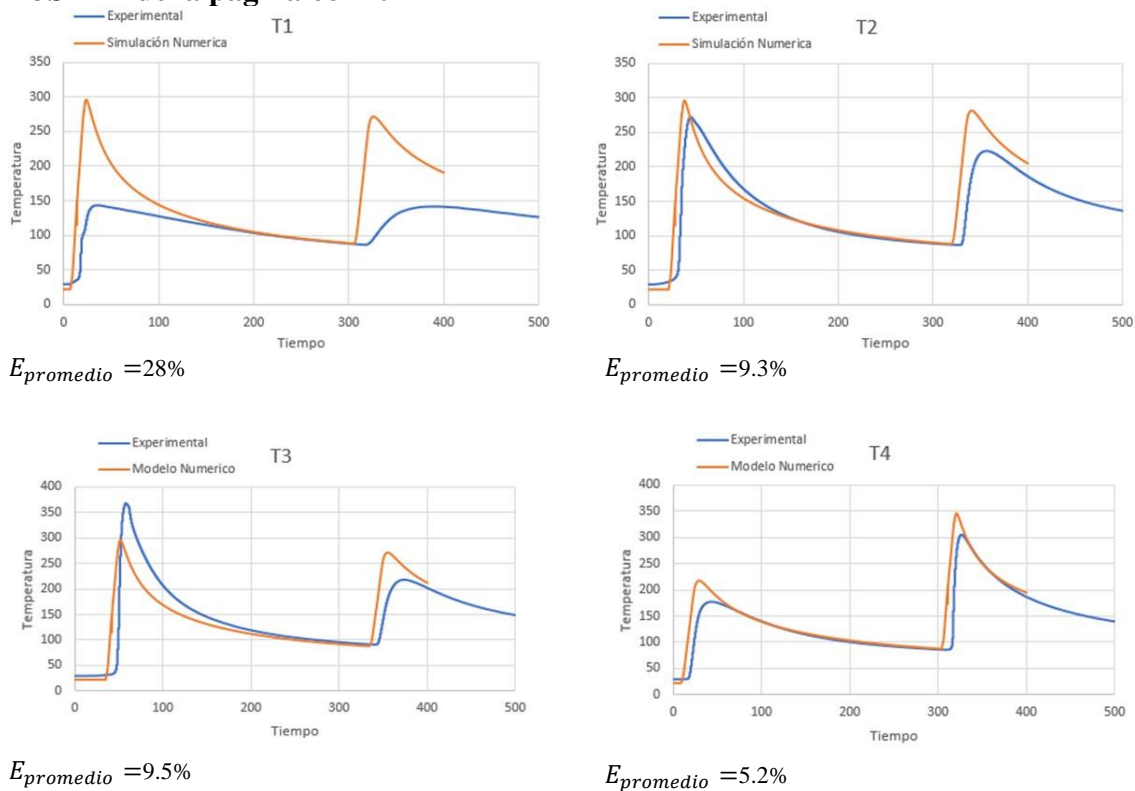
Se realizó el análisis de las distribuciones de temperaturas en los elementos estructurales por lo tanto se pudo observar la distribución de las temperaturas de los puntos analizados por los termopares por el modelo numérico en los 15 puntos determinados experimentalmente y poder analizar las comparaciones correspondientes de cada secuencia.

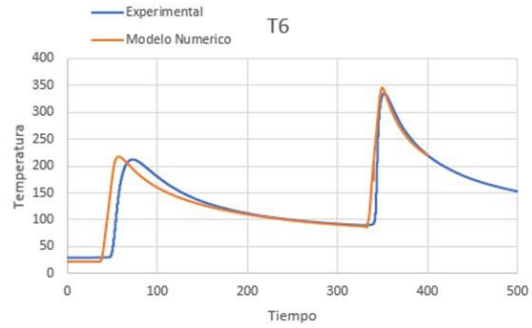
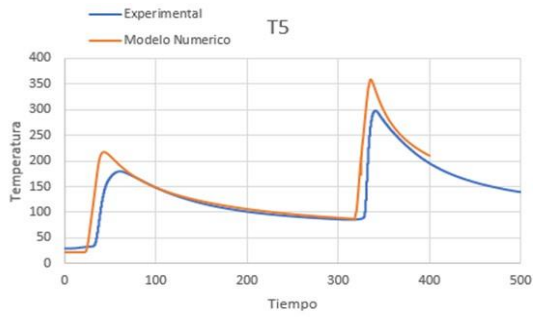
Realizando las comparaciones correspondientes del modelo numérico con el experimental respecto a las gráficas de sus ciclos térmicos de cada uno de los modelos analizados podemos observar que sus curvas de enfriamiento del modelo numérico son más rápidas que el experimental en donde cuenta con un margen de error demasidamente grande con el experimental.

Se detectó el problema, en las condiciones de frontera y también modificando poco las propiedades del material de un acero ASTM A36 modificando el calor específico a 500 y la conductividad térmica a 30, para obtener la calibración de las temperaturas y comparar los resultados obtenidos experimentalmente con lo numérico y así llegar a una cierta similitud ambos resultados de los modelos estructurales.

Obteniendo las distribuciones de temperaturas de las dos secuencias realizadas de ambos modelos estructurales rectos por medio del Software ANSYS, realizamos la comparación o experimental y numérico se pudo obtener el comportamiento de las distribuciones de temperatura de cada uno de los puntos analizados experimentalmente por los termopares son casi similares, se pudo obtener las comparaciones de temperaturas con un mínimo margen de error en la primer secuencia del modelo D3S1AR, se obtuvo las siguientes temperaturas como se muestra en la Figura 54, de color azul representa el experimental y el anaranjado el modelo numérico por lo consiguiente en cada grafica se obtiene su error relativo de cada secuencia en los elementos estructurales aplicados

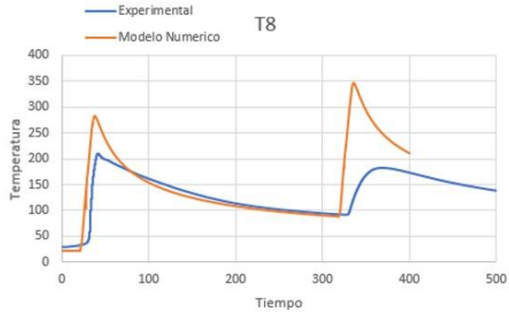
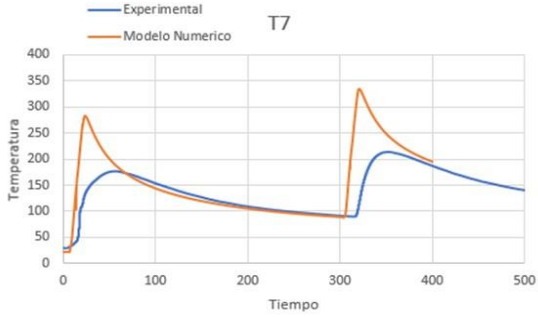
Figura 54.-Comparación de Temperaturas Experimental y Numérico del Elemento D3S1AR de la página 68 -70





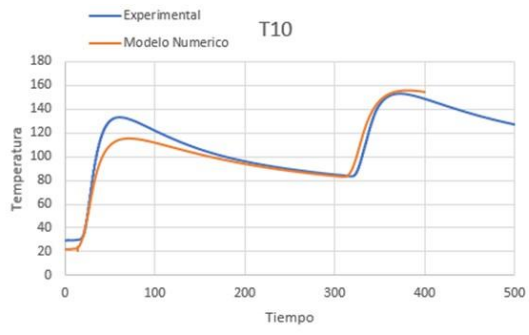
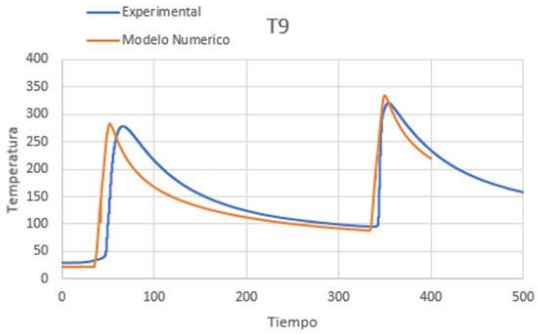
$E_{promedio} = 5.8\%$

$E_{promedio} = 4.5\%$



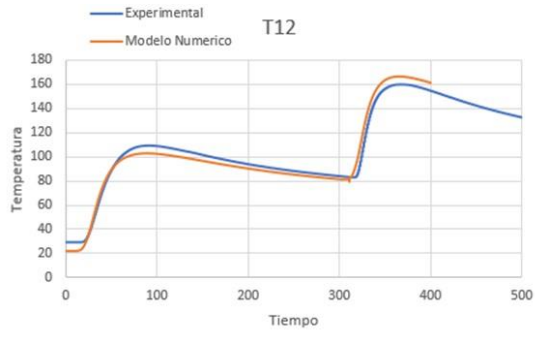
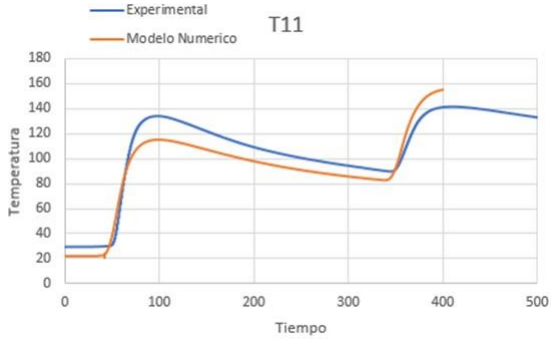
$E_{promedio} = 8.8\%$

$E_{promedio} = 7.3\%$



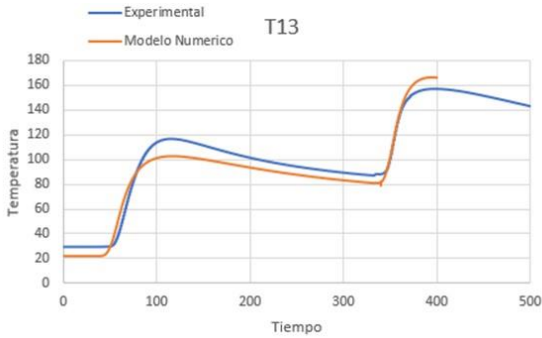
$E_{promedio} = 4.2\%$

$E_{promedio} = 4.9\%$

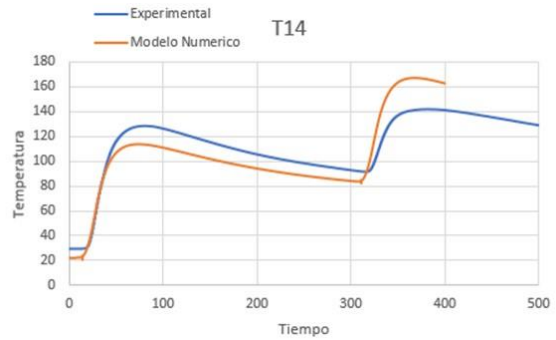


$E_{promedio} = 5.8\%$

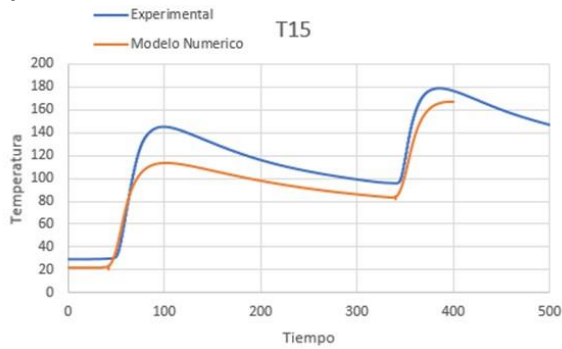
$E_{promedio} = 3.8\%$



$E_{promedio} = 4.6\%$



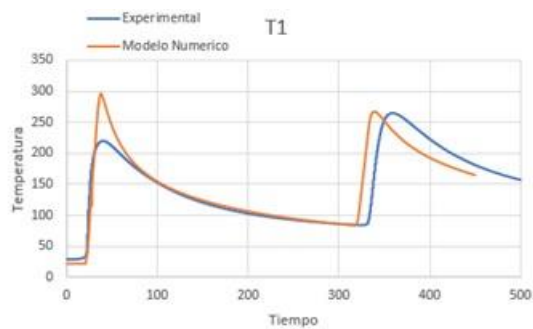
$E_{promedio} = 5.3\%$



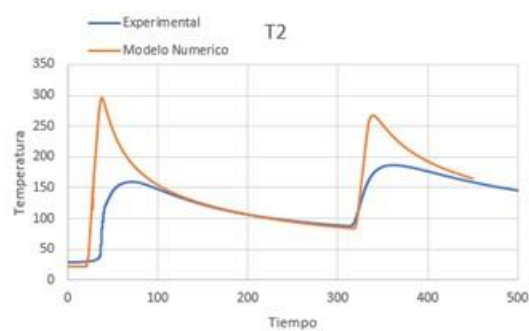
$E_{promedio} = 8.9\%$

Por lo tanto obteniendo el error relativo promedio cada una de las gráficas analizadas de su distribución de temperatura, se obtuvo el error promedio de lo experimental y numérico dando un promedio de 7.7% del elemento estructural D3S1AR

Se procedió a la comparación para la segunda secuencia analizada del modelo estructural D3S2AR, sus graficas de temperatura son las siguientes como se muestra en la Figura 55:
Figura 55.-Comparación de Temperaturas Experimental y Numérico del Elemento D3S2AR de la página 70-72

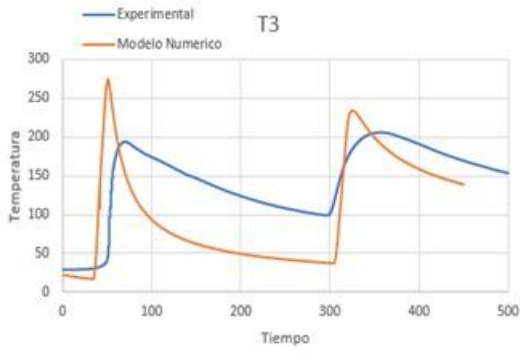


$E_{promedio} = 11\%$

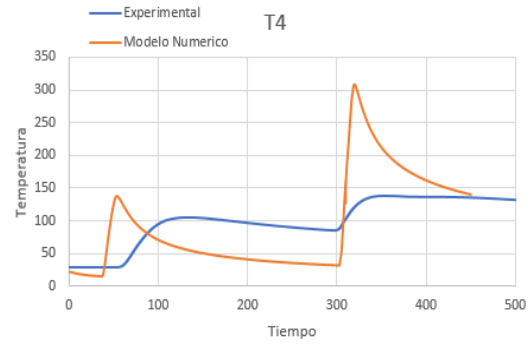


$E_{promedio} = 29\%$

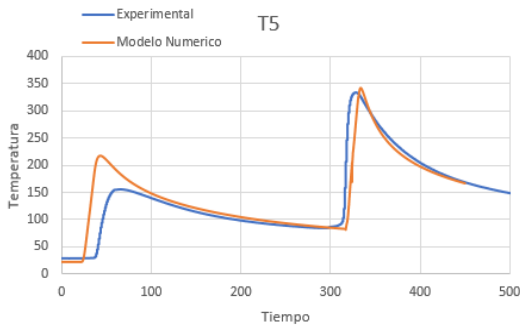
ANÁLISIS DE LA DISTORSIÓN DE UN ELEMENTO ESTRUCTURAL SOLDADO MEDIANTE EL PROCESO GMAW
 INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PACHUCA



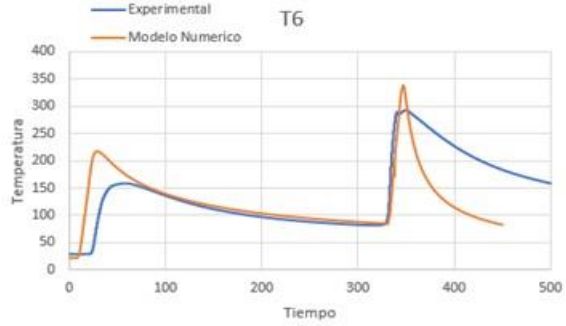
$E_{promedio} = 45\%$



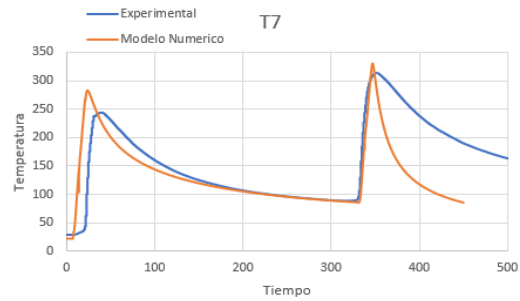
$E_{promedio} = 30\%$



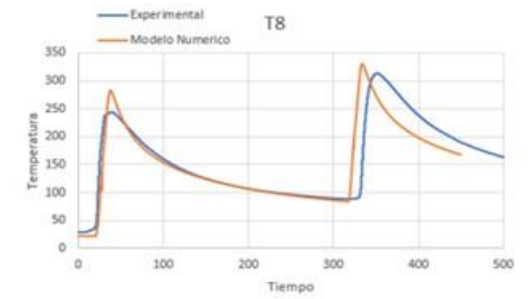
$E_{promedio} = 12\%$



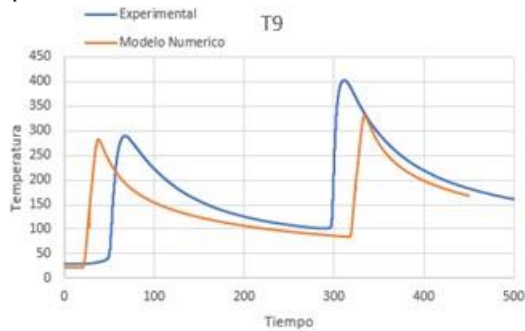
$E_{promedio} = 8\%$



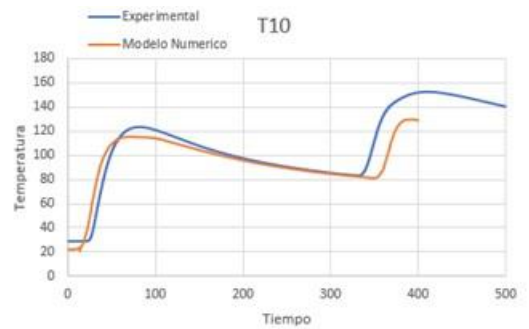
$E_{promedio} = 10.5\%$



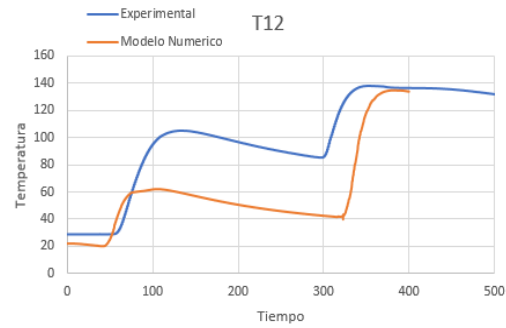
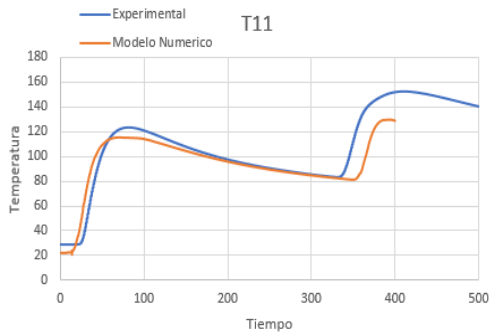
$E_{promedio} = 8.9\%$



$E_{promedio} = 35\%$

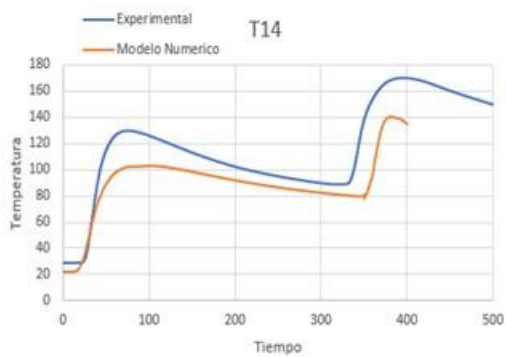
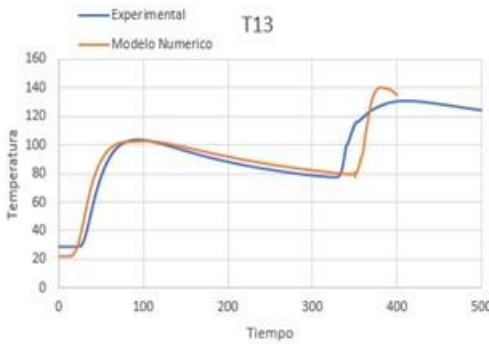


$E_{promedio} = 15\%$



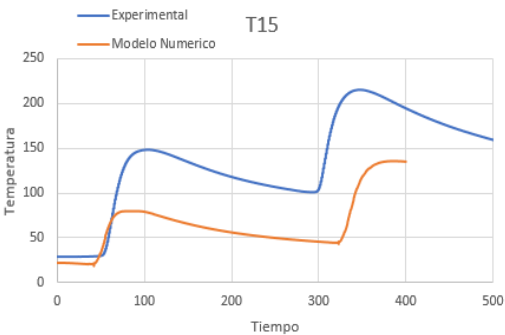
$E_{promedio} = 9\%$

$E_{promedio} = 60\%$



$E_{promedio} = 7\%$

$promedio = 15\%$

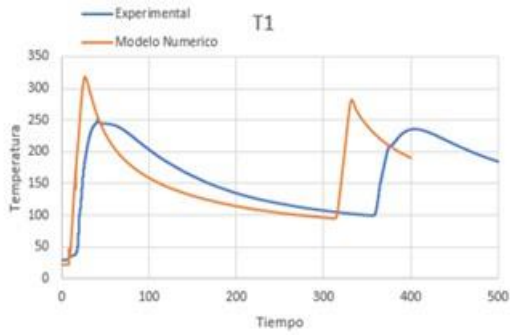


$E_{promedio} = 25\%$

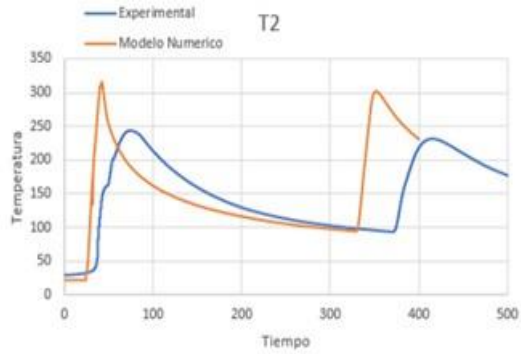
Por lo tanto obteniendo el error relativo promedio cada una de las gráficas analizadas de su distribución de temperatura, se obtuvo el error promedio de lo experimental y numérico dando un promedio de 18.6% del elemento estructural D3S2AR que se aplicó la segunda secuencia

Se presenta las comparaciones de las distribuciones de temperatura tanto experimental y numérico de las dos secuencias realizadas al modelo estructural angular D3S1AA como se muestra en la Figura 56.

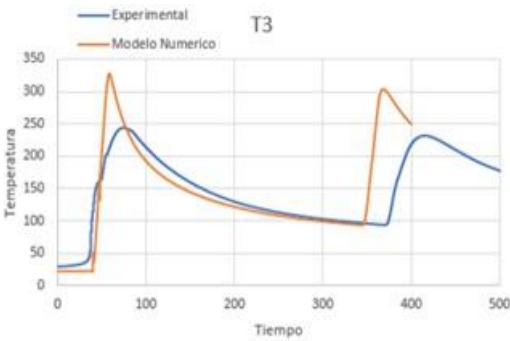
Figura 56.-Comparación de Temperaturas Experimental y Numérico del Elemento D3S1AA de la página 72-74.



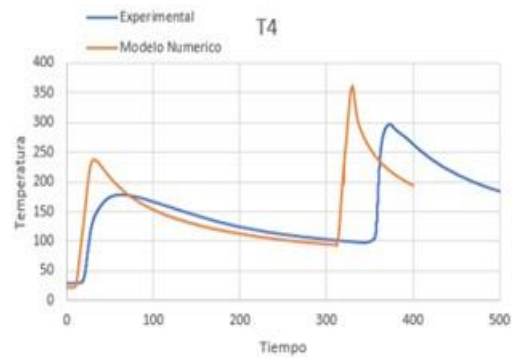
$E_{promedio} = 19\%$



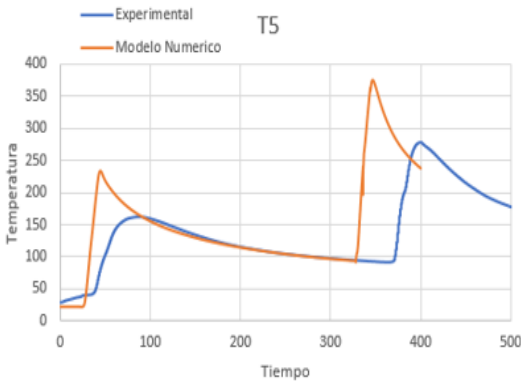
$E_{promedio} = 16\%$



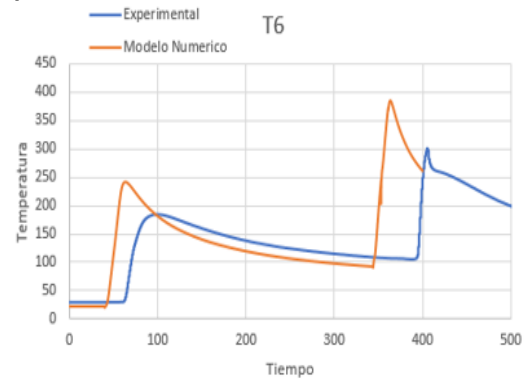
$E_{promedio} = 13\%$



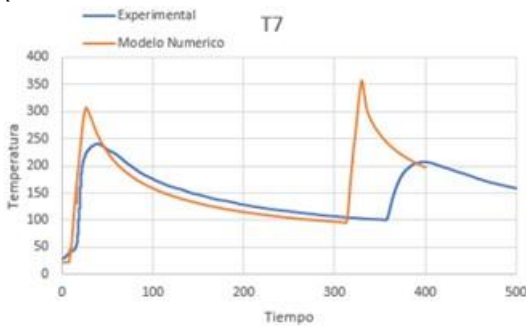
$E_{promedio} = 11\%$



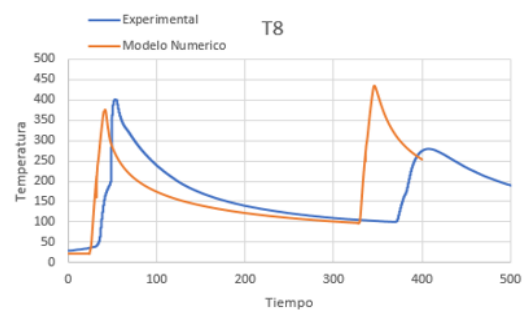
$E_{promedio} = 9\%$



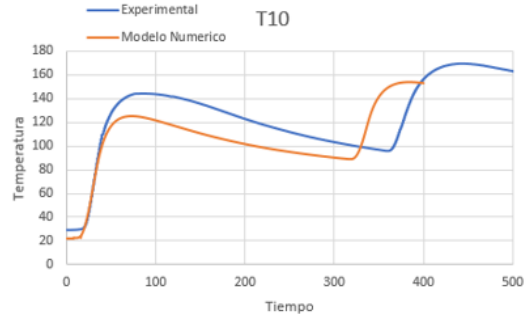
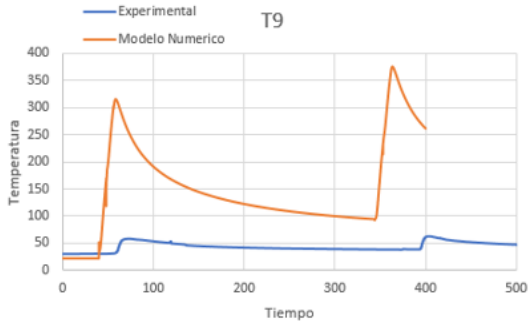
$E_{promedio} = 12\%$



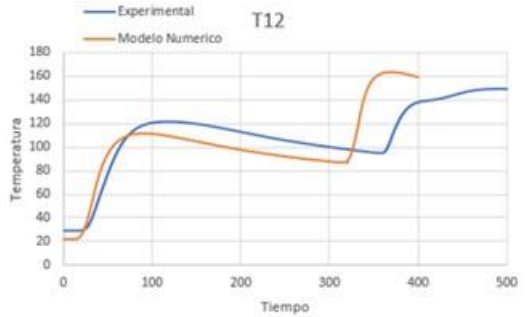
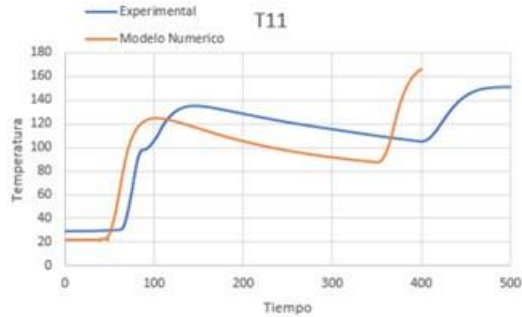
$E_{promedio} = 8.5\%$



$E_{promedio} = 15.6\%$

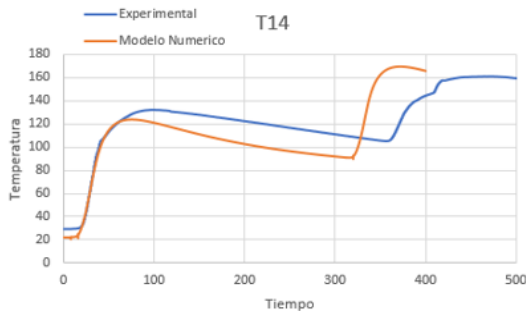
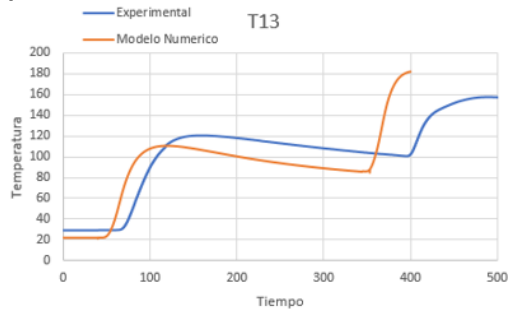


$E_{promedio} = 8.6\%$



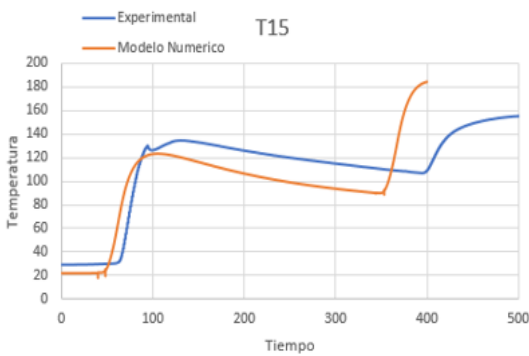
$E_{promedio} = 13.7\%$

$E_{promedio} = 12.3\%$



$E_{promedio} = 11.6\%$

$E_{promedio} = 10.2\%$

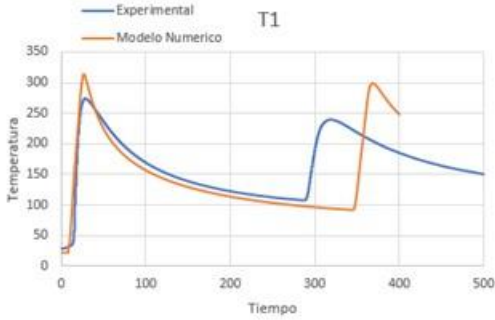


$E_{promedio} = 14.7\%$

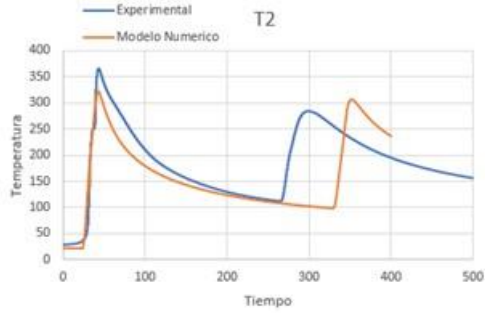
Obteniendo el error relativo promedio cada una de las gráficas analizadas de su distribución de temperatura, se obtuvo el error promedio de lo experimental y numérico dando un promedio de 30.6% del elemento estructural D3S1AA que se aplicó la primera secuencia sin embargo una no se tomó su error siendo la T9 por una mala toma de datos.

En la última Figura 57 se muestra la comparación de la distribución de temperatura de la segunda secuencia del elemento estructural angular de D3S2AA

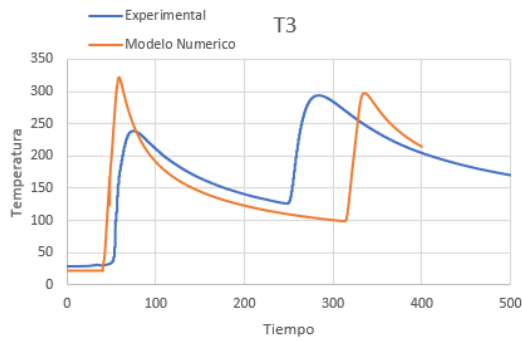
Figura 57.-Comparación de Temperaturas Experimental y Numérico del Elemento D3S2AA de la página 75-76



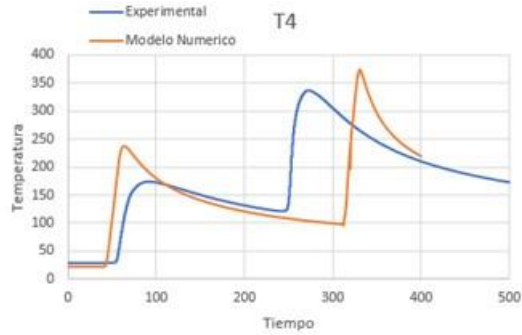
$E_{promedio} = 9.7\%$



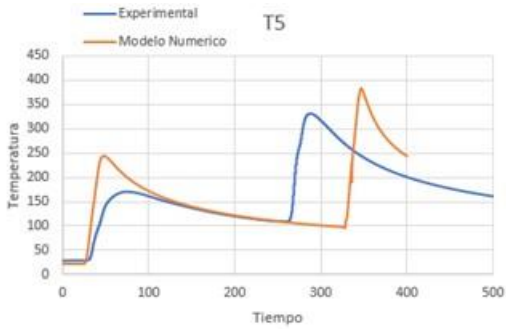
$E_{promedio} = 11.6\%$



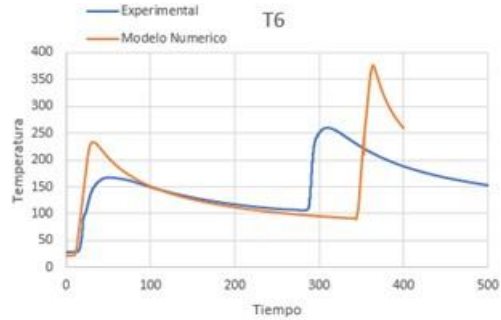
$E_{promedio} = 16.2\%$



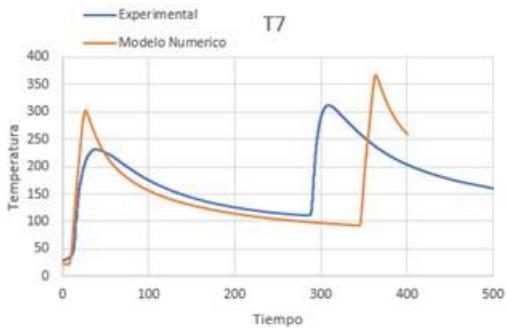
$E_{promedio} = 21.7\%$



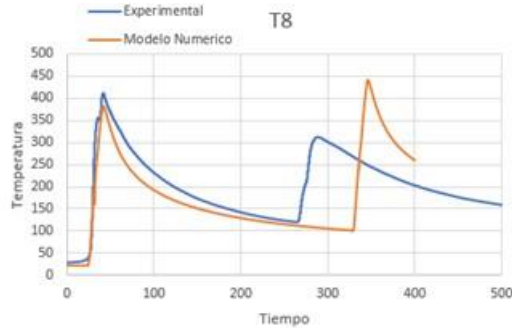
$E_{promedio} = 16.5\%$



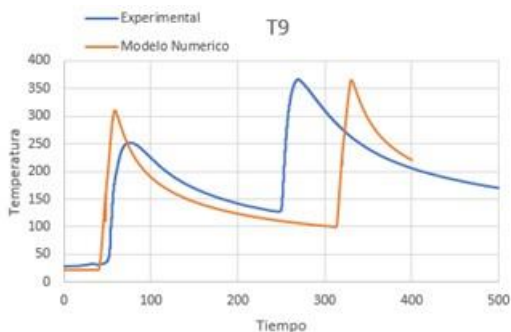
$E_{promedio} = 9.8\%$



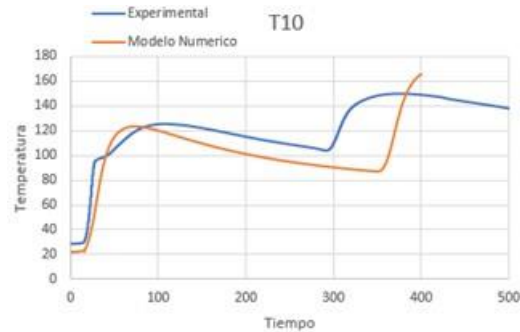
$E_{promedio} = 8.9\%$



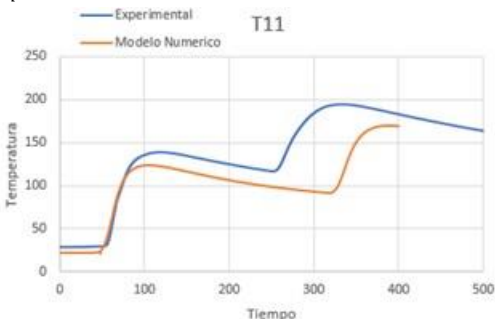
$E_{promedio} = 7.6\%$



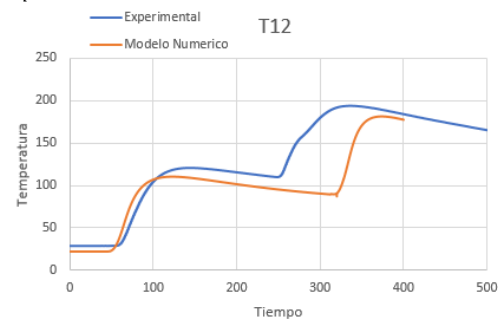
$E_{promedio} = 19.2\%$



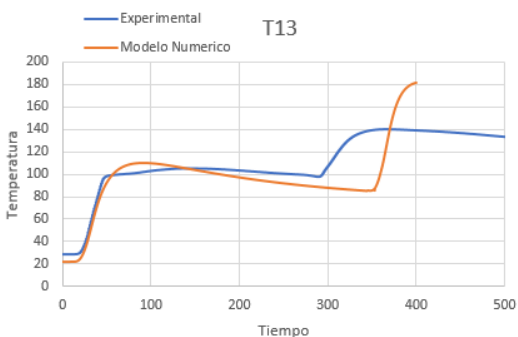
$E_{promedio} = 8.2\%$



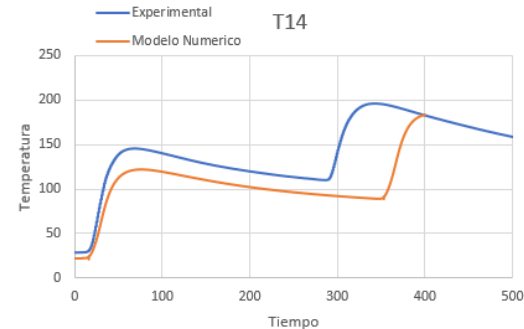
$E_{promedio} = 11.4\%$



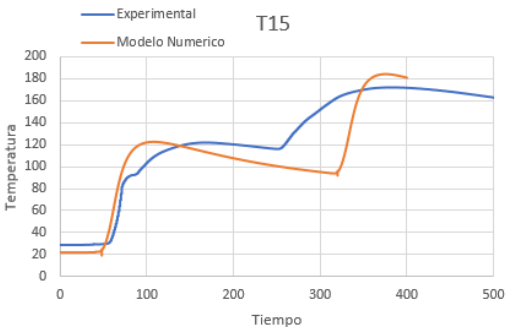
$E_{promedio} = 10.8\%$



$E_{promedio} = 6.3\%$



$E_{promedio} = 12.6\%$



$E_{promedio} = 10.1\%$

Por último, se obtuvo el error relativo promedio cada una de las gráficas analizadas de su distribución de temperatura del elemento estructural D3S1AA, se obtuvo el error promedio

de lo experimental y numérico dando un promedio de 8% que se aplicó en la segunda secuencia.

Determinado que las distribuciones de temperatura obtienen diferente comportamiento al aplicarla las secuencias distintas ya que a su vez podemos determinar que donde tiene una mejor distribución de temperatura es la segunda secuencia la cual es intermitente.

6

ANÁLISIS DE LA DISTORSIÓN EN BASE A LOS CICLOS TÉRMICOS

Anteriormente se hicieron la medición de las distorsiones en las placas soldadas en junta de filete determinando cuales tuvieron una mayor distorsión, sin embargo, se realizó un análisis más detallado en el cual solamente se analizaron 4 de las placas que se pudieron obtener sus ciclos térmicos para dicha comparación y llegar a un punto más analítico en base a los resultados obtenidos.

La primera placa recta con el código D3S1AR cuyo secuencia fue la primera que se le aplico, se obtuvo una distorsión de 92 mm como se muestra en la Figura 54 con las mediciones que se obtuvieron y haciendo un análisis más detallado con la distribución de temperatura, la velocidad de calentamiento y además de su velocidad de enfriamiento donde se tomaron los datos por los termopares, podemos ver su comportamiento de la distorsión en base a los datos obtenidos numéricamente donde estaban colocados los termopares en donde se generó la distorsión.

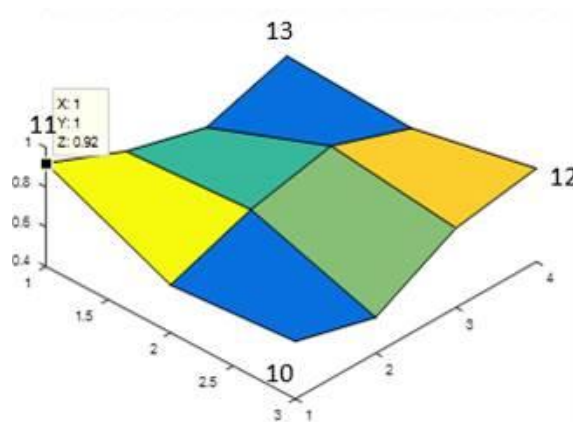


Figura 58.-Distorsión Obtenida de la Placa Recta en Junta en T con el código D3S1AR

Como se puede apreciar en la Figura 55 podemos observar que la distribución de temperatura en ambos lados podemos ver sus comportamientos casi similares en los aumentos de temperatura de los termopares en base a la secuencia aplicada por soldadura con el proceso GMAW.

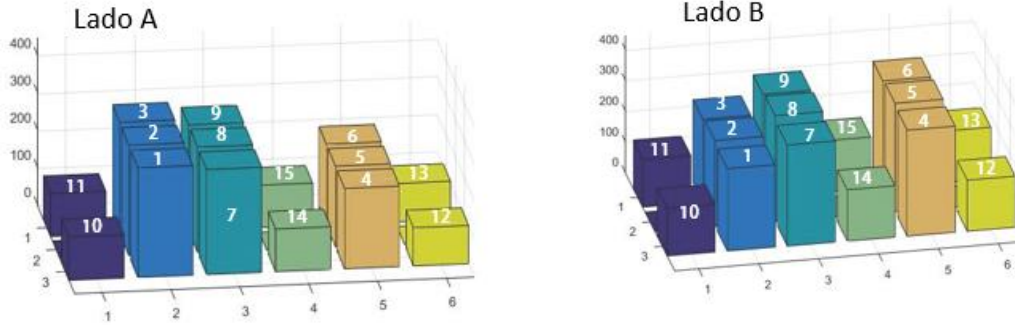


Figura 59.-Distribución de Temperatura de la Placa Recta en Junta en T con el código D3S1AR

En la siguiente Figura 56 se presenta la velocidad de calentamiento, en cual podemos ver cómo es su comportamiento en base su distribución de temperatura en los termopares T3 y T11 se presenta una mayor velocidad de calentamiento como al igual su velocidad de enfriamiento de la misma placa recta analizada como se muestra en la Figura 57 lo cual con estos datos obtenidos podemos determinar que la distorsión generada es producida por estos resultados obtenidos por una mayor concentración de tanto su calentamiento como su enfriamiento generando una dilatación en el material al igual la contracción de este mismo.

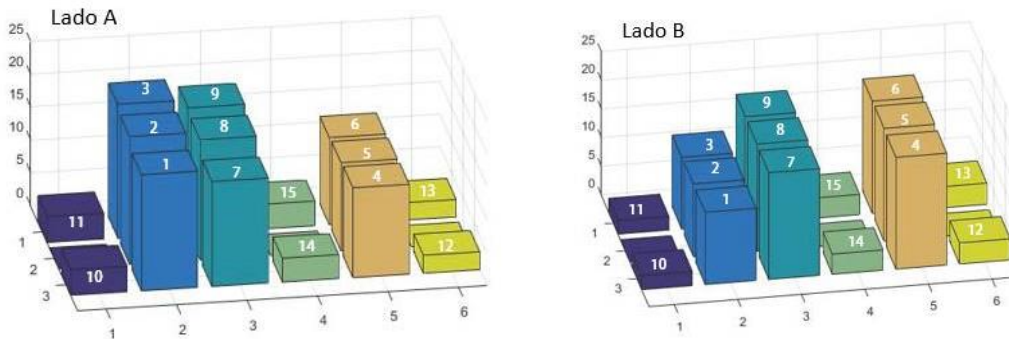


Figura 60.-Velocidad de Calentamiento de la Placa Recta en Junta en T con el código D3S1AR

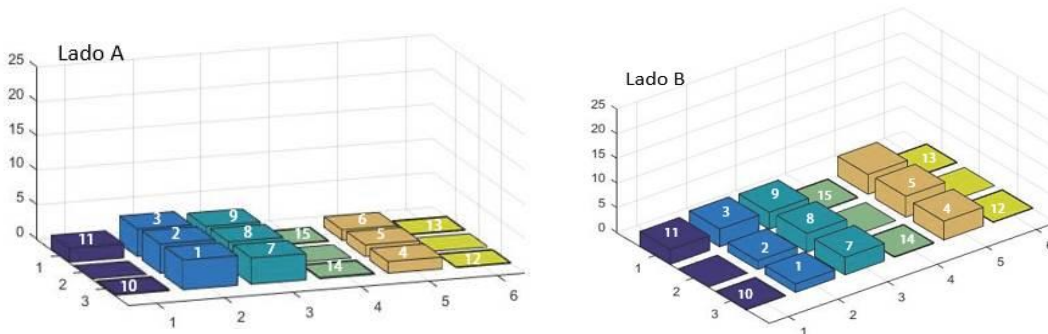


Figura 61.-Velocidad de Enfriamiento de la Placa Recta en Junta en T con el código D3S1AR

Por lo consiguiente también se puede obtener el gradiente espacial de los puntos de los termopares en donde se generó la distorsión en el elemento recto en junta en T como se ven la gráfica se hizo las restas entre el T3 -T11 que se encuentran en el metal base como se muestra en la Figura 32 para poder observar cual es el comportamiento de las temperaturas entre la distancia de los termopares que hay podemos observar que su comportamiento una mínimo diferencia entre estos valores, como en la T3-T9 se puede observar el cambio significativo ya que el termopar T3 se encuentra en la base de la placa como el T9 este está situado en el alma ya que se puede ver el cambio entre ambas temperaturas que significa que la temperatura T3 es mucho menor que T9 es más dado que nos da un cambio significativo de la temperatura entre las distancias de los termopares debido a la secuencia aplicada como se muestra en la Figura 58.

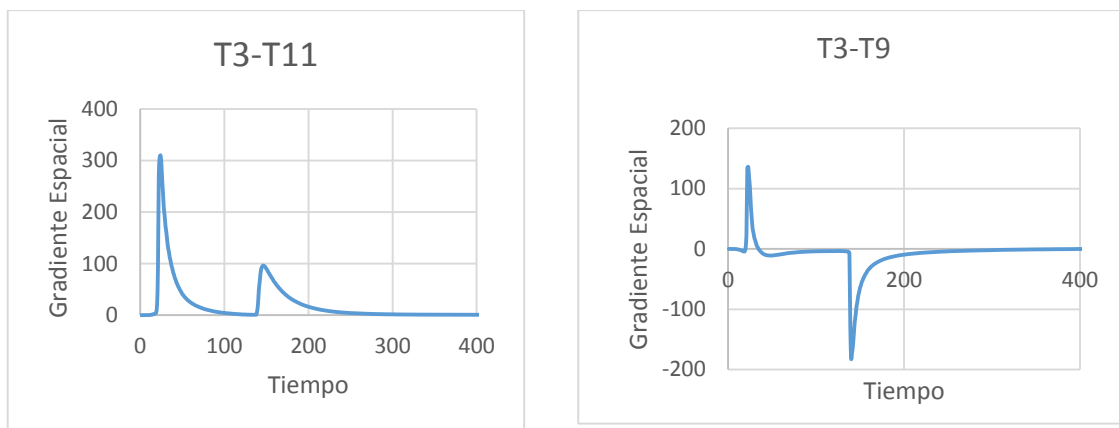


Figura 62.-Gradiente Espacial de las distancias de los Termopares de T3-T11, T3-T9

La segunda placa recta con el código D3S2AR cuya secuencia fue la segunda que se le aplico tuvo una distorsión de 76 mm como se muestra en la Figura 58. Por lo consiguiente se realizó la misma comparación de la distribución de temperatura, velocidad de calentamiento como se muestran en las Figuras 59 y 60 al igual que su velocidad de enfriamiento en la Figura 61, obteniendo su distorsión en base a los datos obtenidos pero también nos podemos dar cuenta que nos genera una menor distorsión aplicando la segunda secuencia de una diferencia de 16mm, es decir que la mejor secuencia que nos produce una menor distorsión es la intermitente por una distribución de temperatura sobre la placa recta, el cual coinciden los puntos de los termopares donde nos genera esa distorsión determinando que tanto puede afectar las secuencias en base al elemento soldado en junta en T y en que nos pueda generar poca o demasiada distorsión en la placa tanto su dilatación en el material como la contracción en base a la velocidad de enfriamiento puede que esto nos genere la distorsión en esos puntos con respecto a la velocidad de calentamiento.

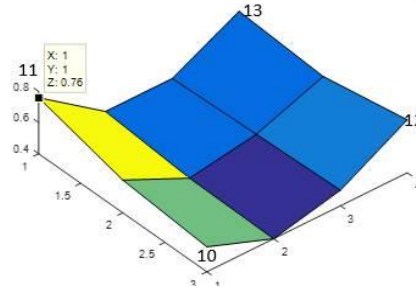


Figura 63.-Distorsión Obtenida de la Placa Recta en Junta en T con el código D3S2AR

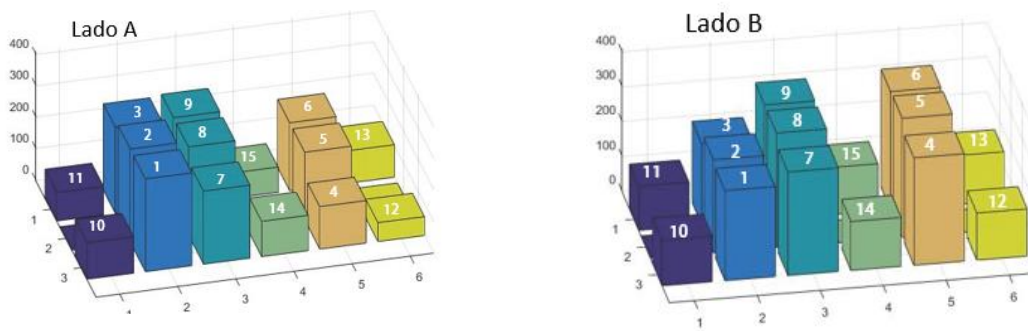


Figura 64.-Distribución de Temperatura de la Placa Recta en Junta en T con el código D3S2AR

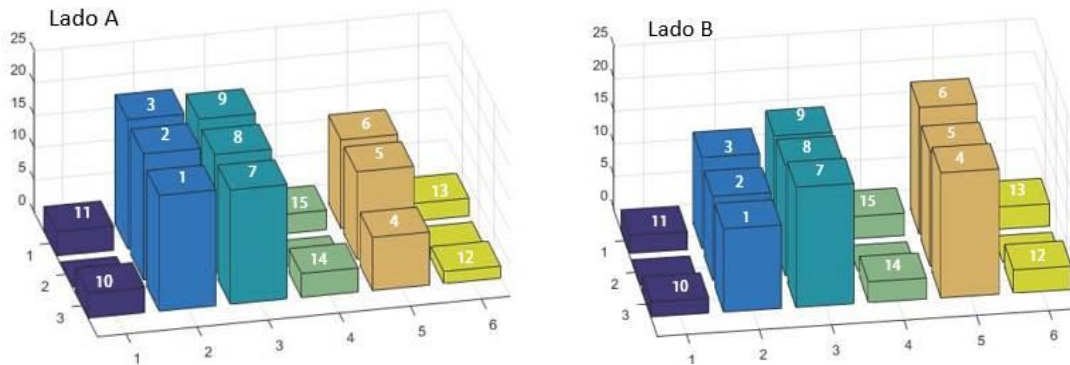


Figura 65.- Velocidad de Calentamiento de la Placa Recta en Junta en T con el código D3S2AR

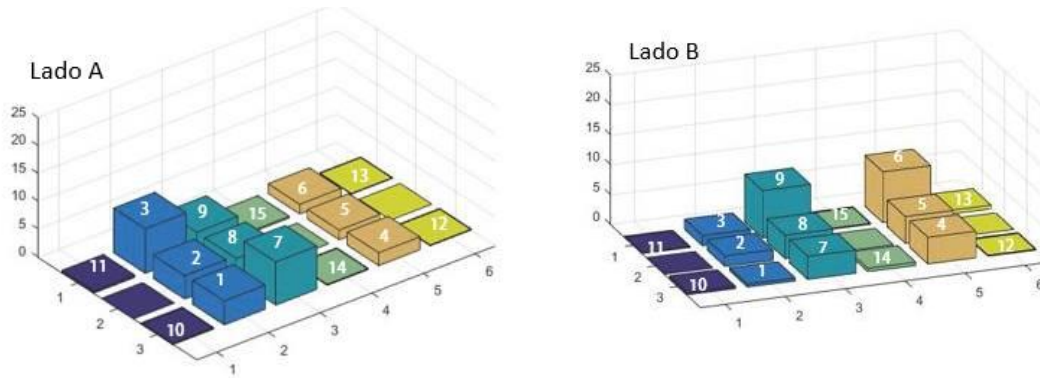


Figura 66.-Velocidad de Enfriamiento de la Placa Recta en Junta en T con el código D3S2AR

De igual manera se pudieron obtener sus valores de gradientes espaciales en base a los puntos de los termopares como se explicó anterior mente en la primera secuencia también se realizó la resta de los puntos T3-T11 los cambios en estas fueron case el mismo comportamiento entre estos puntos de los termopares analizados y de igual forma en T3-T9 mostraron el mismo comportamiento siendo que el influye con mayor temperatura en el T9 que el T3 como se muestran en la Figura 63.

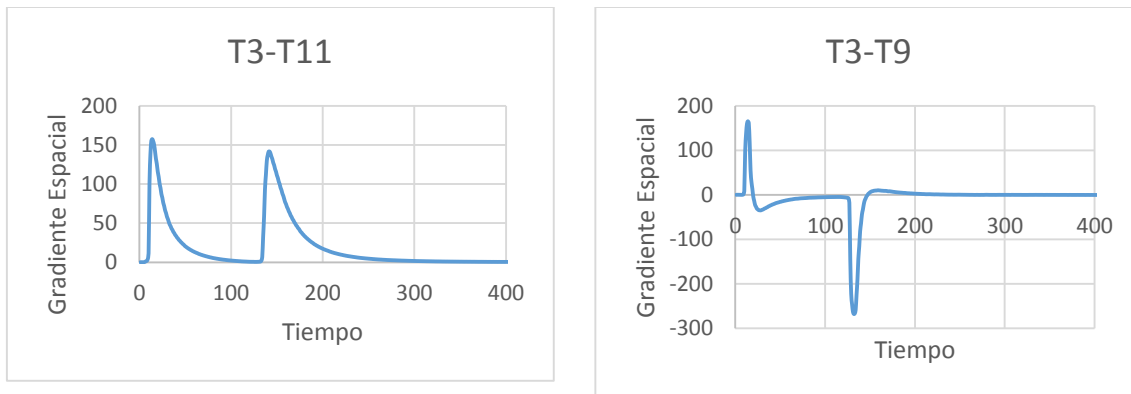


Figura 67.-Gradiente Espacial de las distancias de los Termopares de T3-T11, T3-T9

Con este análisis podemos determinar que secuencia nos generó una menor distorsión en base a lo que analizamos y poder garantizar que secuencia ocupar para soldar este tipo de placas rectas en junta en T con las variables obtenidas en base a la experimentación ya que en donde se formó la distorsión fueron generados por el efecto de dilatación del material sobre la aplicación del cordón al mismo instante generando una contracción del material por las velocidades tanto de calentamiento como la de enfriamiento originando su deformación de la placa en eso puntos donde se encontraban los termopares podemos dar como concluido que la mejor secuencia en este tipo de juntas en T rectas son las intermitentes ya que su distribución de temperatura es mucho más congruente que en la otra secuencia utilizada.

El siguiente análisis fue de las placas angulares ocupando las mismas secuencias, en este tipo de placas angulares en junta en T, el proceso de soldadura fue algo diferente ya que en estas se tuvo que hacer un empalme de la soldadura sobre el cordón por que se encontraban las placas libres el cual su geometría y su distribución de temperatura fue muy diferente en ambas.

La primera placa angular con el código D3S1AA ocupando la primera secuencia tuvo una distorsión de 69 mm como se muestra en la Figura 64 realizando las comparación de las distribuciones de temperatura y velocidades de calentamiento en las figuras 65 y 66 podemos observar que la mayor temperatura concentrada es en el dobles ya que ahí se realizó el empalme sobre el cordón ya que se tuvo que voltear la placa del lado que queda libre para poder realizar la soldadura realizando el empalme de la soldadura y haciendo comparación con los demás datos obtenidos como la velocidad de enfriamiento como se muestra en la Figura 67 en base a las mediciones de los termopares que se colocaron en las placas.

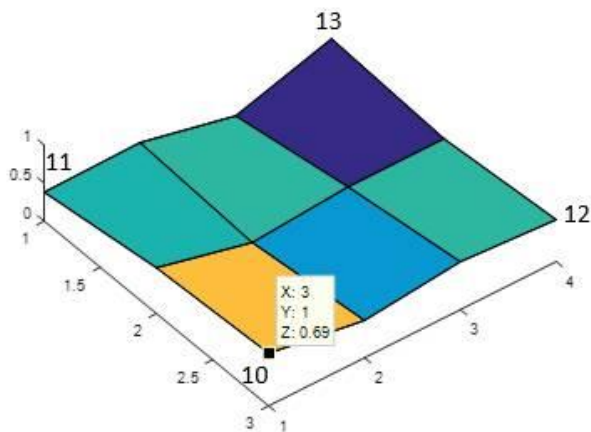


Figura 68.-Distorsión Obtenida de la Placa Recta en Junta en T con el código D3S1AA

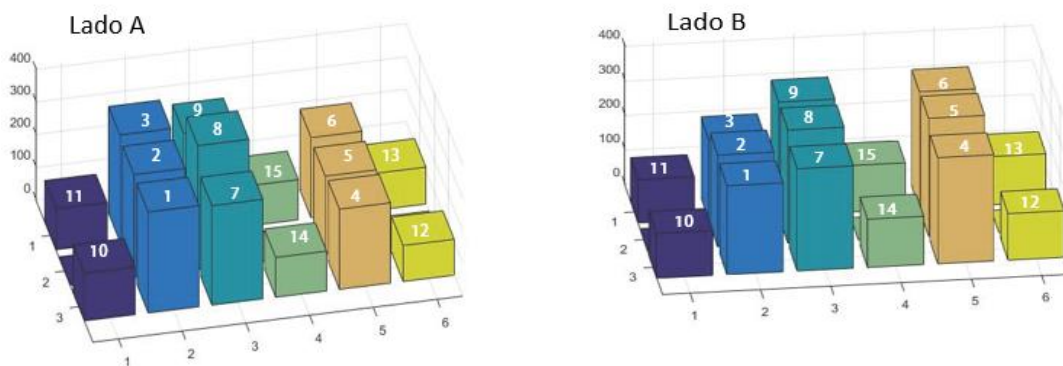


Figura 69.-Distribución de Temperatura de la Placa Angular en Junta en T con el código D3S1AA

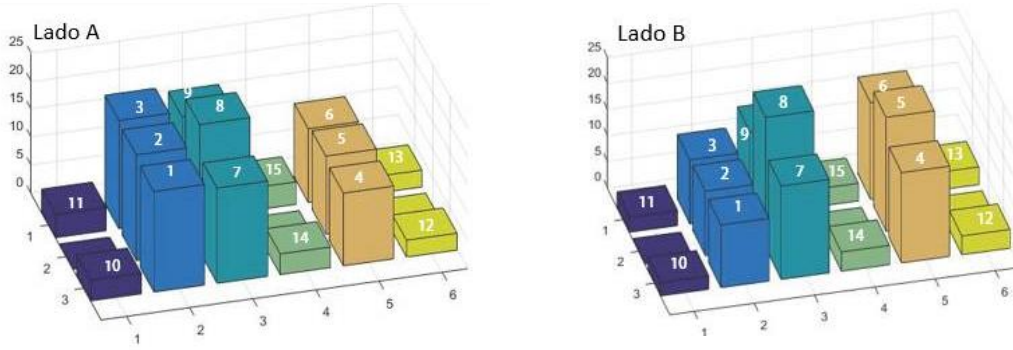


Figura 70.-Velocidad de Calentamiento de la Placa Angular en Junta en T con el código D3S1AA

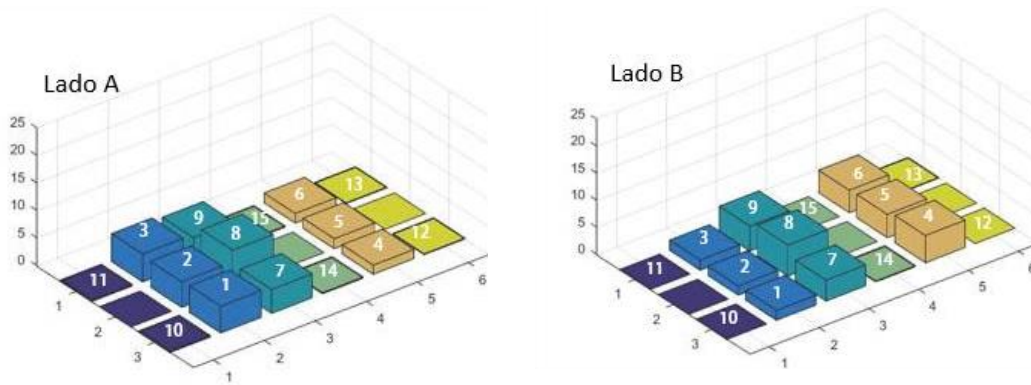


Figura 71.-Velocidad de Enfriamiento de la Placa Angular en Junta en T con el código D3S1AA

Ahora los gradientes espaciales como se venían manejando en las siguientes secuencias de las placas rectas también se realizó en las mismas de los termopares como se puede observar en la T1-T10 podemos ver que la mayor temperatura es T1-T10 ya que hay mucha diferencia de temperaturas en el caso de los termopares de las T1-T7 hay una mínima diferencia de ambas temperaturas ya que es casi el mismo comportamiento de su gradiente espacial para ver su comportamiento en base a la distancia de los termopares como se muestran en la Figura 68.

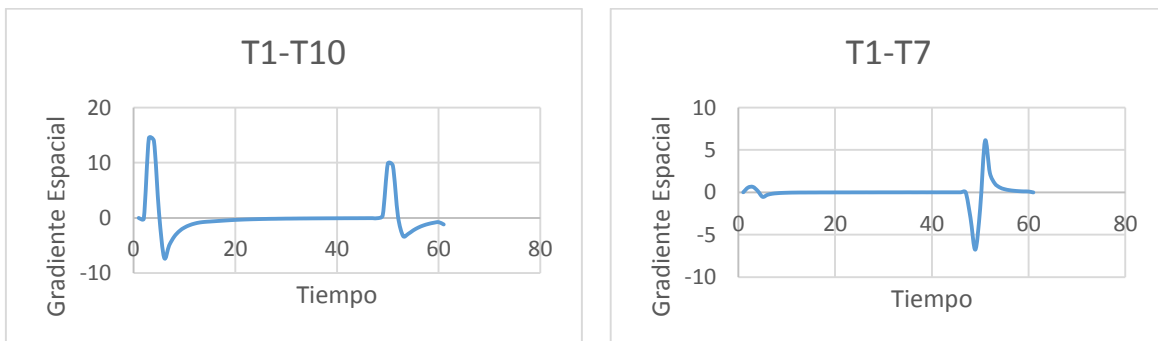


Figura 72.-Gradiente Espacial de las distancias de los Termopares de T3-T11, T3-T9

La segunda placa recta con el código D3S2AA aplicando la segunda secuencia tuvo una distorsión de 72 mm como se muestra en la Figura 69 es esta secuencia su distribución de temperatura fue diferente a la primera ya que tuvo una mayor distribución de temperatura al igual que su velocidad de calentamiento como se muestran en las figuras 70 y 71 estos datos obtenidos por los termopares ya que podemos ver donde se puede encontrar los puntos máximos de temperatura y obteniendo su velocidad de enfriamiento en la Figura 72 podemos encontrar en que punto de los termopares sufren su distorsión ya que hay una cierta coherencia donde se observa su distorsión de la placa.

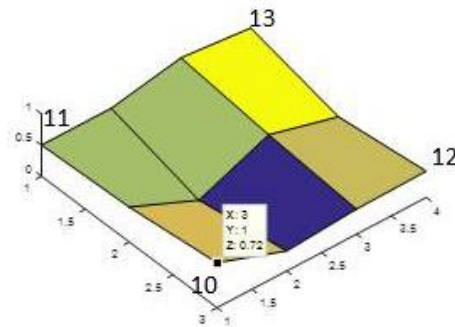


Figura 73.-Distorsión Obtenida de la Placa Recta en Junta en T con el código D3S2AA

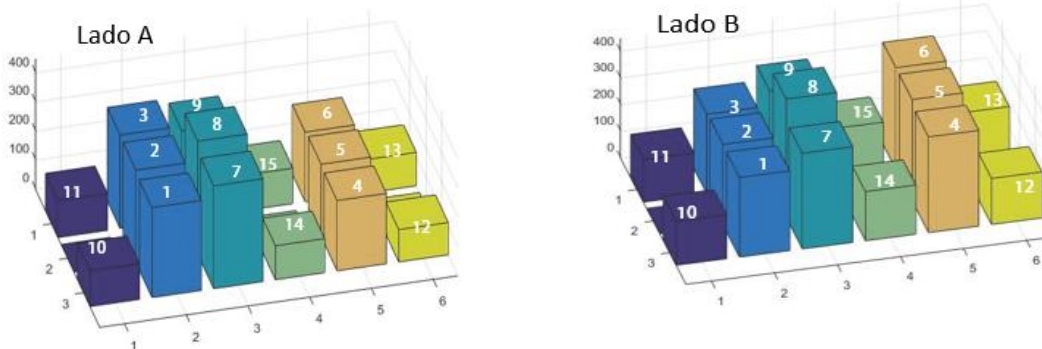


Figura 74.-Distribución de Temperatura de la Placa Recta en Junta en T con el código D3S2AA

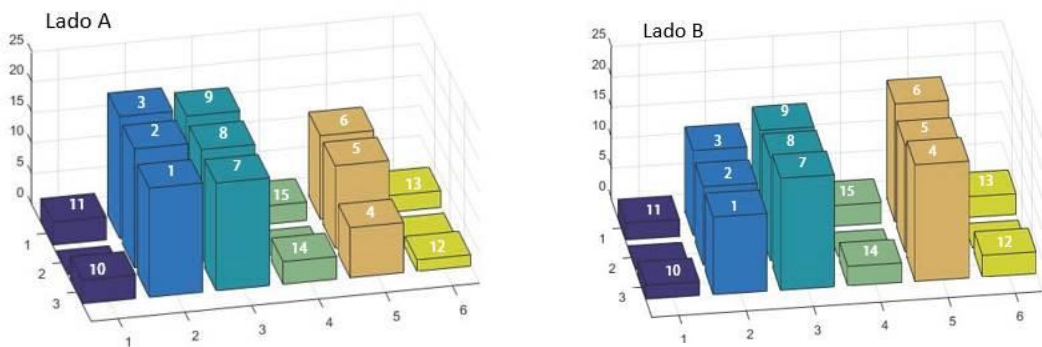


Figura 75.-Velocidad de Calentamiento de la Placa Angular en Junta en T con el código D3S2AA

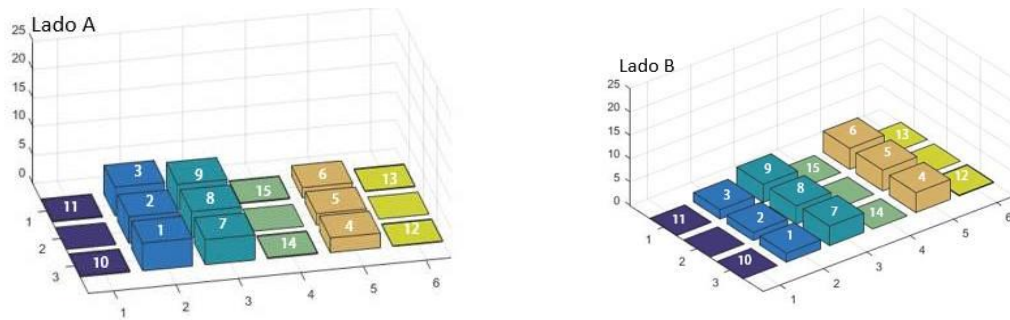


Figura 76.-Velocidad de Enfriamiento de la Placa Angular en Junta en T con el código D3S2AA

Como podemos observar que su comportamiento una mínimo diferencia pero ahora cambian entre las diferencias de los termopares en base a su temperatura T1-T10 entre estos valores podemos decir que T1 y T10 hay una mínima diferencia de temperaturas por su distancia en la base de la placa angular, como en la T1-T7 se puede observar el cambio significativo ya que el termopar T1 se encuentra en la base de la placa como el T7 este está situado en el alma ya que se puede ver el cambio radical entre ambas temperaturas que significa que la temperatura T1 es mucho mayor que T7 dado que nos da un cambio significativo de la temperatura entre las distancias de los termopares como se muestra en la Figura 73

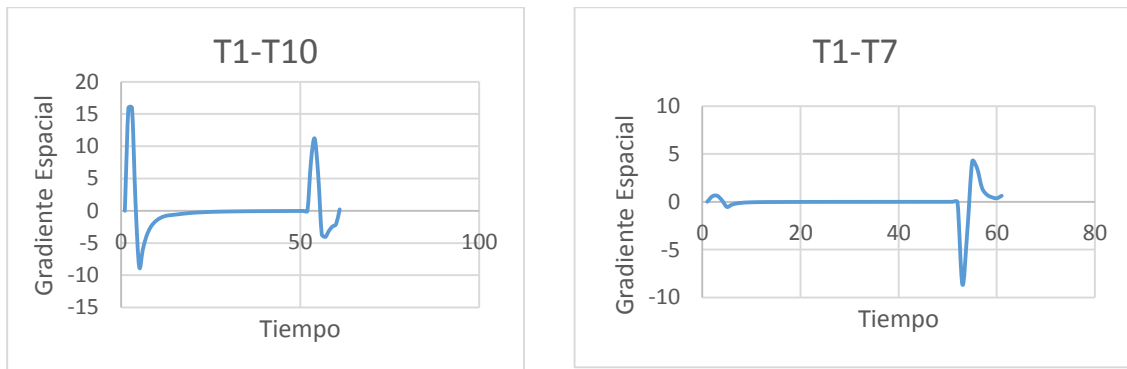


Figura 77.-Gradiente Espacial de las distancias de los Termopares de T3-T11, T3-T9

Obteniendo las mediciones de las placas angulares y comparando las distorsiones podemos determinar que no hubo tanta diferencia de su distorsión ya que puede influenciar su geometría en ellas mismas y por el ángulo de dobles en las placas en T pero también tiene que podría determinar el empalme aplicado en las placas ya que no contaron con sujeción en las placas determinando que en estas secuencias no se generaron una distorsión mayor si no un rango de diferencia mínimo pudiendo determinar que en este elemento en junta en t angular no sufre mucha dilatación por el tipo de geometría al igual que puede influenciar la distancia del ángulo que se le dio es decir que se le podría aplicar alguna de estas dos

secuencias obviamente aplicando las variables que se le dieron y generando la menor distorsión entre estos elementos.

7

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

1. Con los resultados obtenidos experimentalmente, se consiguió determinar que los elementos estructurales en junta de filete rectos como angulares, tienen un cambio significativo tanto en sus distorsiones como en sus distribuciones de temperatura con el proceso de soldadura GMAW.
2. Se obtuvo los parámetros correspondientes para poder realizar las pruebas experimentales y poder así saber cuál es el comportamiento de su distorsión y a la vez su distribución de temperatura de los elementos estructurales en junta de filete analizados.
3. Se pudo observar que los elementos estructurales rectos nos generaron una mayor distorsión, gracias a las mediciones obtenidas de los elementos rectos antes y después soldadas.
4. Los elementos estructurales angulares generaron una menor distorsión que los elementos rectos y corroborar su comportamiento de ambos por el proceso de soldadura GMAW.
5. Se realizó las comparaciones de las distribuciones de temperatura experimentalmente como numérica y como resultado se llegó a la validación del modelo numérico, ya que en algunos puntos medidos experimentalmente por los termopares no se pudo obtener porque sufrieron desprendimientos por el calor generado de la soldadura.
6. Se realizaron las comparaciones en base a las elementos en junta en T el cual se analizó sus distorsiones donde fueron colocados los termopares y con esto su distribución de temperatura de estos cuatro elementos estructurales en junta en T, también se pudo obtener la velocidad de calentamiento de cada punto donde fueron colocados los termopares como resultado de este análisis podemos determinar que la primera secuencia tiene un mayor calentamiento y con esto nos genera una mayor distorsión en los elementos soldados con esta secuencia.
7. Como resultado podemos decir que la mejor secuencia que se genera menor distorsión es la intermitente en base a las mediciones obtenidas.

CONCLUSIONES

Como conclusión se corrobora que los elementos estructurales en junta de filete se obtuvieron los parámetros en base a la experimentación para poder ser aplicados a los modelos analizados y así lograr una buena penetración de soldadura de 5 milímetros en el material base de dichas pruebas con el proceso de soldadura GMAW y con esto poder obtener las distribuciones de temperatura de los elementos analizados y hacer comparaciones experimental y numérico en base a su estudio.

Se obtuvieron las comparaciones de las pruebas experimentales sobre su distorsión y se realizó las mediciones el antes y después de ser soldadas, en base a este análisis se observó que secuencia genera una menor distorsión sobre elementos estructurales en junta en T.

Los resultados obtenidos de las distribuciones de temperatura por las pruebas experimentales en comparación con la simulación realizada en “ANSYS” fueron obtenidas lo más cercano posible en donde se le aplico los datos obtenidos experimentalmente.

Se obtuvo el error promedio de los elementos estructurales en junta en T, en rectos de un 7.7% de la primera y segunda secuencia de 18.6% por lo tanto angulares de un 30.6% de la primer y segunda de 8% en donde se puede saber cómo sus comportamientos son diferentes en cada uno de los modelos analizados.

De acuerdo con los puntos analizados de sus distribuciones de temperatura se obtuvo la velocidad de enfriamiento y la velocidad de calentamiento, con estos resultados se pudo concluir que puntos se genera las distorsiones en base a la investigación realizada hecho que registraron un mayor calentamiento y un menor enfriamiento de cada elemento analizado.

Se determinó que la segunda secuencia es la que genera una menor distorsión que la que la primera y se determinó sus comportamientos de las distribuciones de temperatura en base a esta investigación.

REFERENCIAS


- [1] I. Hernández Arriaga, J. Pérez Meneses y E. Aguilera Gómez , «Determinacion de esfuerzos residuales de una estructura tipo I Producidos por la soldadura,» de *SOMIM*, Veracruz, México, 2013.
- [2] N. Mandal, *Welding Techniques Distortion Control and line Heating*, kharapur, India: ALPHA SCIENCE INTERNATIONAL , 2009.
- [3] A. Mondragon Canseco y I. Aguirre, «Tensiones y Defromaciones por Soldadura,» *Soldadura Latinoamericana*, vol. 11, nº 1, pp. 1-11, 2008.
- [4] Lincoln, *Soldadura Semiautomatica con gas de protección (MIG-MAG)*, E.U.A.: Lincoln-KD, S.A, 2008.
- [5] . C. P. , . I. C. , T. A. , S. W. S. , N. T. y S. W. , «Welding process impact on residual stress and,» *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 14, nº 8, pp. 717-725, 2013.
- [6] J. H. R. A. H. D.A.Fink, *Manual de Soldadura*, E.U.A: PRETENCI-HALL, 2005, p. 110.
- [7] M. Euebio, M. Estrems y M. Valentin, «Estado del arte de la modelización numérica de los procesos de soldadura por arco eléctrico empleados,» de *CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA DE PROYECTOS*, Badajoz, España, 2009.
- [8] B. Ayjwat A., M. Hidekazu , B. Imad y B. Zuheir , «Influence of thermo-mechanical material properties of different steel,» *Materials and Design*, nº 65, pp. 878-889, 2015.
- [9] ., E. E. Nieves Nuñez, «Concurrencia de las tecnologías de soldadura en las construcciones,» *Prospect*, vol. 9, nº 1, pp. 38-45, 2011.
- [10] D. Deng, «FEM prediction of welding residual stress and distortion in carbon steel considering phase transformation effects,» *Materials and Design*, vol. 30, nº 1, p. 359–366, 2009.
- [11] N. Syahroni, «3D Finite Element Simulation of T-Joint Fillet Weld: Effect of Various Welding Sequences on the Residual Stresses and Distortions,» *INTECH*, pp. 584-604, 2012.
- [12] Z. B. Ayjwat A. Bhatti, «Influence of thermo-mechanical material properties of different steel grades on welding residual stresses and angular distortion,» *Materials and Design*, nº 65, p. 878–889, October 2014.
- [13] D. Deán , M. Hidekazu y L. Wei , «Prediction of welding distortion in a curved plate structure,» *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 305, nº 1, p. 252–266, 2007.
- [14] S. H. G. y V. L.A., *Introducion a la Metalurgia de la Soldadura*, 2004.

- [15] C. Cházaro y O. Alvarez Valadez, «El Acero hoy,» Gerdau Corsa, México, 2012.
- [16] M. Wahab, *Manual Metal Arc Welding and Gas Metal Arc Welding*, Baton Reuge: Elsevier Ltd, 2014, pp. 49-76.
- [17] M. Villavicencio Cevallos Julio César. Relación, «Relación, Microestructura/ Propiedad en la Soldadura GMAW en aceros inoxidable y al carbono,» *Rev. LatinAm. Metal. Ma*, vol. 34, n° 2, pp. 306-315, 2010.
- [18] I. Hernandez Arriaga, *Welding Secuence Analisys*, Polonia: University of Science and TechnologyAgency, 2009.
- [19] D. C. T. G. Pierluigi Mollicone, «Procedural influences on non-linear distortions in welded thin-plate fabrication,» *Thin-Walled Structures*, vol. 46, n° 7, pp. 1021-1034, 2008.
- [20] M. Hidekazu, S. Hisashi y J. Zhang, «Numerical and experimental investigations on welding deformation.,» *Transactions of JWRI*, vol. 37, n° 1, pp. 79-90, 2008.
- [21] H. J., «Influencia del Molibdeno Sobre la Microestructura y Propiedades Mecánicas del Hierro Nodular.,» Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, 1999, pp. 71-75.
- [22] S. Nur y P. H. Mas Irfan, «3D Finite Element Simulation of T-Joint Fillet Weld: Effect of Various Welding Sequences on the Residual Stresses and Distortions,» de *Numerical Simulation* , Indonesia, INTECH, 2012, pp. 592-594.
- [23] R. G. Budynas, *Diseño de Ingeniería Mecánica*, México: McGraw-Hill, 2008.
- [24] P. E. Tippens, *Fisica Conceptos e Aplicaciones*, México: Mc Graw Hill , 2001.
- [25] D. R. Askelan, *Ciencia e Ingenieria de los Materiales*, E.U.A: International Thompson Editores, 1998.
- [26] Fitzgerald, *Mecanica de Materiales*, México: Omega, 2007.
- [27] R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado y M. D. P. Baptista Lucio, *Metodologia de la Investigación*, Mexico: Mc Graw Hill, 2010.
- [28] U. A. d. Michocan, *Estructuras*, México, 2005.
- [29] H. I. Aaronson, J. K. . A. y E. F. B. , *Metals Handbook*, United States of America: American Society for Metals, 1985.
- [30] Thermal Arc Company, fabricator 131/138 MIG maquina de soldar, Ohio, 2003.
- [31] E. E. Niebles y W. G. Arnedo , «Procedimientos de Soldadura y Calificación de Soldadores: una Propuesta de Enseñanza y Guía de,» *Información Tecnológica* , vol. 20, n° 3, pp. 19-30, 2009.
- [32] E. E. Niebles Nuñez, J. Unfried y J. E. Torres, «Metodología para el Estudio de Soldabilidad en Uniones Soldadas,» *Información Tecnológica*, vol. 25, n° 1, pp. 3-14, 2014.

[33] F. d. Ingeniería, Tratamientos Termicos, UNLP, 2010.


ANEXO

A) Cartel Sobre El Análisis de la Distorsión de un Elemento Estructural Soldado



Análisis de la distorsión de un elemento estructural soldado mediante el proceso GMAW

J. Juan Dávalos B., Luis M. Palacios-Pineda
 Instituto Tecnológico de Pachuca
 Enrique E. Niebles N., Roque Hernández
 Universidad Autónoma del Caribe



INTRODUCCIÓN

METODOLOGÍA

RESULTADOS (CONT.)

INTRODUCCIÓN

En la industria metalmeccánica, en la fabricación de productos soldados uno de los problemas frecuentes es la distorsión de los productos por efecto de inadecuados procedimientos de soldadura, inapropiadas secuencias de soldadura o ausencia de las mismas y restricciones presentes durante la soldadura. La distorsión es producto de las deformaciones generadas en las piezas durante el proceso de soldadura, por efectos de la dilatación y contracción no uniforme del metal de soldadura y del metal base a lo largo del ciclo de calentamiento y enfriamiento [1, 2].

OBJETIVOS

Objetivo General

- Evaluar el comportamiento a la distorsión de un elemento estructural soldado en acero al carbono ASTM A-36, en junta de filete con proceso GMAW, mediante análisis experimental y numérico.

Objetivos Específicos

- Evaluar experimentalmente la distribución de temperatura y el comportamiento a la distorsión, en las direcciones transversal y longitudinal del elemento.
- Evaluar por análisis de elementos finitos la distribución de temperatura y el comportamiento a la distorsión en el elemento estructural soldado

METODOLOGÍA


El trabajo se tomo cuenta enfoques: cuantitativo, descriptivo y experimental de acuerdo al desarrollo de la investigación [11]. Se tiene por finalidad analizar la distorsión de un elemento estructural soldado en junta de filete con el proceso GMAW con los elementos finitos y ANSYS, en la fig. 1 se muestra el esquema metodológico y la fig. 2 los procesos de soldadura a realizar en GMAW.

PARAMETROS

- Voltaje de 25.4 A
- Velocidad de alambre de 470 mm/s
- Longitud libre o stock out de media pulgada
- Tiempo entre pasadas de 240 s
- Medición de Corriente media y voltaje
- Tiempo de soldadura
- Gases (80%Ar 20%O)

EQUIPO

- Software de LABIEW
- Modulo de entrada NI-9214 de 15 termopares Rototermicos
- 15 Termopares tipo K con una resistencia de temperatura de 1200°C



Modelo matemático

$$[C]\{T\} + [K]\{T\} = \{F_T\}$$

$$[C] = \int_V \rho c [N]^T [N] dV$$



$$\{F_T\} = \int_V Q [N]^T dV + \int_S h_f T_{ref} [N]^T dS$$

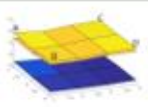

$$[K] = \int_V K [B]^T [B] dV + \int_S h_f [N]^T [N] dS$$

- ρ es la densidad (kg/m³).
- c calor específico (J/kg. K).
- k conductividad (W/m. K).
- h_f coeficiente de transferencia de calor convectivo (W/m². K).
- Q tasa de generación interna de calor por unidad de volumen (W/m³).
- $[N]$ matriz de las funciones de la forma del elemento,
- $[B]$ matriz de funciones de forma derivada,
- $\{T\}$ vector de temperatura nodal.

RESULTADOS


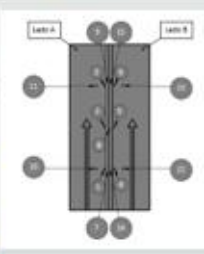
DISTORSIÓN

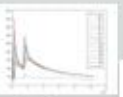
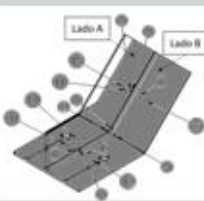



RESULTADOS (CONT.)

CICLOS TÉRMICOS

CONCLUSION

Los elementos estructurales analizados en base a las secuencias realizadas con el proceso de soldadura GMAW, se pudo percatar con las mediciones y a simple vista que la primera secuencia lineal se obtiene una mayor distorsión en ambas elementos estructurales soldados, en donde la se segunda secuencia nos genera una menor distorsión y con este estudio de análisis experimental podemos determinar que secuencia nos podrá ser mas útil para los siguientes procesos de soldadura y generar una menor distorsión




Figura 1.-Esquema Metodológico

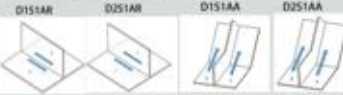
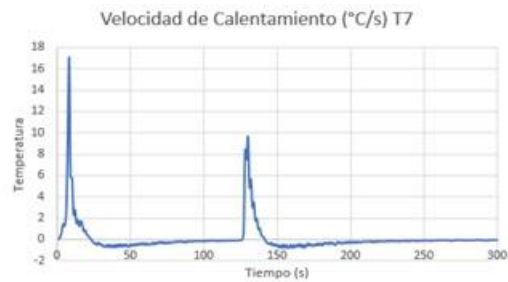
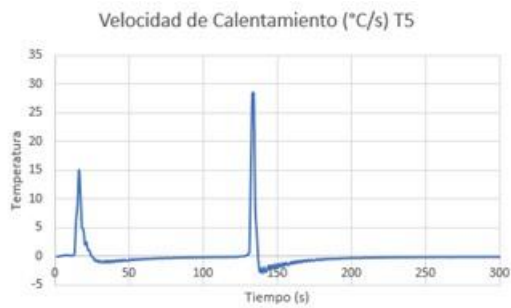
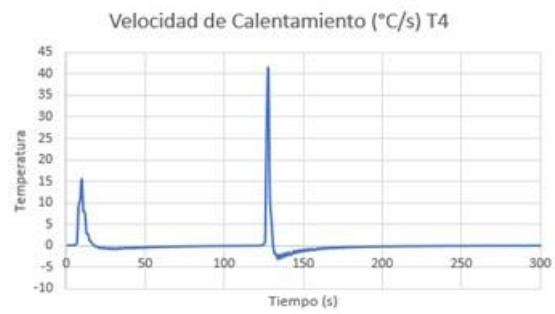
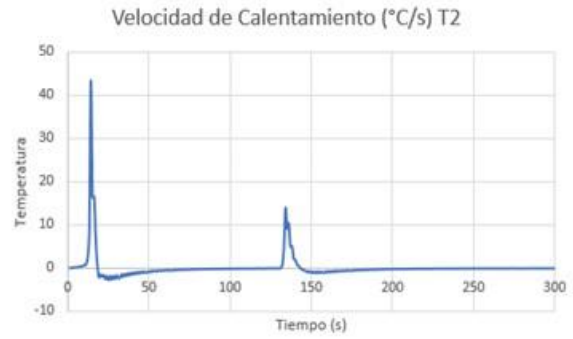
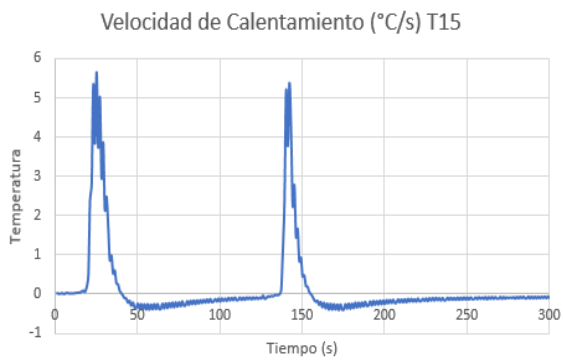
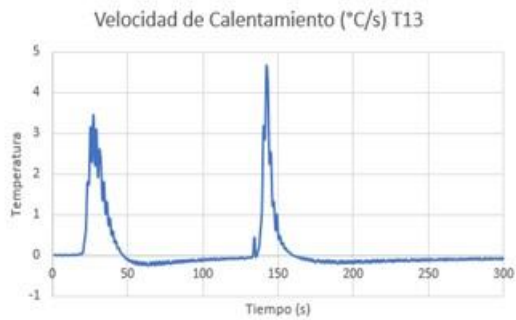
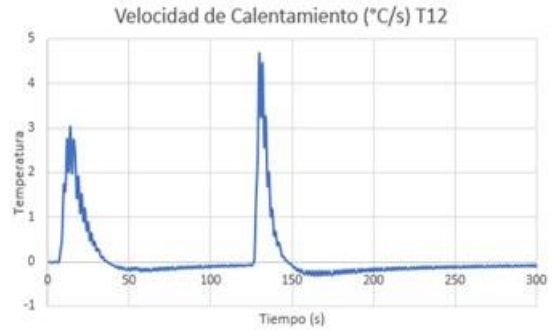
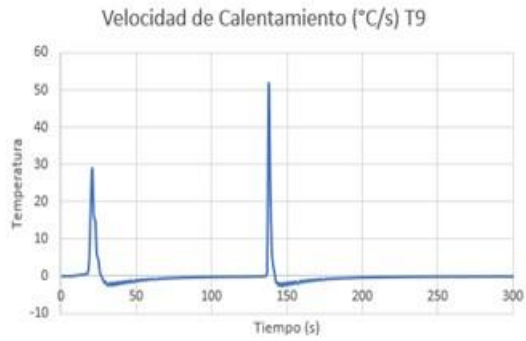


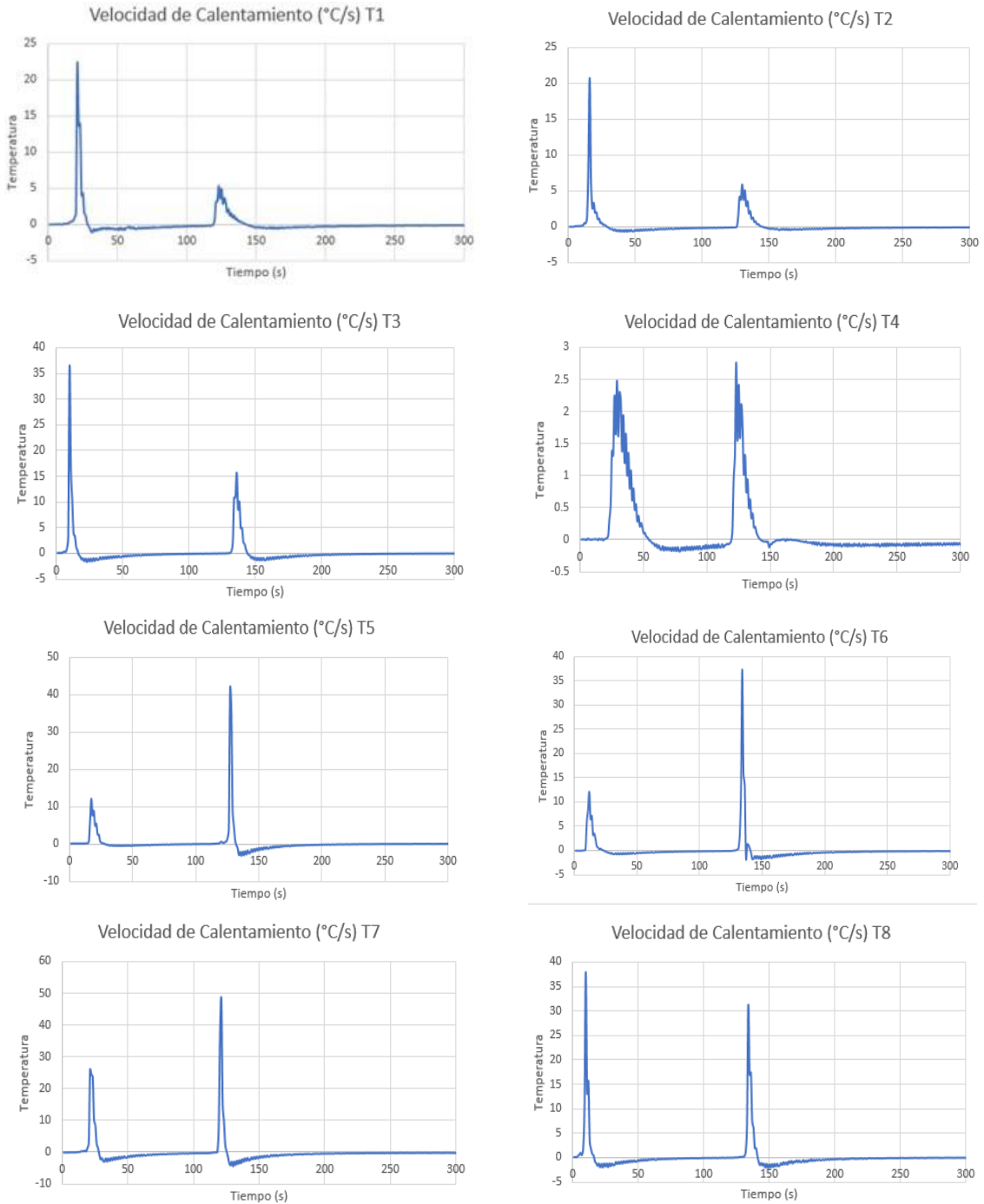
Figura 2.-Proceso de Soldadura GMAW

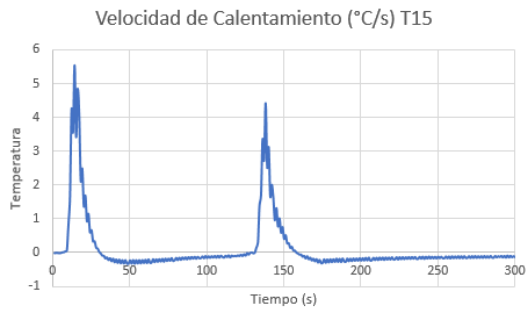
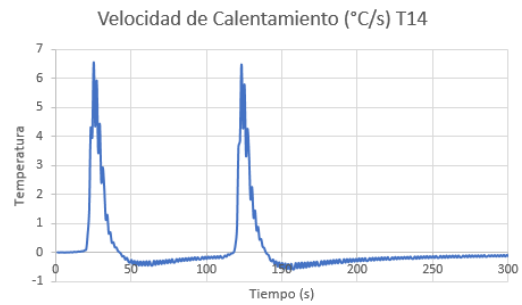
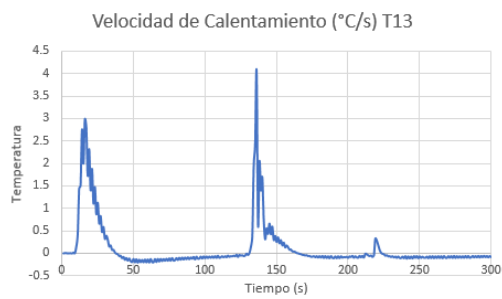
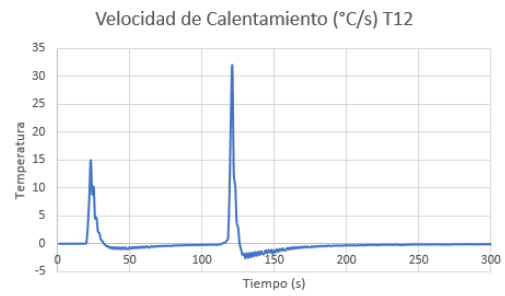
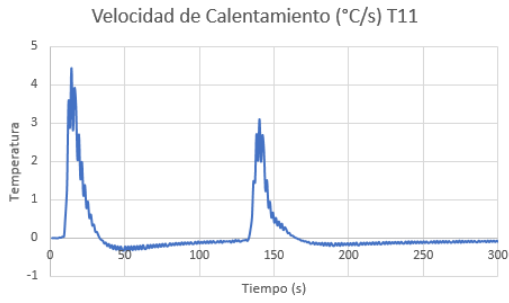
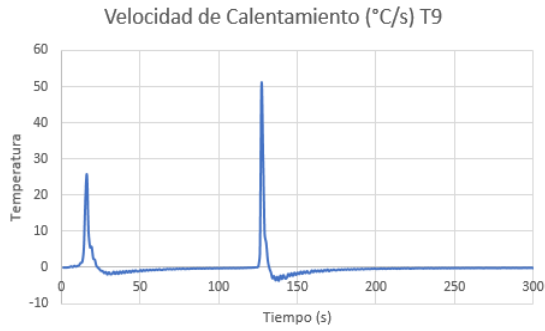
B) Graficas de Velocidad de Calentamiento del Elemento Recto en Junta en T con la Primera Secuencia Con el Código D3S1AR



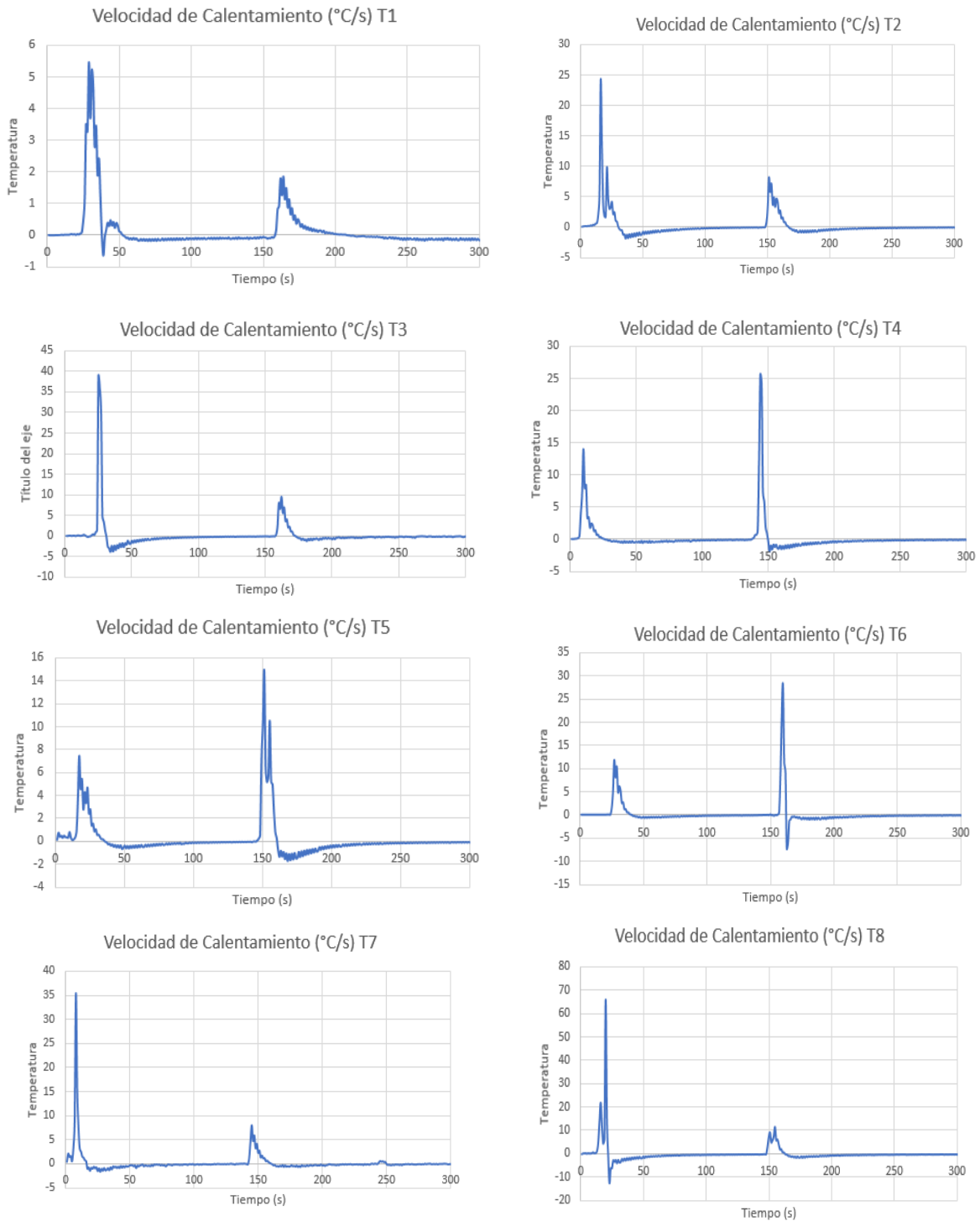


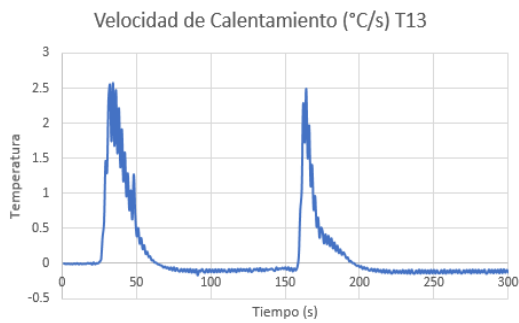
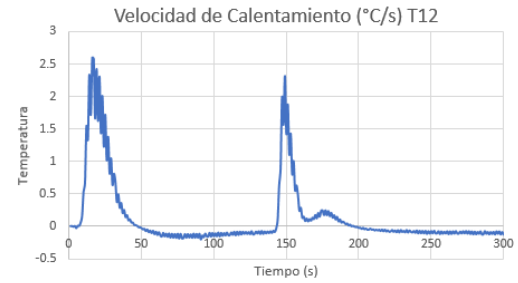
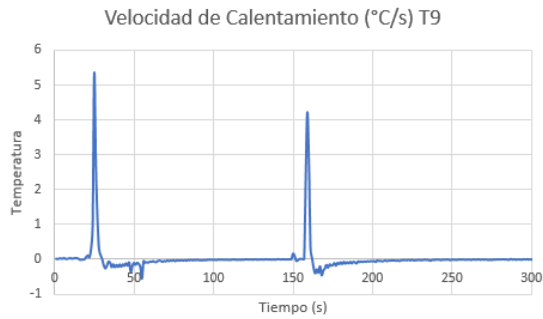
C) Graficas de Velocidad de Calentamiento del Elemento Recto en Junta en T con la Segunda Secuencia Con El Código D3S2AR





D) Graficas de Velocidad de Calentamiento del Elemento Angular en Junta en T con la Primera Secuencia con el Código D3S1AA





E) Graficas de Velocidad de Calentamiento del Elemento Angular en Junta en T con la Segunda Secuencia Con El Código D3S2AA

