

DESARROLLO DE UN MODELO TEÓRICO EXPERIMENTAL PARA CICLOS
TERMICOS Y PERFILES DE TEMPERATURA EN JUNTAS SOLDADAS
OBTENIDOS POR PROCESOS DE SOLDADURA AL ARCO ELECTRICO

POR:

JORGE LUIS PACHECO YEPES

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL CARIBE
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA MECANICA
BARRANQUILLA

2015

DESARROLLO DE UN MODELO TEÓRICO EXPERIMENTAL PARA CICLOS
TERMICOS Y PERFILES DE TEMPERATURA EN JUNTAS SOLDADAS
OBTENIDOS POR PROCESOS DE SOLDADURA AL ARCO ELECTRICO

JORGE LUIS PACHECO YEPES

Tesis para optar por el título de MAGISTER EN INGENIERÍA MECÁNICA

Directores

JIMY UNFRIED SILGADO, PhD
RAMIRO CHAMORRO CONEO, MSc.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL CARIBE
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA MECANICA
BARRANQUILLA

2015

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres, Fanaurio Pacheco y Dunia Yepes, su dedicación, amor incondicional y apoyo me han permitido superar todas las pruebas presentadas durante mi vida permitiendo forjar la persona y profesional que soy.

Mis hermanos Hugo, Cesar y Guillermo y a mis tías Junes y Ludís, por estar presentes cada vez que los necesite, brindándome su cariño, afecto, seguridad y apoyo incondicional en todo momento.

A mi novia Ana Milena, por aparecer en mi vida y brindarme incondicionalmente todo el amor y apoyo durante esta importante fase de mi vida. A mis amigos que han estado desde siempre conmigo, regalándome risas y ayudándome a encontrar tranquilidad en momentos difíciles.

A mi director de tesis y amigo Jimy Unfried, por brindarme todo el apoyo, comprensión y poner a mi servicio todo su conocimiento y experiencia para superar esta meta en mi vida profesional. Mis colegas y amigos Jennifer Villa, Alex Torres, Javier Carpintero, Jhonatan Fábregas, Saúl Perez y Camilo Fontalvo, los cuales brindaron todo su apoyo y conocimiento en la culminación exitosa de nuestra maestría.

A la Universidad Autónoma del Caribe y el grupo de investigación IMTEF del programa de Ingeniería Mecánica, por su apoyo institucional para la realización de este trabajo.

A COLCIENCIAS por el apoyo financiero a través de la beca de Joven Investigador e Innovador bajo la convocatoria 566-2012 en la modalidad tradicional.

A Dios, por poner en mi camino tantas personas tan importantes en mi vida y que me ayudaron a finalizar una etapa más en vida.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	15
INTRODUCCIÓN	16
1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	17
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
1.2 JUSTIFICACIÓN	19
1.3 OBJETIVOS	20
1.3.1 General	20
1.3.2 Específicos	20
2. MARCO REFERENCIAL	21
2.1 MARCO TEÓRICO	21
2.1.1 Generalidades de los procesos de soldadura	21
2.1.2. Flujo de calor en los procesos de soldadura.....	24
2.1.3 Análisis del flujo de calor en los procesos de soldadura	27
2.1.5 Efectos de la distribución de temperaturas sobre el material soldado ...	38
2.2 ESTADO DEL ARTE	41
3. DISEÑO METODOLOGICO	59
3.1 Selección de materiales, equipos de soldadura y sistema de medición de temperaturas para obtención de ciclos térmicos	60
3.1.1 Materiales y equipos para soldadura	60
3.1.2 Sensores y equipos de medición de temperatura	65
3.1.3. Registro de ciclos térmicos obtenidos por los experimentos	69
3.2 Parámetros y condiciones de frontera.....	69

3.2.1 Selección del modelo para determinar las temperaturas en soldadura .	69
3.2.2 Selección de parámetros de programación.....	75
3.2.3 Registro de los ciclos térmicos obtenidos por el modelo	76
3.3 Evaluación y validación experimental	77
3.3.1 Comparación y análisis de resultados modelo vs experimentos.....	77
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	80
4.1 Selección de materiales, equipos de soldadura y sistema de medición de temperaturas para obtención de ciclos térmicos	80
4.1.1 Materiales y equipos para soldadura	80
4.1.2 Sensores y equipos de medición de temperatura.....	81
4.2 Parámetros y condiciones de frontera.....	86
4.2.1 Desarrollo del modelo para determinar las temperaturas en soldadura en juntas soldadas de AA 5083 H-116 con proceso de soldadura GMAW-P	86
4.2.2 Desarrollo del modelo para determinar las temperaturas en soldadura en juntas soldadas AISI 430 y AISI 316L soldadas con proceso SMAW disímil..	89
4.2.3 Selección de parámetros de programación.....	91
4.4 Evaluación y validación experimental	96
4.4.1 Comparación de los ciclos térmicos del modelo vs experimento con material base AA5083 H-116 y proceso de soldadura GMAW-P.....	96
4.4.2 Comparación de los ciclos térmicos del modelo vs experimento con material base AISI 430 y AISI 316L y proceso de soldadura SMAW disímil.	102
4.4.3 Comparación de resultados del modelo con otros Autores: análisis estadístico.....	105
5. CONCLUSIONES.....	112
6. RECOMENDACIONES Y SUGERENCIAS DE TRABAJOS FUTUROS	114
ANEXOS	120

TABLA DE FIGURAS

Figura 1 Representación esquemática de los procesos de soldadura [12]	22
Figura 2 Aplicaciones de la soldadura en la industria naval, automotriz y espacial	24
Figura 3 Representación esquemática del movimiento de la fuente de calor sobre una placa.....	24
Figura 4 Estado transitorio y cuasi-estacionario para un proceso de soldadura ...	25
Figura 5 Representación de las zonas afectadas por el calor en función de la distribución de temperaturas	26
Figura 6 Representación gráfica del perfil de temperaturas.....	27
Figura 7 Pérdidas presente en un proceso de soldadura por arco eléctrico [13] ..	27
Figura 8 a. flujo de calor unidimensional y penetración total de la soldadura. b. Penetración parcial de la soldadura [13]	29
Figura 9 a. Representación esquemática de la distribución de calor en placa gruesa. b. Modelo de placa gruesa de la solución de Rosenthal [14]	31
Figura 10 a. Representación esquemática de la distribución de calor en placa delgada. b. solución del modelo de placa delgada propuesto por Rosenthal [14].	33
Figura 11 Obtención de la función de Bessel $K_0(u)$ y $K_1(u)$ [15].....	33
Figura 12 Representación de un ciclo térmico usando la solución de Rosenthal para placa gruesa [14].....	34
Figura 13 Cambio de la ductilidad y resistencia a la tensión asociadas a la distribución de temperaturas en juntas soldadas [13]	39
Figura 14 Representación esquemática de diferentes durezas obtenidas por soldadura por fusión para a. Aleación de solución sólida, b. endurecido por precipitación, c. endurecido por transformación [13].....	40
Figura 15. Distribución de temperaturas medidas sobre la línea longitudinal al movimiento de la fuente de calor para el modelo analítico y MEF [19]	42

Figura 16 Distribución de temperaturas transversal al movimiento de la fuente de calor para el modelo analítico y MEF [19]	42
Figura 17 Distribución de temperaturas medidas sobre la línea longitudinal al movimiento de la fuente de calor representada por una circunferencia para el modelo analítico y MEF [19].....	43
Figura 18 Distribución de temperaturas transversal al movimiento de la fuente de calor para el modelo analítico y MEF [19]	43
Figura 19 Distribución de temperaturas medidas en distancias transversales muy cercanas a la fuente de calor [19]	44
Figura 20 Especificaciones de las juntas soldadas y localización de los termopares en las placas [21]	45
Figura 21 Comparación de los ciclos térmicos obtenidos por elementos finitos y experimentales para diferentes posiciones medidas desde la línea de fusión. a) 3mm, b) 8mm, c) 13 mm, d) 18, e) 23 mm [21]	46
Figura 22 Ciclo térmico evaluado para junta disímil. Material base acero al carbono St37: a) 3mm, b) 8mm, c) 13 mm. Material base AISI 304: f) 3mm, g) 8mm y h) 13 mm [21]	47
Figura 23 Picos de temperatura medidos desde el centro del cordón de soldadura para la junta disímil [21]	48
Figura 24 Representación esquemática de fuente de calor Gaussiana sobre geometría de la junta soldada. [23]	49
Figura 25 Ciclos térmicos para el modelado de la fuente de calor puntual y Gaussiana, para un $y = 1 \times 10^{-3}$ m [23]	52
Figura 26 Ciclo térmico para el modelado de la fuente de calor puntual y Gaussiano, para un $y = 3 \times 10^{-3}$ m [23]	52
Figura 27 Ciclo térmico medido en la ZAT cercano a la interfase de la soldadura para entradas de calor de 0,5; 1,5 y 25 $\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$ [29].....	54
Figura 28 Perfil de temperaturas para 3 soluciones con una entrada de calor de $0,5 \text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$. [29]	55

Figura 29 a). Ubicación de los termopares sobre la tubería de acero inoxidable. b). Ubicación de las galgas extensiométricas sobre la tubería de acero inoxidable. [30]	56
Figura 30 Ciclos térmicos obtenidos a diferentes posiciones dentro de la tubería para la primera soldadura [30]	57
Figura 31 Comparación ciclos térmicos modelos a). 2D y experimental, b) 3D y experimental [30]	57
Figura 32 Montaje del sistema de adquisición de datos	63
Figura 33 Ubicación de los termopares en el material base	64
Figura 34 Montaje del experimento para el material base AA5083 H-116	64
Figura 35 Fijación de los termopares sobre el material base	65
Figura 36 Funcionamiento de un termopar a través del efecto Seebeck [36]	66
Figura 37 Representación real de un termopar [38]	67
Figura 38 Modulo NI9214 para conexión de termopares [39]	67
Figura 39 Chasis de acople de módulo de termopares [40]	68
Figura 40 a) presentación en diagramas de bloque para un ejemplo en LabVIEW®, b) resultado visual de programa generado [41]	69
Figura 41 Líneas de código desarrollado en Matlab® [44]	75
Figura 42 a). Ambiente para la creación de la interfaz gráfica. b) Interfaz gráfica terminada [44]	76
Figura 43 distribución normal [48]	78
Figura 44 Representación de Histogramas [49]	78
Figura 45 Relación de voltaje de referencia vs voltaje experimental	82
Figura 46 Diagrama de bloques del programa de adquisición de señales	82
Figura 47 Ciclo térmico obtenido experimentalmente para material base AA5083 H-116. Para $y = 3,7 \times 10^{-3}$ m	83
Figura 48 Ciclo térmico obtenido experimental para material base AA5083 H-116. $y = 5,3 \times 10^{-3}$ m	83
Figura 49 Ciclo térmico obtenido experimental para material base AA 5083 H-116. $y = 3,0 \times 10^{-2}$ m	84
Figura 50 Ciclo térmico experimental para material base AISI 430. $y = 6,8 \times 10^{-4}$ m	85

Figura 51 Ciclo térmico experimental para material base AISI 316L. $y=9,1 \times 10^{-4}$ m	85
Figura 52 Ciclo térmico experimental para material base AISI 316L. $y=6,2 \times 10^{-3}$ m	86
Figura 53 Ciclo térmico obtenido por el modelo para el material base AA5083 H-116 soldado con proceso GMAW-P. $y=3,7 \times 10^{-3}$ m	87
Figura 54 Ciclo térmico obtenido por el modelo para el material base AA5083 H-116 soldado con proceso GMAW-P. $y=5,3 \times 10^{-3}$ m	87
Figura 55 Ciclo térmico obtenido por el modelo para el material base AA5083 H-116 soldado con proceso GMAW-P. $y=3,0 \times 10^{-2}$ m	88
Figura 56 Ciclo térmico obtenido por el modelo para el material base AISI 430 soldado con proceso SMAW disímil y electrodo 2205.	89
Figura 57 Ciclo térmico obtenido por el modelo para el material base AISI 316 soldado con proceso SMAW disímil y electrodo 2205. $y=9,1 \times 10^{-4}$	90
Figura 58 Ciclo térmico obtenido por el modelo para el material base AISI 316 soldado con proceso SMAW disímil y electrodo 2205. $y=6,2 \times 10^{-3}$	90
Figura 59 Ingreso al programa de Histosold®	92
Figura 60 Ventana intermedia para la presentación de los componentes del programa	93
Figura 61 Cálculo del espesor relativo para obtención del tipo de solución de distribución de temperaturas	94
Figura 62 Cálculo del ciclo térmico en función de los parámetros presentados en el panel Punto de Análisis	95
Figura 63 Perfil de temperaturas obtenido por el programa desarrollado	96
Figura 64 Comparación de los ciclos térmicos obtenidos por el modelo y el experimento para el material base AA5083 H-116. $y = 3,7 \times 10^{-3}$ m	97
Figura 65 Comparación de los ciclos térmicos obtenidos por el modelo y el experimento para el material base AA5083 H-116. $y = 5,3 \times 10^{-3}$ m	98
Figura 66 Detalle de ubicación del termopar y punto de contacto con pared de perforación para lectura de temperatura	99

Figura 67 a. comparación de los ciclos térmicos para 3 puntos de contacto, b. Nueva comparación de los ciclos térmicos obtenidos por el modelo y el experimento para el material base AA5083 H-116.....	100
Figura 68 Comparación de los ciclos térmicos obtenidos por el modelo y el experimento para el material base AA5083 H-116. $y = 3,0 \times 10^{-2}$ m	102
Figura 69 Comparación de los ciclos térmicos obtenidos por el modelo y el experimento para el material base AISI 430. $y = 6,8 \times 10^{-4}$ m.....	103
Figura 70 Comparación de los ciclos térmicos obtenidos por el modelo y el experimento para el material base AISI 316l. $y = 9,3 \times 10^{-4}$ m	104
Figura 71 Comparación de los ciclos térmicos obtenidos por el modelo y el experimento para el material base AISI 316l. $y = 6,2 \times 10^{-3}$	105
Figura 72 Histograma para modelo propuesto	106
Figura 73 a) Histogramas para el modelo de la referencia, b) Histograma para el experimento de la referencia	107
Figura 74 Histograma de los datos obtenidos por el modelo desarrollado y el modelo propuesto por la referencia.....	108
Figura 75 Diagrama de barras y bigotes para análisis de comparación del modelo desarrollado vs modelo propuesto	109
Figura 76 Histograma del modelo desarrollado vs el experimento.....	110
Figura 77 Diagrama de cajas y bigotes para el modelo desarrollo vs experimento referencia	110
Figura 78 Histograma del modelo desarrollado para determinar la distribución normal de datos.....	120
Figura 79 Histograma del modelo y experimento de la referencia [46]	121
Figura 80 Histograma del modelo desarrollado vs el modelo de la referencia [46]	122
Figura 81 Grafico de caja y bigotes para análisis del modelo desarrollado y la referencia [46]	123
Figura 82 Histograma de la comparación del modelo desarrollado y el experimento de la referencia [46].....	124

Figura 83 Grafico de caja y bigote para el modelo desarrollado y la referencia [46]	124
---	-----

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1 Algunos procesos de soldadura categorizados por la fuente de calor generada al momento de la soldadura. [13]	23
Tabla 2 Eficiencias de arco de algunos procesos de soldadura [15]	28
Tabla 3 propiedades físicas del acero bajo carbono [25]	50
Tabla 4 Parámetros de soldadura usados para las 3 pasadas [23]	50
Tabla 5 entradas de calor y valores de y_b basados en revisión bibliográfica [23]	51
Tabla 6 Valores del parámetro y_b para cada pasada	51
Tabla 7 Picos de temperatura alcanzados para cada pasada de soldadura [23]	53
Tabla 8 Tiempo de enfriamiento y tasa de enfriamiento desde los 800°C a 500°C, para 3 muestras de soldaduras [29]	54
Tabla 9 Plan del desarrollo metodológico	59
Tabla 10 descripción de los materiales base, tipo de bisel, espesor de placa y proceso de soldadura	60
Tabla 11 Propiedades térmicas de los materiales base [34]	61
Tabla 12 Dimensiones de la placa y preparación de junta para los materiales base	61
Tabla 13 Dimensiones de los termopares sobre el material base	62
Tabla 14 Equipos de soldadura, electrodo y gas de protección usado para generar las juntas de soldadura	62
Tabla 15 Parámetros usados para el desarrollo del modelo de distribución de temperaturas en juntas soldadas por procesos al arco eléctrico	74
Tabla 16 Parámetros de los procesos de soldadura para cada experimento	80
Tabla 17 Entrada de calor para cada experimento	80
Tabla 18 Extensión de la ZAT	81
Tabla 19 Resultados de voltaje experimental y voltaje de la referencia	81

Tabla 20 Picos de temperaturas y tasas de enfriamiento para AA 5083 H-116 soldadas con GMAW - P	84
Tabla 21 Picos de temperatura y tasas de enfriamiento para AISI 430 y AISI 316L, soldadas con SMAW disímil.	86
Tabla 22 Picos de temperatura y tasas de enfriamiento para los ciclos térmicos obtenidos por el modelo para AA5083-H116 soldada con GMAW-P	88
Tabla 23 Parámetros de r_b y y_0 para determinar la distribución de temperaturas de los casos estudiados	91
Tabla 24 Picos de temperatura y tasas de enfriamiento para los ciclos térmicos obtenidos por el modelo para AISI430 y AISI316 soldada con SMAW disímil.	91
Tabla 25 porcentaje de error para picos de temperatura obtenidos por el modelo y el experimento en AA 5083 H-116 para un $y = 3,7 \times 10^{-3}$ m.....	97
Tabla 26 porcentaje de error para tasas de enfriamiento obtenidas por el modelo y el experimento en AA 5083 H-116 para un $y = 3,7 \times 10^{-3}$ m.....	98
Tabla 27 porcentaje de error para picos de temperatura obtenidos por el modelo y el experimento en AA 5083 H-116 para un $y = 5,3 \times 10^{-3}$ m.....	99
Tabla 28 porcentaje de error para tasas de enfriamiento obtenidas por el modelo y el experimento en AA 5083 H-116 para un $y = 5,3 \times 10^{-3}$ m.....	99
Tabla 29 Nuevo cálculo de porcentaje de error para picos de temperatura obtenidos por el modelo y el experimento en AA 5083 H-116. $y=6,35 \times 10^{-3}$ m....	101
Tabla 30 Porcentaje de error para picos de temperatura obtenidos por el modelo y el experimento en AA 5083 H-116 para un $y = 3,0 \times 10^{-2}$ m.....	102
Tabla 31 Porcentaje de error para picos de temperatura obtenidos por el modelo y el experimento en AISI 430. $y=6,8 \times 10^{-4}$ m	103
Tabla 32 Porcentaje de error para tasas de enfriamiento obtenidos por el modelo y el experimento en AISI 430. $y=6,8 \times 10^{-4}$ m	103
Tabla 33 Porcentaje de error para picos de temperatura obtenidos por el modelo y el experimento en AISI 316l para un $y = 9,3 \times 10^{-4}$ m.....	104
Tabla 34 Porcentaje de error para tasas de enfriamiento obtenidos por el modelo y el experimento en AISI 316l para un $y = 9,3 \times 10^{-4}$ m.....	104

Tabla 35 Porcentaje de error para picos de temperatura obtenidos por el modelo y el experimento en AISI 316l para un $y = 6,2 \times 10^{-3}$ m.....	105
Tabla 36 Conjunto de datos obtenidos por el modelo desarrollado y la referencia	106
Tabla 37 Pruebas de Bondad de Ajuste para modelo propuesto	106
Tabla 38 Prueba de bondad de ajuste para modelo de la referencia [46]	107
Tabla 39 Prueba de bondad de ajuste para experimento de la referencia [46] ...	108
Tabla 40 Comparación de medias para el modelo desarrollado y el modelo de la referencia	109
Tabla 41 Comparación de medias para el modelo desarrollado y el modelo de la referencia	110
Tabla 42 Conjunto de datos obtenidos por el modelo y la referencia [46]	111
Tabla 43 Prueba de ajuste de bondad para datos obtenidos por el modelo desarrollado.....	120
Tabla 44 Prueba de ajuste de bondad para el modelo y experimento de la referencia [46]	122
Tabla 45 Comparación de medias para el modelo desarrollado y el modelo de la referencia [46]	123
Tabla 46 Comparación de medias para el modelo desarrollado y el experimento de la referencia [46].....	125

RESUMEN

En este trabajo se desarrolló un modelo para la obtención de los ciclos térmicos en diferentes materiales base soldadas por procesos de soldadura al arco eléctrico. El modelo desarrollado es alimentado por las dimensiones la placa soldada, las propiedades termo-físicas del material base y los parámetros de soldadura. El modelo estuvo basado en la solución propuesta por Rosenthal y complementada por Tsai. Por último, el modelo fue ingresado en una subrutina junto con una interfaz gráfica para visualizar de manera rápida y amigable al usuario los resultados de los ciclos térmicos.

Para la validación del modelo desarrollado se llevó a cabo un experimento en juntas de aleaciones de aluminio AA 5083 H-116 soldadas con proceso de soldadura GMAW-P y juntas de aceros AISI 430 y AISI 316L soldadas con proceso de soldadura SMAW disímil. Para la obtención del ciclo térmico se usaron termopares ubicados estratégicamente en las juntas soldadas y un sistema de adquisición de datos permitió la recolección y organización de los datos obtenidos por los termopares durante todo el proceso de soldadura. El modelo desarrollado también fue comparado con resultados de otros autores.

El análisis de los resultados estuvo enfocado en el comportamiento de los ciclos térmicos obtenidos por el modelo desarrollado y el experimento, centrándose en los picos de temperaturas obtenidos y las tasas de enfriamiento. De igual manera, un análisis estadístico se llevó a cabo para establecer la relación del modelo desarrollado con los resultados de otros autores.

INTRODUCCIÓN

El cálculo de la distribución de temperatura sobre juntas soldadas empieza sus avances con la presentación de un modelo de fuente de calor propuesto por Rosenthal en 1964 permitiendo establecer el fundamento matemático para el desarrollo de numerosas investigaciones.

Con base en el modelo de Rosenthal, los avances en modelos que permitan la obtención de la distribución de temperaturas han trascendido presentando análisis matemáticos complejos y puestos en lenguajes computacionales.

Los estudios más recientes, usan programas basados en el método de elementos finitos para dar solución al cálculo de la distribución de temperatura a través de procesos de simulación que requieren de una alta exigencia computacional y un conocimiento amplio en el manejo de los programas para establecer condiciones de mallados, condiciones iniciales y de frontera y altos de tiempo de simulación para la obtención de resultados.

Por tal motivo el objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo matemático para obtener el ciclo térmico en los procesos de soldadura al arco eléctrico. Este modelo será implementado en una interfaz gráfica que le solicitara las propiedades del material base, las dimensiones del material y los parámetros de soldadura al usuario, para la obtención de manera inmediata y con un alto nivel de confiabilidad los resultados de los ciclos térmicos.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los efectos asociados a los ciclos térmicos presentes en los procesos de soldadura son importantes en el análisis de distribución de calor en la zona próxima a la línea de fusión, la cual es conocida como la zona afectada térmicamente (ZAT). Esta distribución de calor afecta a la microestructura de la junta soldada y a su vez las propiedades mecánicas, generando problemas de tensiones residuales y distorsiones. [1, 2, 3]

Por tal motivo, es necesario el conocimiento de la distribución de calor en las zonas cercanas al cordón de soldadura que permita realizar análisis de extensión de la ZAT en función de la temperatura, las propiedades del material y los parámetros de soldadura.

Existen diferentes formas para determinar la distribución de calor en la ZAT, a través de modelos matemáticos analíticos complejos que describen el comportamiento de la temperatura para casos particulares de procesos de soldadura [4, 5], o, a través de herramientas computacionales usando teoría y modelos de elementos finitos cumpliendo ciertos requerimientos del modelo analizado, como el tipo de mallado, condiciones de fronteras y requerimientos del software como velocidad de procesamiento de datos [6, 7, 8] .

La necesidad de establecer un modelo matemático que permita describir el fenómeno de distribución de calor en juntas soldadas que sea ajustable a cualquier proceso de soldadura y usado en diferentes materiales base, permitiría la obtención de ciclos térmicos y perfiles de temperatura que asociados a estudios microestructurales podrían analizar los efectos en las propiedades mecánicas de la junta soldada.

En este trabajo se generará una subrutina computacional basada en un modelo matemático propuesto por Rosenthal [9], para definir el fenómeno de distribución

de temperaturas y el cual contará con una interfaz gráfica para la visualización de los ciclos térmicos y perfiles de temperatura asociados a procesos de soldadura GMAW-P y SMAW, en materiales base en aleaciones de aluminio 5083 H-116 y aceros AISI 430 y AISI 316L.

1.2 JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo tiene como objetivo establecer un modelo que permitirá la obtención del historial térmico en juntas soldadas con proceso de soldadura al arco en función de los parámetros de soldadura y de las propiedades del material, considerando como zona de estudio la ZAT.

El modelo es ajustable a cualquier proceso de soldadura al arco y cualquier material base, evitando el uso de complejos modelos matemáticos desarrollados analíticamente y herramientas computacionales asociadas a teorías y técnicas de modelos de elementos finitos con exigencias de poderosos instrumentos de procesamiento de datos y costos altos en la adquisición de programas para el desarrollo de simulaciones.

Este modelo estará vinculado a una subrutina y asociada a su vez con una interfaz gráfica permitiendo la obtención de los ciclos térmicos y perfiles de temperaturas asociados a diferentes estudios en el campo de la soldadura los cuales se están llevando a cabo por el grupo de investigación IMTEF – Investigación en Materiales, Procesos y Tecnologías de Fabricación – de la Universidad Autónoma del Caribe.

La importancia de este trabajo radica en la generación de nuevos conocimientos y el desarrollo de herramientas computacionales que permitan el procesamiento de datos inmediatos sin la necesidad de usar técnicas más complejas de simulación o teorías analíticas, incluyendo alta confiabilidad de las respuestas obtenidas.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 General

Desarrollar, con el uso de herramientas computacionales, un modelo teórico experimental para la obtención de ciclos térmicos y perfiles de temperatura en juntas soldadas obtenidas con procesos de soldadura al arco eléctrico.

1.3.2 Específicos

1. Seleccionar un modelo matemático que permita determinar la distribución de calor en juntas soldadas
2. Diseñar una subrutina con un lenguaje adecuado de programación para la creación del algoritmo y la interfaz gráfica del programa para resolver el modelo matemático
3. Obtener experimentalmente el historial térmico de juntas soldadas a través de un sistema de adquisición de datos, termopares y un programa que permita interpretar los datos recolectados
4. Validar el modelo de distribución de calor usando experimentos en juntas soldadas bajo diferentes procesos de soldadura y diferentes materiales base estudiando la distribución de las zonas soldadas

2. MARCO REFERENCIAL

2.1 MARCO TEÓRICO

2.1.1 Generalidades de los procesos de soldadura

La soldadura es uno de los procesos de unión permanente más usado en la industria, debido a las propiedades, características y calidad de las juntas formadas. El concepto de soldadura es definido por la Sociedad Americana de Soldadura (AWS, por sus siglas en inglés), como: “la coalescencia de metales o no metales producida por el calentamiento del material hasta la temperatura de soldadura; con o sin la aplicación de presión, o el uso de material de aporte” [10].

El uso de los procesos de soldadura se encuentra ligado al tipo de materiales que se desean soldar, los espesores de los materiales, el espacio de trabajo donde se desea ejecutar la soldadura, la presentación de la junta soldada; existiendo así, una gran variedad de procesos de soldadura. Es por esto, que se permite establecer diferentes formas para clasificar los procesos de soldadura, ya sea si la junta formada se hace en presencia de presión o de calor (para ambos casos, existiendo una fusión o no del material base) como se muestra en la Figura 1 o el tipo de fuente de calor asociada al proceso de soldadura como se muestra en la Tabla 1.

La gran variedad de procesos de soldadura, permite cubrir un amplio campo en la industria [11]. Se puede observar el uso de la soldadura en la industria automotriz para la formación de carrocerías de autos, en la industria naval, donde se aplica en la unión de las planchas para la formación de cascos de navíos y en aplicaciones aeroespaciales, en la formación de perfiles de cohetes como se muestra en la Figura 2.

Figura 1 Representación esquemática de los procesos de soldadura [12]

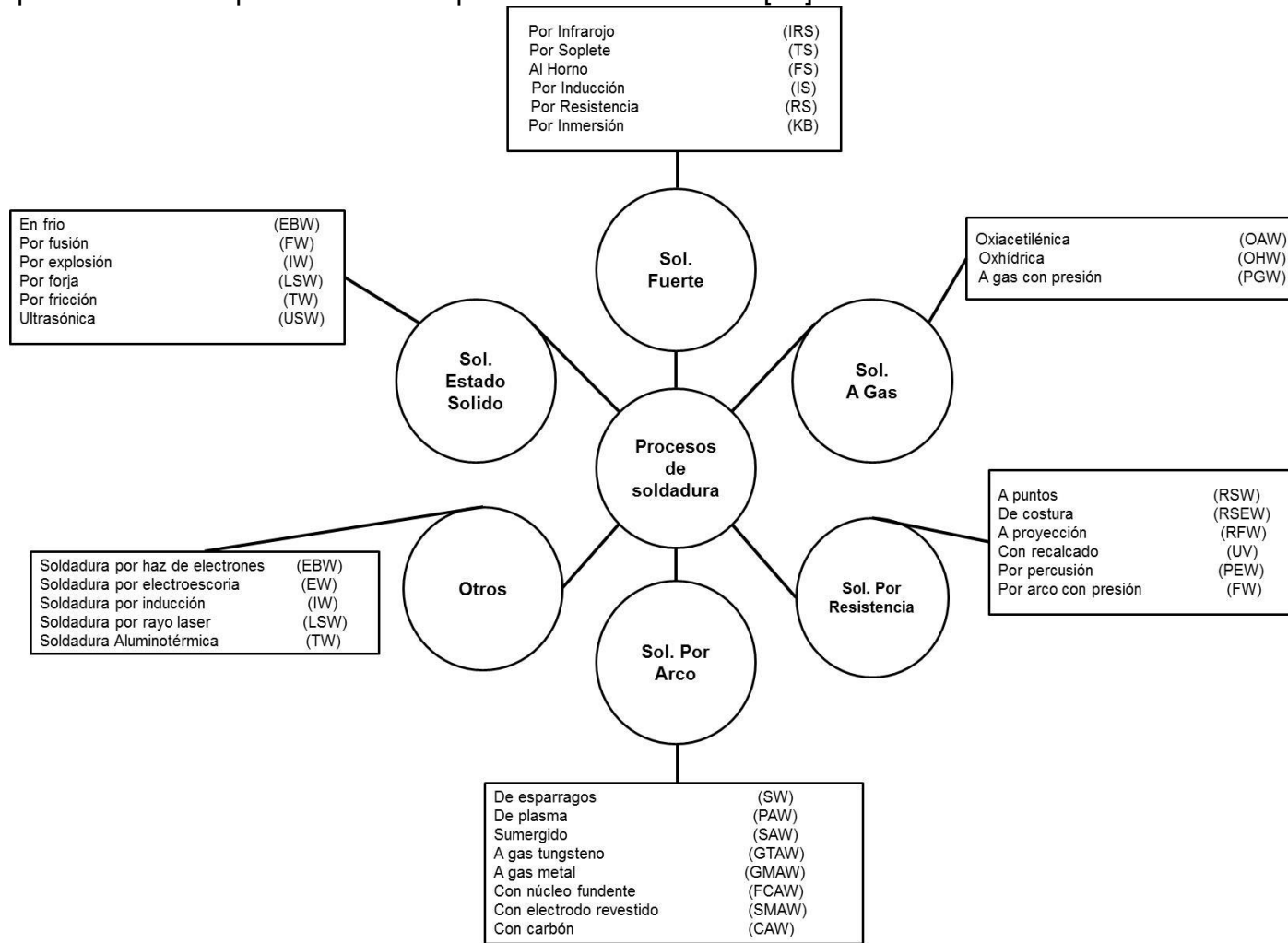


Tabla 1 Algunos procesos de soldadura categorizados por la fuente de calor generada al momento de la soldadura. [13]

MECANICO	QUIMICO	ELECTRICO
Soldadura en frio (CW)	Soldadura por gas a presión (PGW)	Soldadura de pernos por arco (SW)
Soldadura a presión en caliente (HPW)	Pressure Thermit Welding (PTW)	Soldadura por arco magnéticamente impulsado (MIAW)
Soldadura por forja (FOW)	Oxy.fuel Gas Welding (OFW)	Soldadura de arco de tungsteno protegido por gas (GTAW)
Soldadura por rodillo (ROW)	Soldadura por termita (TW)	Soldadura por arco de plasma (PAW)
Soldadura por fricción - agitación (FSW)		Soldadura por arco con electro de carbón (CAW)
Soldadura ultrasónica (USW)		Soldadura por arco metálico protegido por gas (GMAW)
Soldadura por explosión (EXW)		Soldadura por arco metálico protegido (SMAW)
Soldadura por difusión (DFW)		

La amplia variedad de procesos de soldadura, la diversidad de usos en diferentes materiales, la posibilidad de ser manual, semiautomática y automática, la estética en la presentación final del cordón y las propiedades de las juntas soldadas, son

algunas de las ventajas de los procesos de soldadura, con respecto a otros procesos de unión.

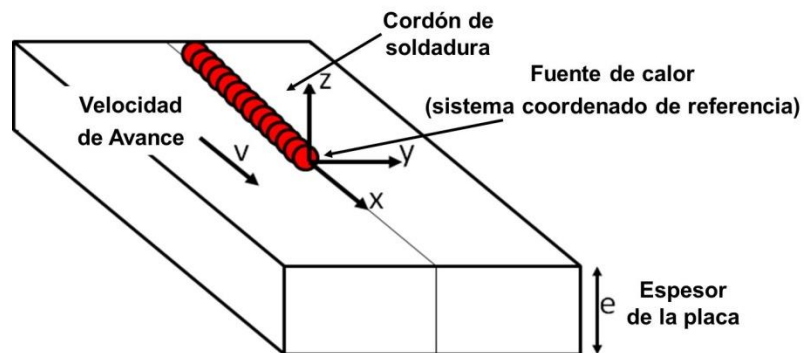
Figura 2 Aplicaciones de la soldadura en la industria naval, automotriz y espacial



2.1.2. Flujo de calor en los procesos de soldadura

La Figura 3 representa esquemáticamente el movimiento de una fuente de calor de un proceso de soldadura (por ejemplo, proceso de soldadura al arco eléctrico). La fuente de calor se mueve a lo largo de una placa bajo un sistema coordinado de referencia a una velocidad de avance constante v , (ms^{-1}), sobre una placa base de espesor e , (m).

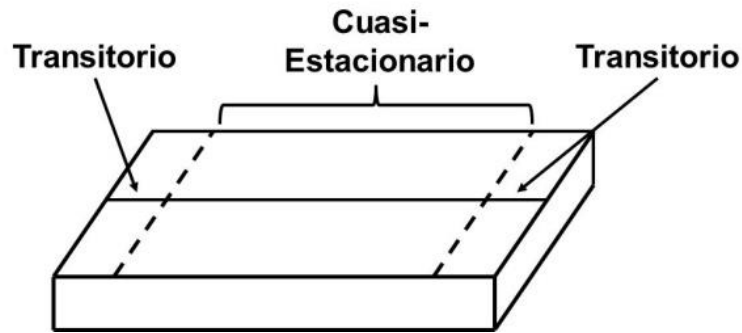
Figura 3 Representación esquemática del movimiento de la fuente de calor sobre una placa



Del movimiento de la fuente de calor se establece un estado térmico transitorio que se presenta al iniciar y finalizar la fuente de calor. Para un punto cualquiera entre el inicio y culminación del cordón de soldadura se establece un equilibrio

térmico con respecto al movimiento de la fuente de calor, estableciendo un estado *cuasi-estacionario* de la distribución de temperaturas alrededor del punto como se muestra en la Figura 4

Figura 4 Estado transitorio y cuasi-estacionario para un proceso de soldadura



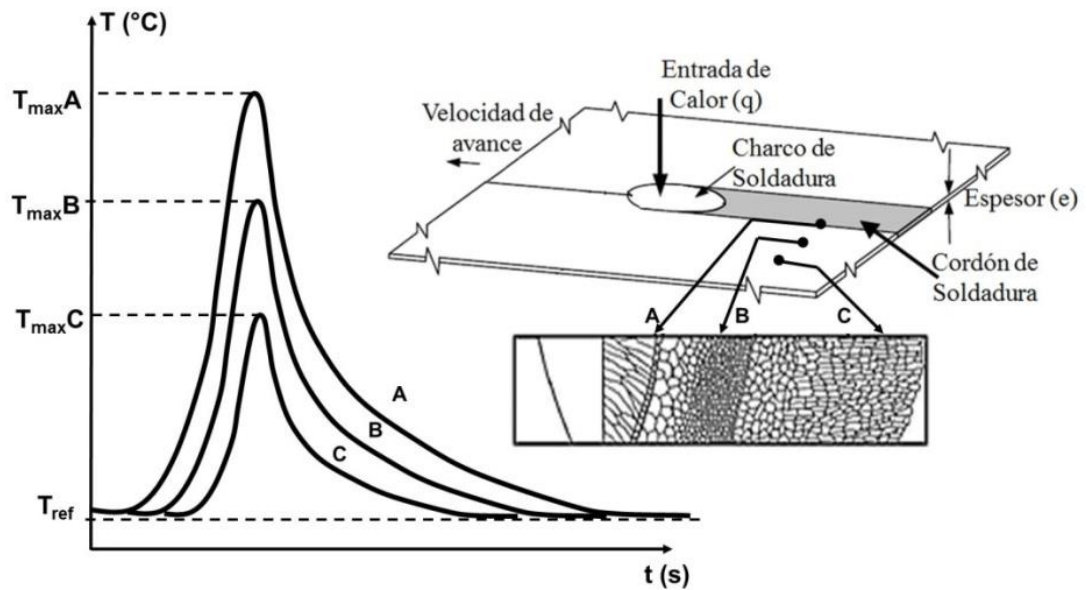
El efecto de la entrada de calor en la soldadura, independiente si alcanza o no la fusión del material, genera zonas afectadas por el calor ocasionando transformaciones de fase, cambios en las propiedades mecánicas, esfuerzos residuales y distorsiones en la junta soldada [14]. Estas zonas se conocen como zona fundida (ZF), zona afectada térmicamente (ZAT) y el metal base. Estas zonas son producto de la distribución de temperaturas asociadas a la entrada de calor.

En términos de picos de temperaturas alcanzados y el tiempo que toma en alcanzarlos, permiten determinar completamente los efectos en los cambios macro y microestructurales de la junta soldada [13]. La representación gráfica del cambio de la temperatura con respecto al tiempo para un punto de análisis ubicado en la junta soldada se conoce como *ciclo térmico*.

La Figura 5 muestra los ciclos térmicos para diferentes puntos de análisis *A*, *B* y *C* ubicados en ZF, ZAT y el metal base, respectivamente. Entre más cercano se encuentre el punto de análisis a la fuente de calor, mayor será el pico de temperatura alcanzado. Los puntos de análisis inician bajo una temperatura de referencia T_{ref} que generalmente es la temperatura del recinto. Al instante que la

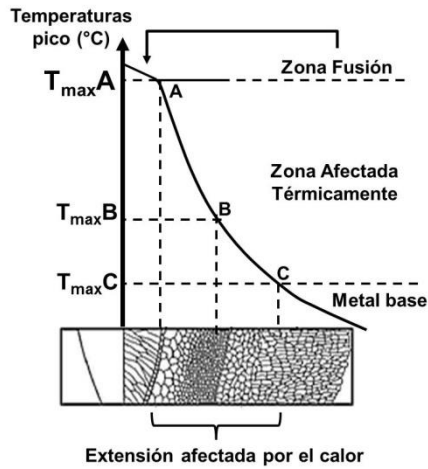
fuente de calor se mueve, empieza a incrementarse la temperatura para cada punto de análisis hasta alcanzar las máximas temperaturas T_{maxA} , T_{maxB} y T_{maxC} . Una vez se aleja la fuente de calor los puntos de análisis, se inicia un descenso lento de la temperatura hasta alcanzar el equilibrio térmico con T_{ref} .

Figura 5 Representación de las zonas afectadas por el calor en función de la distribución de temperaturas



La relación de los picos de temperaturas con los puntos de análisis A , B y C , logra establecer la extensión de la zona afectada por el calor. La representación gráfica de los picos de temperatura con la distancia medida transversal al cordón de soldadura se conoce como *perfil de temperaturas*, en la Figura 6 se muestra el perfil de temperaturas asociado con cada zona de soldadura.

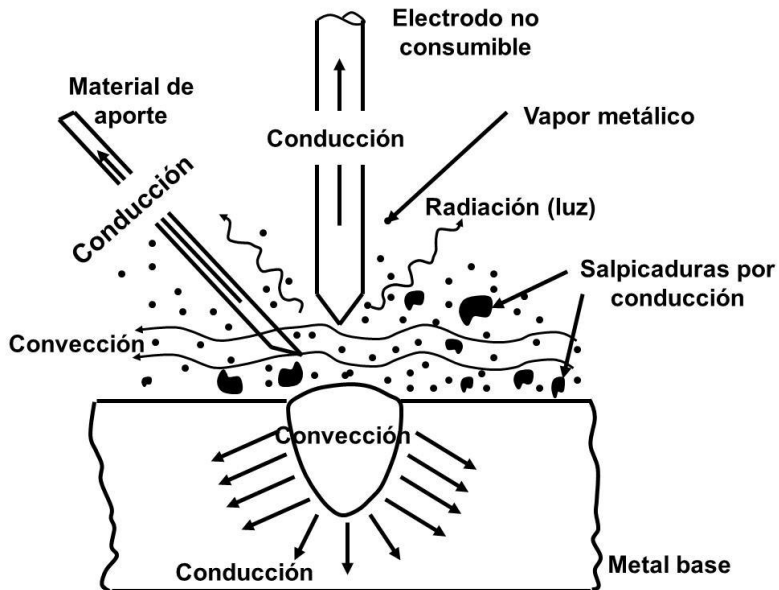
Figura 6 Representación gráfica del perfil de temperaturas



2.1.3 Análisis del flujo de calor en los procesos de soldadura

Solo una porción de la entrada de calor es usada para generar el cordón de soldadura, la otra porción es la suma de pérdidas entre la fuente de calor y el metal base. La Figura 7 presenta de manera esquemática algunas pérdidas presentes en el proceso de soldadura.

Figura 7 Pérdidas presente en un proceso de soldadura por arco eléctrico [13]



Al existir solo una porción de la entrada de calor total suministrada a la pieza de trabajo, se hace necesario determinar cuánto es ese calor.

Algunos autores [14] sugieren que, el calor suministrado Q está en función de la eficiencia del proceso η y una potencia nominal Q_{nom} suministrada por la fuente.

$$Q = \eta * Q_{nom} \quad (1)$$

Para los procesos de soldadura por arco, el Q_{nom} es la potencia en función del voltaje de arco y la intensidad de arco. La eficiencia de algunos procesos de soldadura es presentada en la Tabla 2

Tabla 2 Eficiencias de arco de algunos procesos de soldadura [15]

Proceso de soldadura		Eficiencia de Arco, factor η	
		Intervalo	Media
Soldadura SA		0,91 – 0,99	0,95
Soldadura SMAW		0,66 – 0,85	0,80
Soldadura GMAW	CO ₂ - Acero	0,75 – 0,93	0,85
	Ar - Acero	0,66 – 0,70	0,70
Soldadura GTAW	Ar – acero	0,25 – 0,75	0,40
	He – Al	0,55 – 0,80	0,60
	Ar - Al	0,22 – 0,46	0,40

Este calor de entrada, genera una distribución de temperaturas sobre la pieza, la cual está gobernada por la ecuación de conducción de calor (2), que describe el comportamiento de la temperatura con respecto al tiempo, visto desde un plano de coordenadas cartesianas.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[(k(T)) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(k(T)) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[(k(T)) \frac{\partial T}{\partial z} \right] = \rho C(T) \frac{\partial T}{\partial t} - Q \quad (2)$$

Dónde:

x = es la dirección en la que se mueve la fuente de calor (m)

y = es la dirección transversal a la fuente de calor (m)

z = es la dirección normal a la fuente de calor (m)

$k(T)$ = es la conductividad térmica en función de la temperatura ($J \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot C^{-1}$)

ρ = es la densidad del material base ($Kg \cdot m^{-3}$)

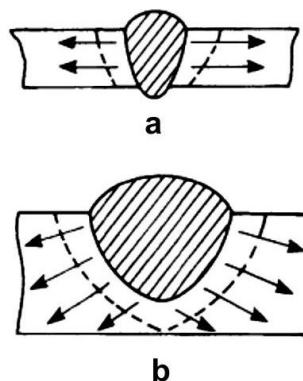
C = es el calor específico del material base ($W \cdot m^{-3}$)

T = temperatura de la junta ($^{\circ}C$)

Q = es el calor suministrado ($W \cdot m^{-3}$)

Si se desea resolver la ecuación de conducción de calor para una dimensión específica, puede considerarse placas delgadas donde se considera un flujo de calor unidimensional y existe una penetración total de la soldadura como se muestra en la Figura 8a, permitiendo la solución de la ecuación 2 usando una o dos dimensiones. En el caso de placas gruesas donde el flujo de calor es radial y existe una penetración parcial de la soldadura como se muestra en la Figura 8b, entonces la solución de la ecuación 2 estará asociada a 3 dimensiones [16].

Figura 8 a. flujo de calor unidimensional y penetración total de la soldadura. b. Penetración parcial de la soldadura [13]



La solución de la ecuación de distribución de calor se dificulta cuando las dimensiones del flujo de calor se aumentan y se considera la dependencia de las propiedades termo-físicas del material en función de la temperatura. Por tal motivo, Rosenthal [9] presenta dos posibles soluciones para la ecuación de distribución de calor, a través de una serie de consideraciones [14, 15]:

1. Un estado cuasi-estacionario del flujo de calor (existe un balance entre la fuente de calor y todas las pérdidas),
2. Representación de la fuente de calor como un punto
3. Velocidad constante (v) de la fuente de calor, a lo largo del eje del cordón de soldadura del marco de referencia
4. Las propiedades termo-físicas del material son independientes de la temperatura.

la ecuación 3 presenta la solución de la distribución de temperaturas para una fuente de calor que se mueve con velocidad constante (v) a lo largo de una placa gruesa de longitud semi-infinita y comportamiento de flujo de calor radial, como se muestra en la Figura 9.

$$T - T_0 = \frac{q_0}{\lambda 2\pi} \left[\frac{1}{R} \right] \exp \left[-\frac{v}{2\alpha} (R + w) \right] \quad (3)$$

Donde:

T_0 = Temperatura inicial de la placa ($^{\circ}\text{C}$)

q_0 = Calor transferido de la fuente de calor al metal base ($\text{J}\cdot\text{m}^{-1}$)

λ = conductividad térmica del material ($\text{J}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$)

v = velocidad de avance del proceso de soldadura ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

α = difusividad térmica ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$), calculada como $k/\rho C$

C = calor específico del material ($\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$)

ρ = densidad del material base ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

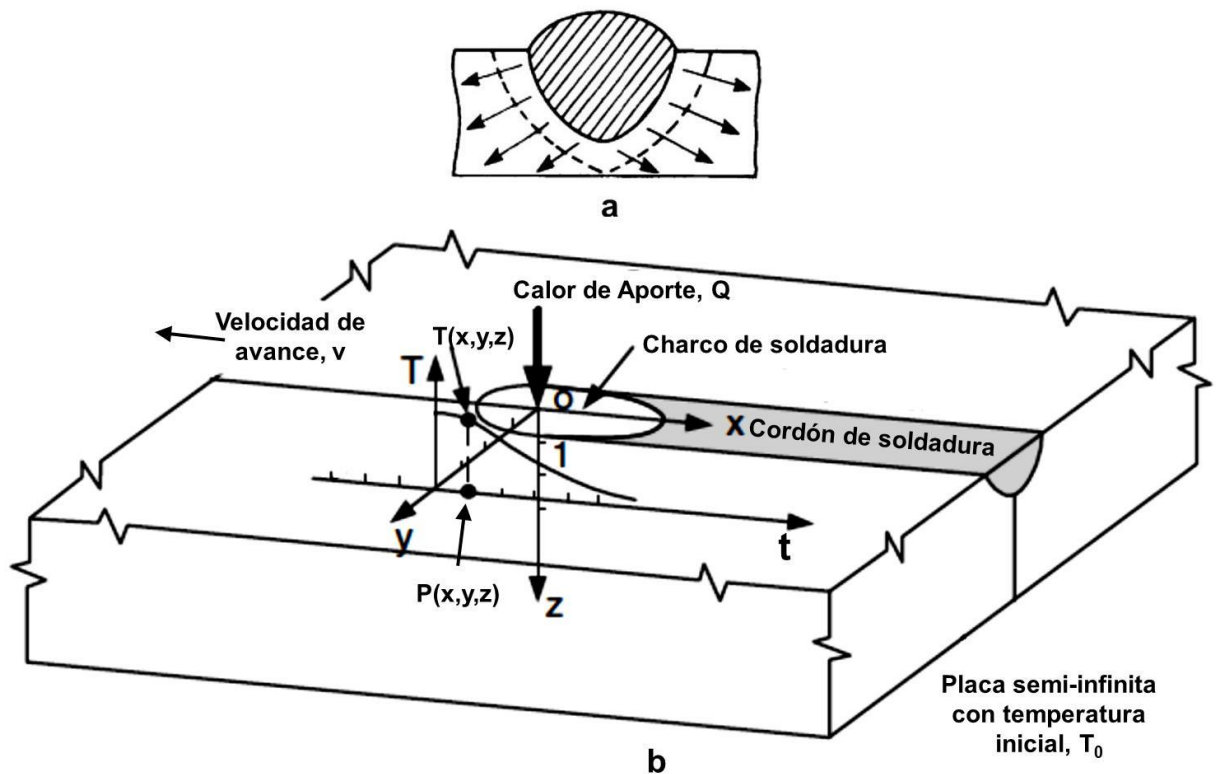
R = distancia radial desde el origen del sistema de coordenadas O , a un punto P .

Esta dado por $R = \sqrt{w^2 + y^2 + z^2}$

$w = x - vt$ (m), donde x es un punto fijo en el metal base medido a lo largo de la soldadura, v es la velocidad de avance y t es el tiempo despues que pasa la fuente de calor.

T = cambio de temperatura obtenida para un punto de análisis dado durante el movimiento de la fuente de calor, en una, dos o tres dimensiones. ($^{\circ}\text{C}$)

Figura 9 a. Representación esquemática de la distribución de calor en placa gruesa. b. Modelo de placa gruesa de la solución de Rosenthal [14]



La ecuación 4 presenta la solución de la distribución de temperaturas para una fuente de calor que se mueve con velocidad constante (v) a lo largo de una placa

delgada de longitud semi-infinita y comportamiento de flujo de calor radial, como se muestra en la Figura 10.

$$T - T_0 = \frac{q_0}{\lambda 2\pi d} \exp\left[\frac{vw}{2\alpha}\right] K_0\left[\frac{rv}{2\alpha}\right] \quad (4)$$

Dónde:

T_0 = Temperatura inicial de la placa ($^{\circ}\text{C}$)

q_0 = Calor transferido de la fuente de calor al metal base ($\text{J}\cdot\text{m}^{-1}$)

λ = conductividad térmica del material ($\text{J}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$)

v = velocidad de avance del proceso de soldadura ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

α = difusividad térmica ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$), calculada como $k/\rho C$

C = calor específico del material ($\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$)

ρ = densidad del material base ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

d = espesor de la placa (m)

K_0 = función modificada de Bessel de segunda clase y orden cero. Ver Figura 11

r = distancia radial desde el origen del sistema de coordenadas O, a un punto P.

Esta dado por $r = \sqrt{w^2 + y^2}$

$w = x - vt$ (m), donde x es un punto fijo en el metal base medido a lo largo de la soldadura, v es la velocidad de avance y t es el tiempo después que pasa la fuente de calor.

T = cambio de temperatura obtenida para un punto de análisis dado durante el movimiento de la fuente de calor, en una, dos o tres dimensiones. ($^{\circ}\text{C}$)

Figura 10 a. Representación esquemática de la distribución de calor en placa delgada. b. solución del modelo de placa delgada propuesto por Rosenthal [14]

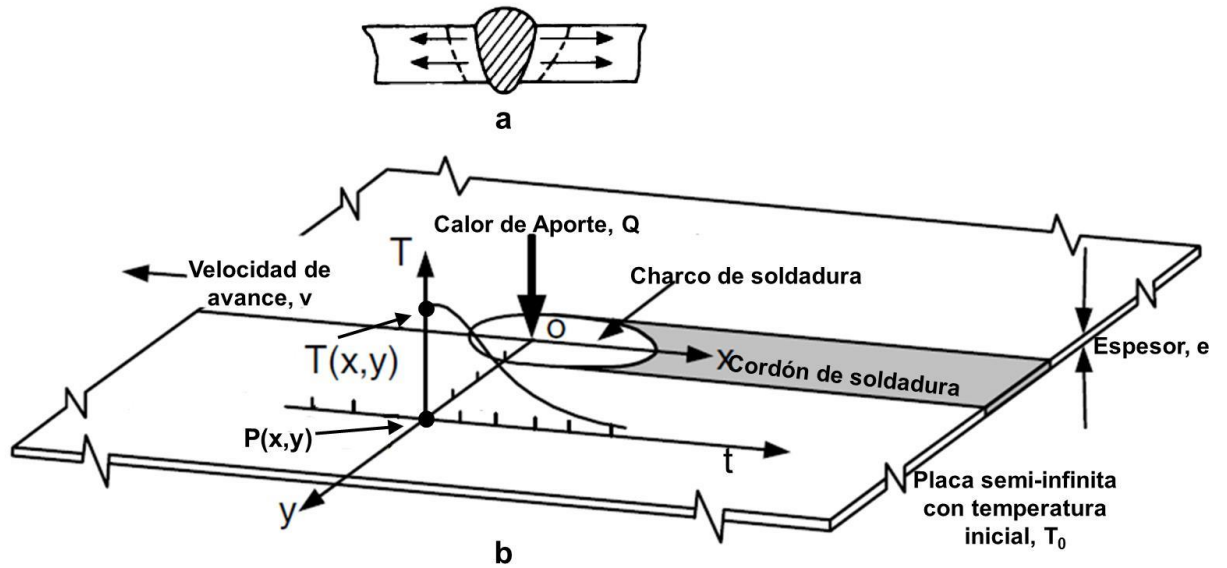
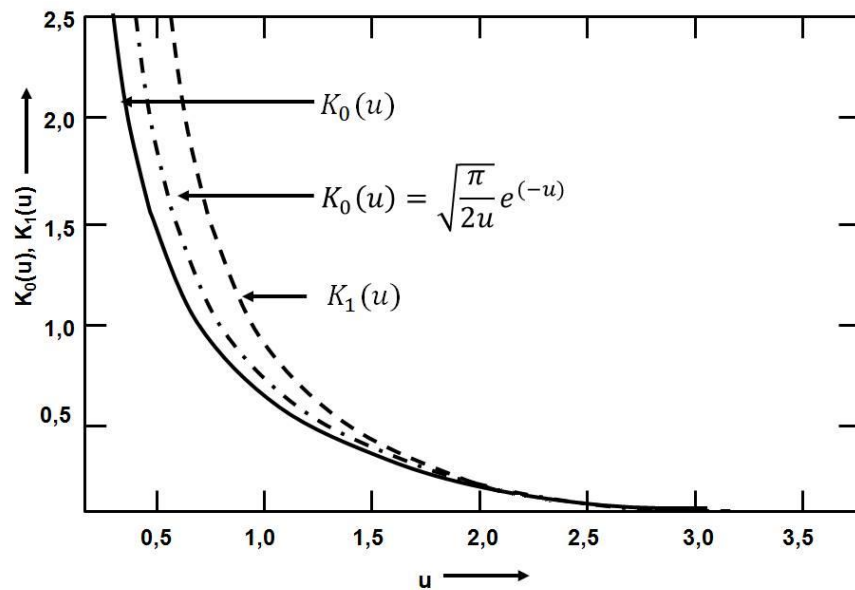


Figura 11 Obtención de la función de Bessel $K_0(u)$ y $K_1(u)$ [15]

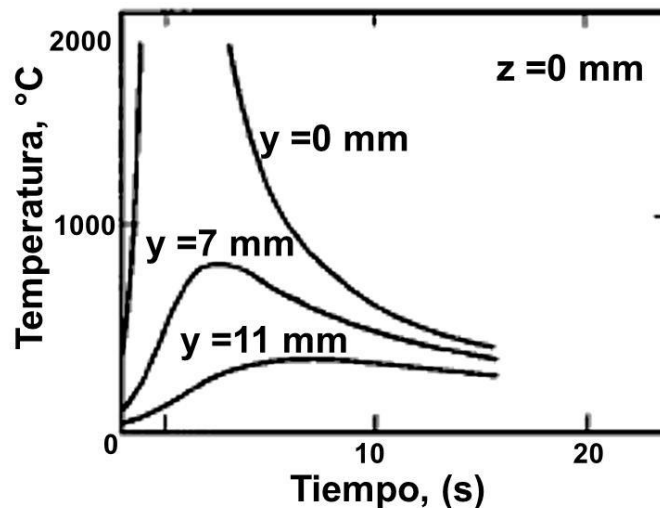


La figura 12 presenta un ejemplo de la obtención del ciclo térmico a través de la solución de Rosenthal para placa gruesa para un acero 1018, para una condición

de velocidad de avance de $2,4 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ y una entrada de calor de 3200 W . estableciendo 3 puntos de medición, un punto ubicado a 0 mm de la fuente calor, un punto ubicado a 7 mm de la fuente de calor y un tercer punto ubicado a 11 mm de la fuente de calor.

Nótese que para puntos cercanos a la fuente de calor las medidas de temperatura son excesivamente altas (para el ejemplo presentado, supera los 2000°C !), esto es debido a un problema de singularidad consecuencia de una se las condiciones establecidas: considerar a la fuente de calor como un punto.

Figura 12 Representación de un ciclo térmico usando la solución de Rosenthal para placa gruesa [14]



De las curvas del ciclo térmico se puede determinar un parámetro asociado al tiempo que demora en descender la temperatura máxima alcanzada a la temperatura de referencia. Este parámetro es conocido como *tasa de enfriamiento*, y es definida como la pendiente de una línea tangente a la curva del ciclo térmico. A través de este parámetro y asociado a la temperatura obtenida en cada zona (perfil de temperatura) se permite predecir el tipo de estructura que se obtendrá en cada una de las zonas afectadas por el calor de la soldadura.

Existen unas ecuaciones que permiten calcular la tasa de enfriamiento para placas gruesas y delgadas. Si, el cálculo es para una placa gruesa y un solo cordón la solución de la tasa de enfriamiento es la presentada en la ecuación 5

$$R = \frac{2\pi k(T_c - T_0)^2}{H_{net}} \quad (5)$$

Dónde:

R= Tasa de enfriamiento desde el centro del cordón de soldadura ($^{\circ}\text{Cs}^{-1}$)

k= La conductividad térmica del material ($\text{Jm}^{-1}\text{s}^{-1}\text{^{\circ}C}^{-1}$)

T_0 =Temperatura inicial de la placa ($^{\circ}\text{C}$)

T_c = Temperatura a la cual la tasa de enfriamiento es calculada ($^{\circ}\text{C}$)

H_{net} = La entrada neta de calor (Jm^{-1})

Para el caso que la solución sea para una placa delgada y un solo cordón de soldadura, el cálculo de la tasa de enfriamiento es el presentado en la ecuación 6

En el caso de placas delgadas, el cálculo de la tasa de enfriamiento es:

$$R = 2\pi k\rho C \left(\frac{d}{H_{net}}\right)^2 (T_c - T_0)^3 \quad (6)$$

Dónde:

d= espesor del material base (m)

ρ = densidad del material base ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

C = calor específico del material base ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{^{\circ}C}^{-1}$)

ρC = Calor específico volumétrico ($\text{J}\cdot\text{m}^{-1}\text{^{\circ}C}^{-1}$)

Adams [17] generó unas ecuaciones para determinar los picos de temperatura considerando como limite la frontera del cordón de soldadura. Se establecieron de igual manera 2 soluciones. Para placa delgada la solución de los picos de temperatura está dada por la ecuación 7

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4,13v \cdot y \cdot d \cdot \rho \cdot C}{q_0} + \frac{1}{T_m - T_0} \quad (7)$$

Dónde:

T_p = la temperatura pico calculada, (°C)

T_0 = la temperatura de referencia, (°C)

T_m = La temperatura de fusión del material base, (°C)

v = velocidad de avance del proceso de soldadura, (m*s⁻¹)

y = referencia de medida transversal al cordón de soldadura, (m)

d = espesor de la placa (m)

C = calor específico del material (W*m⁻³)

ρ = densidad del material base (kg*m⁻³)

q_0 = Calor transferido de la fuente de calor al metal base (J*m⁻¹)

Y la solución de los picos de temperatura se presenta en la ecuación 8

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{5,44\pi \cdot k \cdot \alpha}{q_0 \cdot v} \left[2 + \left(\frac{v \cdot y}{2\alpha} \right)^2 \right] + \frac{1}{T_m - T_0} \quad (8)$$

Dónde:

T_p = la temperatura pico calculada, (°C)

T_0 = la temperatura de referencia, (°C)

T_m = La temperatura de fusión del material base, (°C)

v = velocidad de avance del proceso de soldadura, ($m \cdot s^{-1}$)

y = referencia de medida transversal al cordón de soldadura, (m)

α = difusividad térmica ($m^2 \cdot s^{-1}$), calculada como $k/\rho C$

k = conductividad térmica del material ($J \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot C^{-1}$)

C = calor específico del material ($W \cdot m^{-3}$)

ρ = densidad del material base ($kg \cdot m^{-3}$)

q_0 = Calor transferido de la fuente de calor al metal base ($J \cdot m^{-1}$)

Para el cálculo de ciclos térmicos, tasas de enfriamiento y perfiles de temperatura se ofrecen soluciones para placa gruesa y placa delgada. No obstante, definir el usar uno u otra solución no es tan sencillo. Se estableció un parámetro que permite definir qué tipo de solución usar, este parámetro se conoce como *espesor relativo* [18].

La ecuación 9, presenta el cálculo para el espesor relativo

$$\tau = d \sqrt{\frac{\rho C (T_c - T_0)}{H_{net}}} \quad (9)$$

Dónde:

d = espesor del metal base, (m)

C = calor específico del material ($W \cdot m^{-3}$)

ρ = densidad del material base ($kg \cdot m^{-3}$)

T_0 = Temperatura de referencia, (°C)

T_C = Conjunto de temperaturas que van desde la temperatura de fusión del material base ($^{\circ}\text{C}$)

H_{net} = potencia de entrada del proceso de soldadura dividido por la velocidad de avance, ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}$)

τ = es el espesor relativo, (adimensional)

El espesor relativo τ , será un valor promedio de variar T_C desde la temperatura de fusión hasta T_0 . Si τ es menor a 0,6, entonces la solución es para placa delgada, si τ es mayor a 0,9, entonces la solución es para placa gruesa. Si τ se encuentra en valores intermedios de los 2 rangos, se considera la solución de placa delgada si el valor queda mas cercano a 0,6 o placa gruesa si el valor queda mas cercano a 0,9.

2.1.5 Efectos de la distribución de temperaturas sobre el material soldado

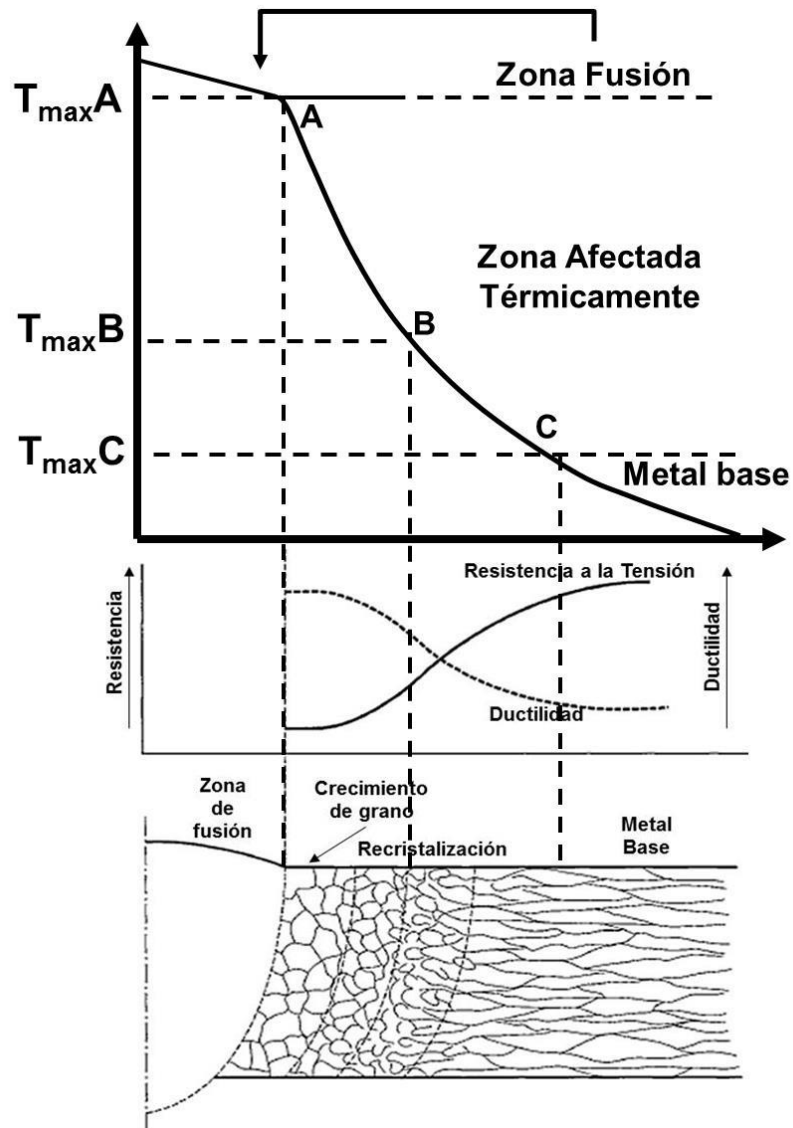
Las zonas formadas por la entrada de calor se mostraron en la Figura 5. Estas zonas como se explicó en una anterior ocasión, son el resultado de la distribución de temperaturas asociadas a la entrada de calor del proceso de soldadura.

La primera región es conocida como la Zona de Fusión (ZF) donde se presenta temperaturas por encima de la temperatura de fusión (en el caso de soldaduras por fusión).

Saliendo de esta región, se establece la Zona Afectada Térmicamente, cuya temperatura obtenida se encuentra por encima de la temperatura ambiente, pero por debajo de solidus.

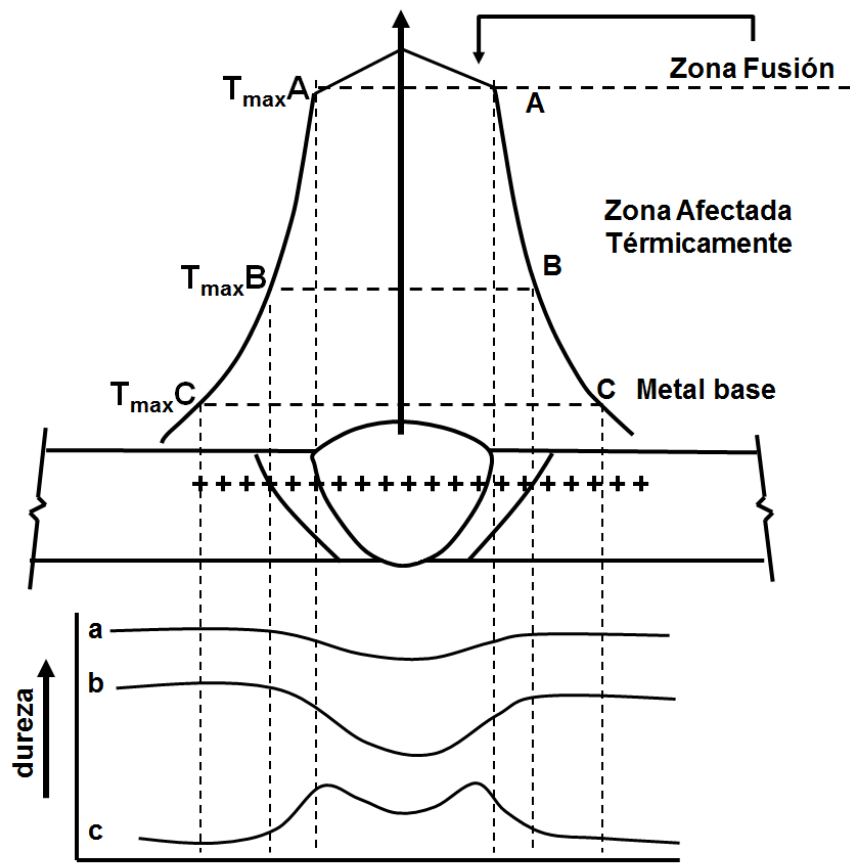
Los cambios microestructurales afectaran directamente los cambios en las propiedades mecánicas. En la Figura 13 se muestra cómo se puede asociar el perfil de temperaturas con los cambios de las propiedades de ductilidad y resistencia a la tensión.

Figura 13 Cambio de la ductilidad y resistencia a la tensión asociadas a la distribución de temperaturas en juntas soldadas [13]



Otras de las propiedades afectadas por los ciclos térmicos, está asociado a la dureza del material, que está en función de los elementos aleantes o no dentro del material base. La Figura 14, presenta los efectos de la dureza en función de la temperatura cuando se suelda con soldadura por fusión para diferentes materiales.

Figura 14 Representación esquemática de diferentes durezas obtenidas por soldadura por fusión para a. Aleación de solución sólida, b. endurecido por precipitación, c. endurecido por transformación [13]



2.2 ESTADO DEL ARTE

La obtención del historial térmico en soldadura se puede realizar a través de soluciones analíticas de ecuaciones que describen la distribución de temperaturas en la placa soldada, ya sea a través de técnicas de simulación por software o de manera experimental a través de montajes instrumentados y equipos que permitan la recolección y tratamientos de datos en tiempo real, tales como sensores de temperatura, termocuplas y sistemas de adquisición de datos.

Djarot et al [19], determinaron el perfil de temperaturas alrededor de una fuente de calor en movimiento usando un método de elementos finitos (MEF), simulando una fuente de calor representada por un punto y por una superficie circular lo cual compararon con un modelo analítico. Para el modelo analítico se basaron en el modelo desarrollado por Rosenthal [9] y ajustado por Carslaw y Jaeger [20].

El modelo desarrollado por el MEF se realizó a través de simulaciones usando el programa de ANSYS® 12.0. El movimiento de la fuente de calor fue simulado usando SOLID70, el cual permite realizar análisis de temperatura creando elementos térmicos. De esta manera, el modelo representativo de la fuente de calor como un punto estuvo constituido de 23328 elementos térmicos y 26011 nodos para describir un bloque de dimensiones de 250mm x 180mm x 90mm.

En el caso de la fuente de calor representada por una superficie circular, las características del modelo fueron modificadas para describir un círculo de 3 mm de radio. El número de elementos térmicos fueron de 37361 con 27042 nodos. Debido al amplio número de elementos creados se requiere de un ordenador de amplia capacidad.

Los parámetros usados para modelar el proceso de soldadura en ambos modelos fueron una tasa de calor de $\dot{q} = 4200 \text{ J*s}^{-1}$, una conductividad térmica de $k = 42 \text{ W*m}^{-1}\text{*}^{\circ}\text{C}^{-1}$, una difusividad térmica = $10 \text{ mm}^2\text{*s}^{-1}$ y velocidad de avance de $v=$

$1\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Las especificaciones del material base y del proceso de soldadura no son presentadas por los autores.

Los resultados de la distribución de temperaturas y perfil de temperaturas obtenidos por el método analítico y el MEF para la fuente de calor por punto se muestran en la Figura 15 y en la Figura 16, respectivamente.

Figura 15. Distribución de temperaturas medidas sobre la línea longitudinal al movimiento de la fuente de calor para el modelo analítico y MEF [19]

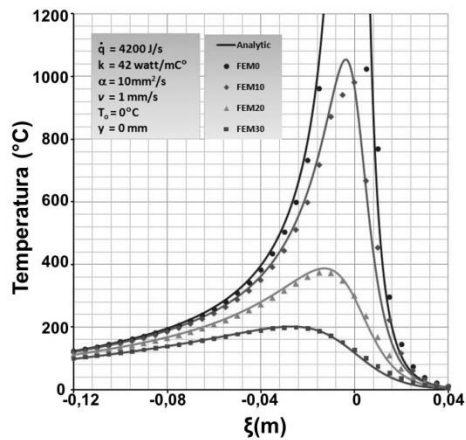
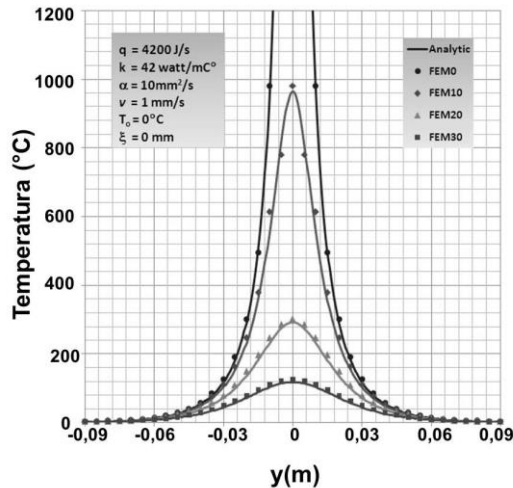


Figura 16 Distribución de temperaturas transversal al movimiento de la fuente de calor para el modelo analítico y MEF [19]



Los resultados de la distribución de temperaturas y perfil de temperaturas obtenidos por el método analítico y el MEF para la fuente de calor descrito como una circunferencia se muestran en la figura 17 y en la figura 18, respectivamente.

Figura 17 Distribución de temperaturas medidas sobre la línea longitudinal al movimiento de la fuente de calor representada por una circunferencia para el modelo analítico y MEF [19]

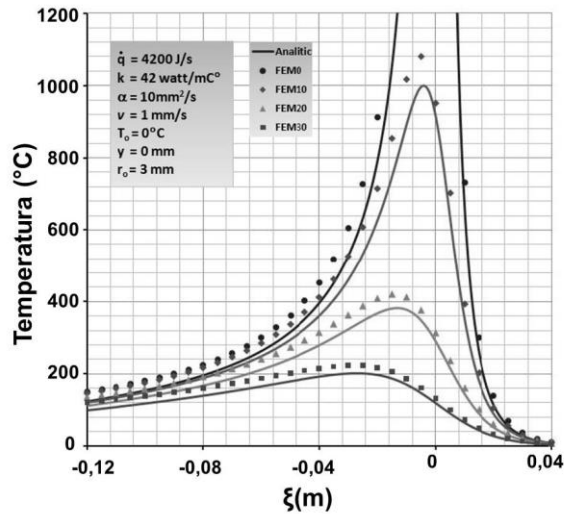
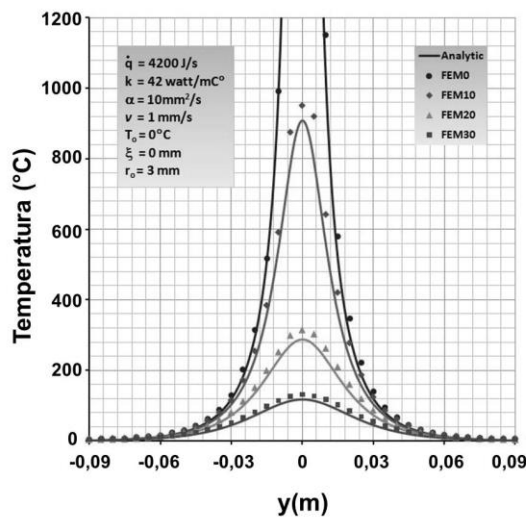


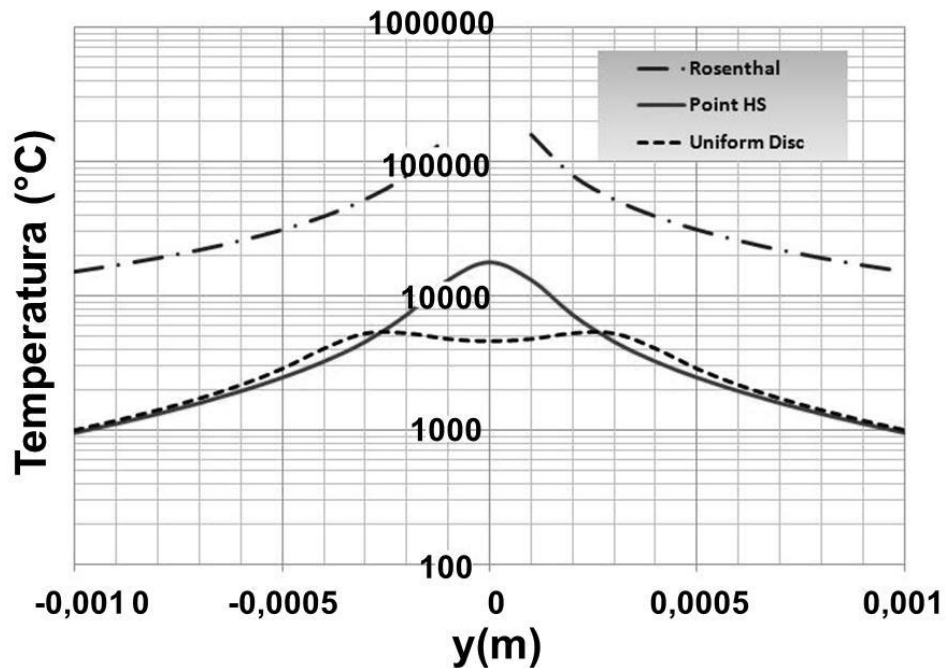
Figura 18 Distribución de temperaturas transversal al movimiento de la fuente de calor para el modelo analítico y MEF [19]



De los resultados de distribución de temperaturas a lo largo del eje de movimiento de la fuente de calor (figura 15 y figura 17) y transversal al eje de movimiento de la

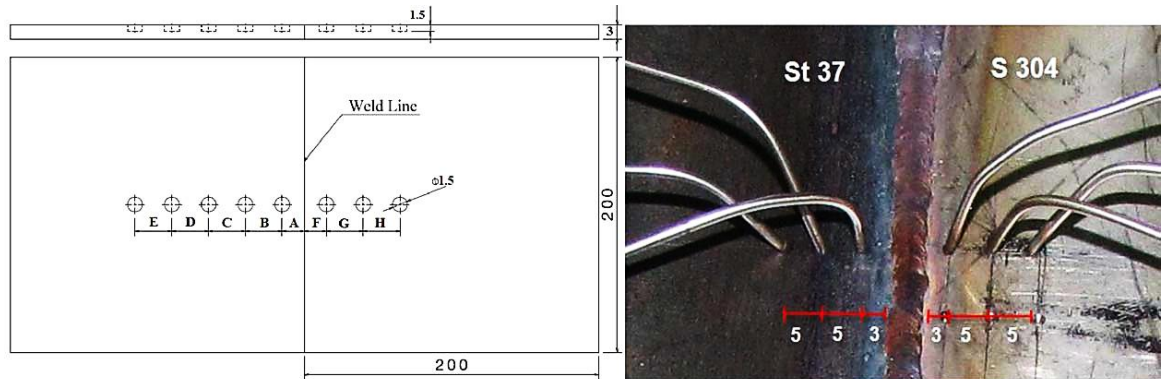
fuente de calor (figura 16 y 18) se muestra como el modelo desarrollo por el MEF se ajusta al modelo analítico, inclusive en puntos cercanos a la fuente de calor, donde existen temperaturas por encima de los 1200 °C. Este incremento de temperatura tiene su origen por el fenómeno de singularidad presente en la solución de Rosenthal como se muestra en la Figura 19.

Figura 19 Distribución de temperaturas medidas en distancias transversales muy cercanas a la fuente de calor [19]



Autores como Attartha et al. [21], desarrollaron un modelo por elementos finitos que les permitió determinar la distribución de temperaturas en la ZAT. Este modelo fue comparado con un experimento donde usaron termocuplas para obtener las temperaturas en materiales base de acero inoxidable AISI 304 y acero al carbono St37, los cuales fueron soldados con proceso GTAW. La configuración de la prueba se realizó para juntas en AISI 304, St37 y junta disímil. La Figura 20 muestra la ubicación de los termopares sobre la junta, las distancias medidas desde la línea de fusión y la configuración de cada junta.

Figura 20 Especificaciones de las juntas soldadas y localización de los termopares en las placas [21]



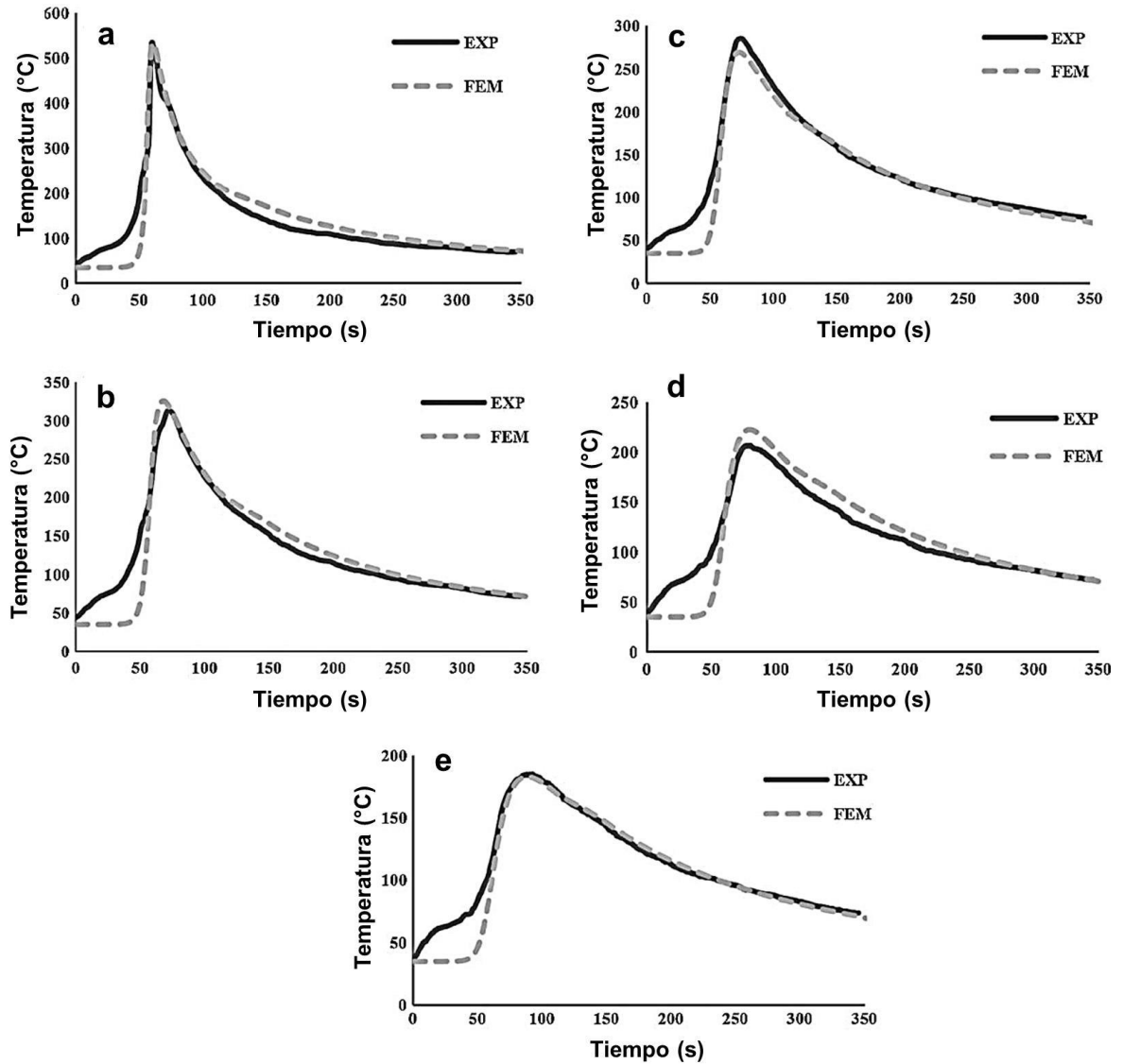
All dimensions are in mm.

Experiments	Thickness (mm)	Left Plate	Right Plate	A	B	C	D	E	F	G	H
E1	3	St37	St37	3	5	5	5	5	2	-	-
E2	3	S304	S304	3	5	5	5	5	2	-	-
E3	3	St37	S304	3	5	5	-	-	3	5	5

El modelo simulado por elementos finitos se desarrolló usando el software ABAQUS®. En la zona de fusión y en su cercanía, usaron una malla fina, que consta de 9999 nodos y 6400 elementos. Para el análisis de elementos térmicos contaron con elementos tipo DC3D8. Las consideraciones del tamaño de malla se realizaron en función del método presentado por Malik et al. [22].

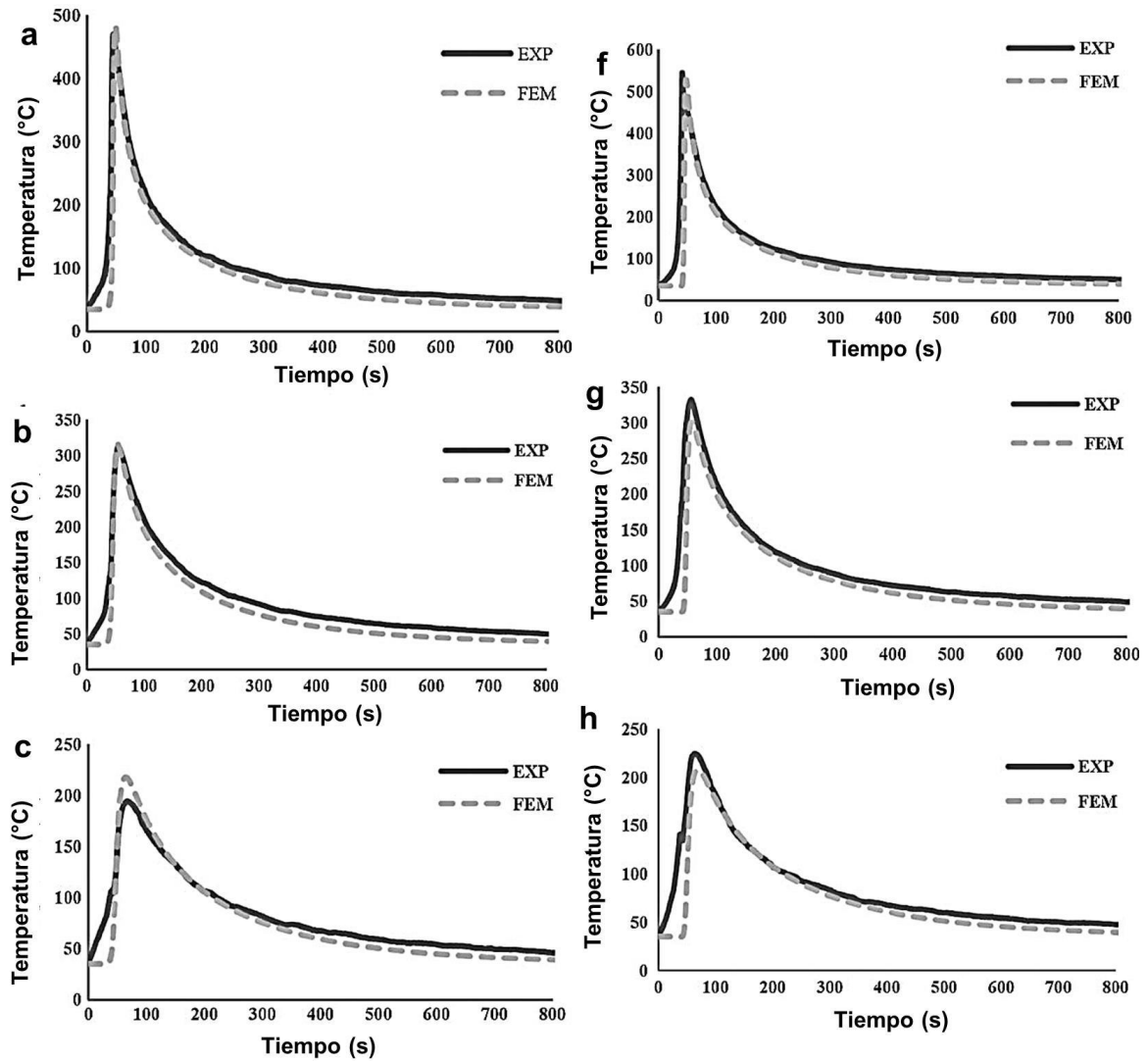
Los resultados obtenidos por el modelo de elementos finitos fueron comparados con los realizados experimentalmente. La Figura 21 muestra los ciclos térmicos obtenidos para la junta soldada de acero al carbono St37. La variación de los ciclos térmicos entre el modelo desarrollado por elementos finitos y el experimento es explicado por los autores por la no linealidad de las propiedades térmicas del material base y la temperatura y la selección del modelo asociado a la fuente de calor.

Figura 21 Comparación de los ciclos térmicos obtenidos por elementos finitos y experimentales para diferentes posiciones medidas desde la línea de fusión. a) 3mm, b) 8mm, c) 13 mm, d) 18, e) 23 mm [21]



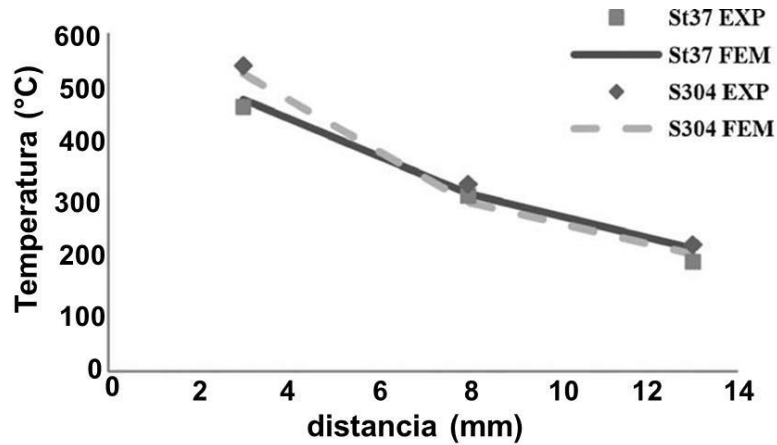
Los resultados obtenidos por el modelo de elementos finitos para la junta disímil fueron comparados con los resultados obtenidos de manera experimental como se muestra en la Figura 22.

Figura 22 Ciclo térmico evaluado para junta disímil. Material base acero al carbono St37: a) 3mm, b) 8mm, c) 13 mm. Material base AISI 304: f) 3mm, g) 8mm y h) 13 mm [21]



De los ciclos térmicos obtenidos compararon los perfiles de temperatura y las tasas de enfriamiento para la junta disímil. Los resultados son presentados en la Figura 23. Las diferencias de los perfiles de temperatura entre ambos materiales fueron asociadas a las propiedades térmicas del material, haciendo énfasis en la conductividad térmica.

Figura 23 Picos de temperatura medidos desde el centro del cordón de soldadura para la junta disímil [21]



La obtención de los ciclos térmicos por medio de herramientas computacionales exige un manejo especializado de programas de desarrollo de elementos finitos y una capacidad alta de cómputo para obtener soluciones de los modelos desarrollados, como se presentaron en las referencias anteriores.

Autores como Fassani et al. [23] usan modelos analíticos para obtener los ciclos térmicos en juntas soldadas. El modelo desarrollado permite estimar la distribución de temperaturas presentes en soldadura al arco eléctrico GMAW con múltiples cordones. Usando un modelo de distribución Gaussiano para definir la fuente de calor y la distribución de temperaturas para el primer cordón de soldadura. El modelo de distribución Gaussiano será comparado con modelos analíticos que definen a la fuente de calor como un punto.

El comportamiento de la distribución Gaussiana en un tiempo inicial $t = 0$, cuando el centro C coincide con el origen del sistema coordenado XYZ en la superficie de la placa como se muestra en la Figura 24. La potencia total de la fuente de calor se calcula de acuerdo a la ecuación 10.

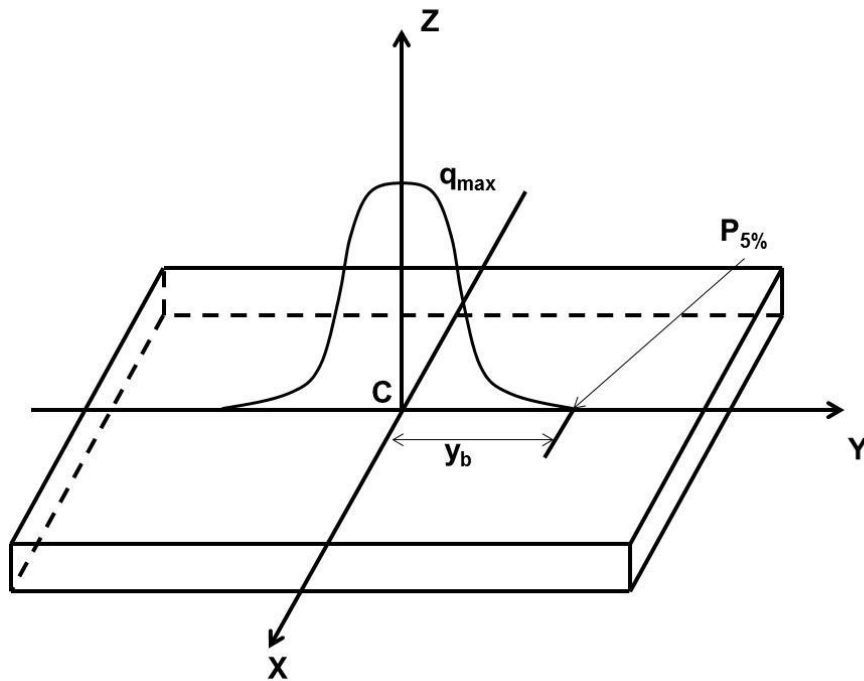
$$Q = \int_{-\infty}^{\infty} q_s(y) dy \quad (10)$$

Dónde:

q_s = potencia de la fuente por unidad de longitud ($W \cdot m^{-1}$)

Q = Potencia total de la fuente de calor (W)

Figura 24 Representación esquemática de fuente de calor Gaussiana sobre geometría de la junta soldada. [23]



La potencia calculada para el análisis en una sola dimensión (a lo largo del eje y), la potencia $q_s(y)$ se expresa como lo indica en la ecuación 11:

$$q_s(y) = q_{max} e^{-Ay^2} \quad (11)$$

Dónde:

q_{max} = q_s valor máximo ($W \cdot m^{-1}$)

A = coeficiente de concentración de arco (m^{-1})

El valor de A esta en función de un parámetro denominado y_b (como se mostró en la figura 24), el cual corresponde a la distancia medida desde el origen del sistema C hasta el punto donde la potencia es reducida al 5% de su valor máximo $P_{5\%}$. La importancia del parámetro y_b es que permite definir puntos de análisis cercanos a la línea de fusión. Para definir la distribución de temperaturas en la segunda pasada contaron con una solución presentada por el autor Suzuki [24].

Las condiciones para la comparación del modelo analítico desarrollado y el modelo analítico puntual se consideró una junta a tope de material de acero de baja aleación y alta resistencia (HSLA por sus siglas en ingles) de dimensiones 0,13 x 0,10 x 0,25 m (espesor x longitud x ancho). Las propiedades del material base son presentadas en la Tabla 3. Los parámetros de soldadura como el voltaje (V), la intensidad (I), la velocidad de avance v , la eficiencia del proceso de soldadura GMAW y la entrada de calor (EC) son presentados en la Tabla 4 para las diferentes pasadas.

Tabla 3 propiedades físicas del acero bajo carbono [25]

Conductividad térmica	Calor específico volumétrico	Difusividad térmica
$k \text{ (J}^*m^{-1}*s^{-1}*^{\circ}C^{-1})$	$\rho C \text{ (J}^*m^{-3}*^{\circ}C^{-1})$	$\alpha \text{ (m}^2*s^{-1})$
31,67	$7,14 \times 10^6$	$4,44 \times 10^{-6}$

Tabla 4 Parámetros de soldadura usados para las 3 pasadas [23]

Pasada	I(A)	V(V)	$V(m*s^{-1})$	η (%)	EC(x106 J*m-1)
1	186	26,4	0.005	80	0,79
2	235	26,2		75	0,92
3	301	25,4		70	1,07

Para la obtención de los ciclos térmicos, se definieron unas distancias (y) en el metal base, que fueron medidas transversalmente al sentido de avance del cordón de soldadura. Para el caso del parámetro y_b se seleccionaron los valores basados en las referencias [26], [27] y [28] como se muestra en la Tabla 5 y en función de los parámetros de entrada de calor usado para la comparación del modelo analítico Gaussiano y el modelo analítico puntual. De esta manera, los valores de y_b seleccionados para cada pasada son presentados en la Tabla 6.

Tabla 5 entradas de calor y valores de y_b basados en revisión bibliográfica [23]

Autores	I (A)	V(V)	v ($m*s^{-1}$)	HI ($x106J*m^{-1}$)	$y_b(m)$
Kou y Wang [26]	100	11	0,0055	0,20	0,003
Zacharia et al. [27]	175	14	0,0034	0,72	0,003
Wu [28]	200	20	0,01	0,40	0,002

Tabla 6 Valores del parámetro y_b para cada pasada

Pasada	y_b (m)
1	0,004
2	0,0047
3	0,0054

Los resultados de los ciclos térmicos obtenidos por el modelo Gaussiano y el modelo puntual para una distancia y de $1x10^{-3}$ m medida desde la línea de fusión son mostrados en la Figura 25. Para una distancia y de $3x10^{-3}$ m medido desde el centro del cordón de soldadura los resultados de los ciclos térmicos son mostrados en la Figura 26.

Figura 25 Ciclos térmicos para el modelado de la fuente de calor puntual y Gaussiana, para un $y = 1 \times 10^{-3}$ m [23]

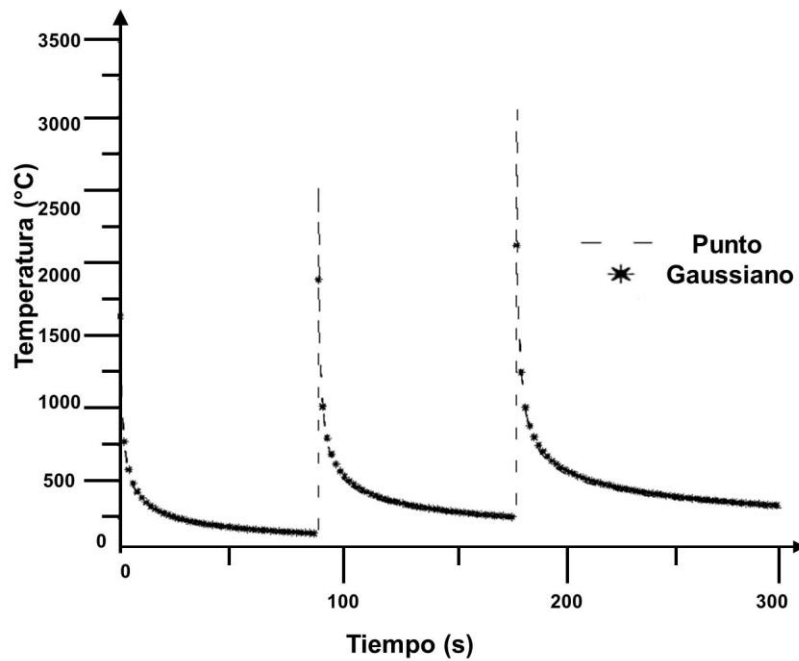
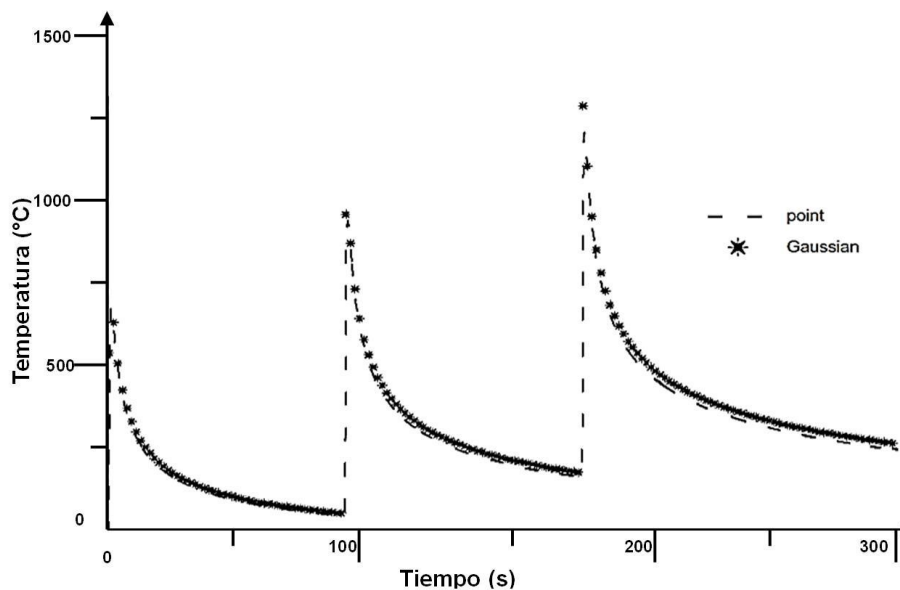


Figura 26 Ciclo térmico para el modelado de la fuente de calor puntual y Gaussiano, para un $y = 3 \times 10^{-3}$ m [23]



El modelo analítico Gaussiano presentado para valores más cercanos a la fuente de calor temperaturas cercanas a la temperatura de fusión del material base. En la

Tabla 7 se presenta los picos de temperatura alcanzados por el modelo Gaussiano y el modelo puntual los resultados obtenidos de $y = 1 \times 10^{-3}$ m

Tabla 7 Picos de temperatura alcanzados para cada pasada de soldadura [23]

Picos de temperatura	Fuente de calor puntual	Fuente de calor Gaussiana
T_1	2057,52	1632,28
T_2	2535,16	1881,01
T_3	3044,18	2115,27

La consideración de la fuente de calor Gaussiano y en conjunto con el parámetro y_b permitió corregir el error de singularidad presente en el modelo de fuente de calor puntual, obteniendo de esta manera temperaturas más reales y cercanas para puntos de análisis próximos a la línea de fusión.

Poorhaydari *et. al.* [29] desarrollaron un modelo analítico basados en la solución presentada por Rosenthal. El objetivo es determinar la tasa de enfriamiento en una sección de la placa soldada. Para esto, se desarrolló un modelo analítico basado en un factor de ponderación entre las soluciones de placa gruesa y placa delgada presentadas por Rosenthal.

Los resultados presentados por el modelo fueron comparados con un experimento usando termopares como elementos de medición y un sistema de adquisición de datos para recolectar los datos de temperatura en la junta soldada. El material base es un acero microaleado (con 0.08% C y microaleado principalmente con Ti, Nb y V) y usando GTAW como proceso de soldadura. Se usaron 3 diferentes entradas de calor. Los valores de las entradas de calor son $0,50 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$, $1,50 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$ y $2,50 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$.

Los resultados de los ciclos térmicos obtenidos para las diferentes entradas de calor se presentan en la Figura 27. Nótese, que entre menor sea la entrada de calor mayor es la velocidad de descenso de temperatura. Con base a los ciclos térmicos obtenidos se determinaron las tasas de enfriamiento para el modelo

analítico desarrollado y las soluciones de Rosenthal para un intervalo de medida de 800°C a 500°C como se muestra en la Tabla 8.

Figura 27 Ciclo térmico medido en la ZAT cercano a la interfase de la soldadura para entradas de calor de 0,5; 1,5 y 25 kJ*mm⁻¹ [29]

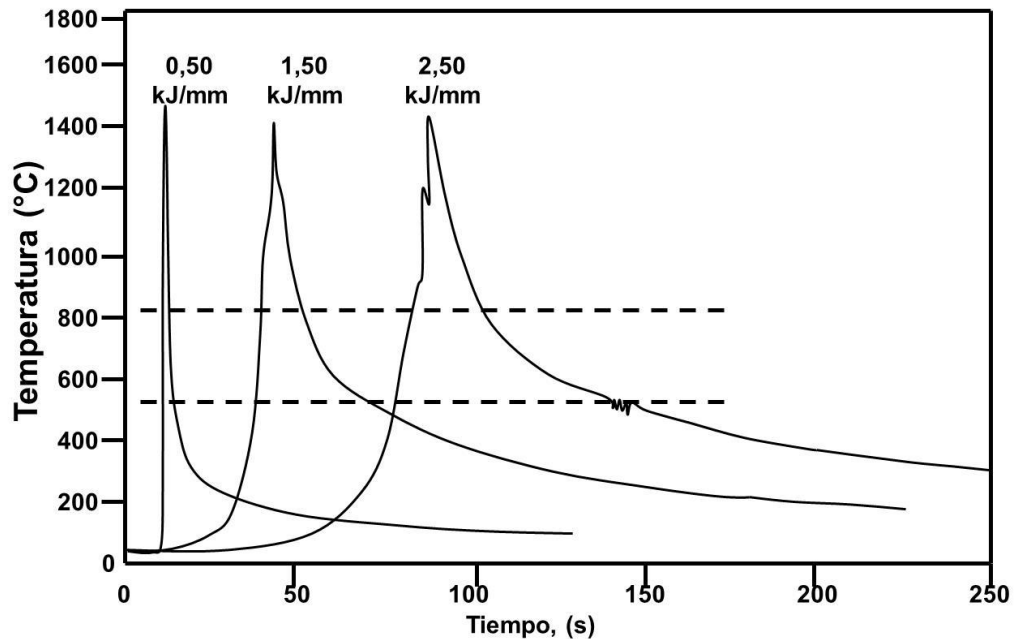


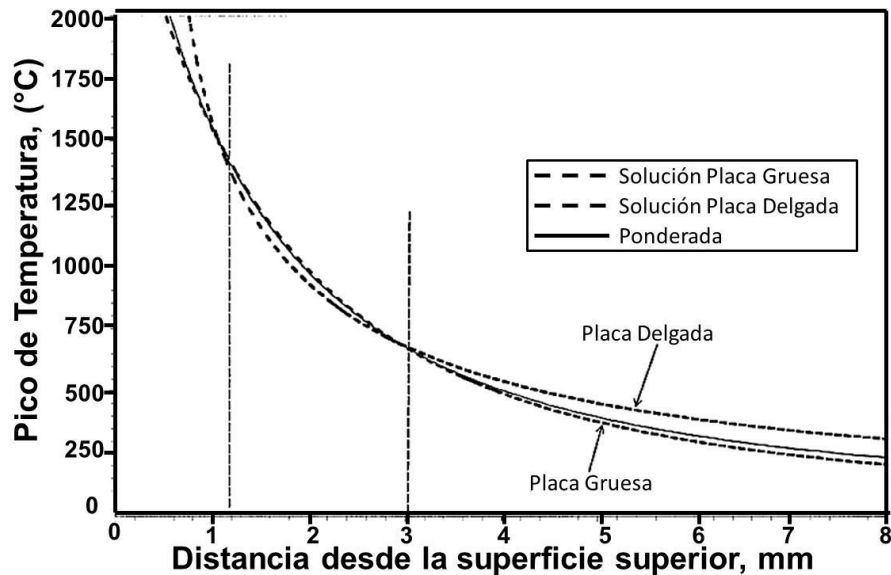
Tabla 8 Tiempo de enfriamiento y tasa de enfriamiento desde los 800°C a 500°C, para 3 muestras de soldaduras [29]

Entrada de calor nominal (kJmm ⁻¹)	Tiempo de Enfriamiento (800 – 500°C), s				Tasa de Enfriamiento, °Cs ⁻¹	
	Solución placa gruesa	Solución placa delgada	Solución Estimada	Medida	Solución estimada	Medida
0,5	1,2	2,6	1,7	1,8±0,1	178,8	171±6,2
1,5	3,6	23,6	14,8	17,2±1,5	20,2	16,8±1,2
2,5	5,9	65,6	38,6	37,7±10,1	7,8	8±2,9

El perfil de temperatura obtenido por el modelo con factor de ponderación desarrollado fue comparado con los perfiles obtenidos por las dos soluciones de Rosenthal como se muestra en la Figura 28. La entrada de calor analizada fue la

de $0,5 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$ y todas fueron analizadas en la zona afectada térmicamente. El modelo desarrollado presento un comportamiento similar y muy cercano a la solución de placa gruesa.

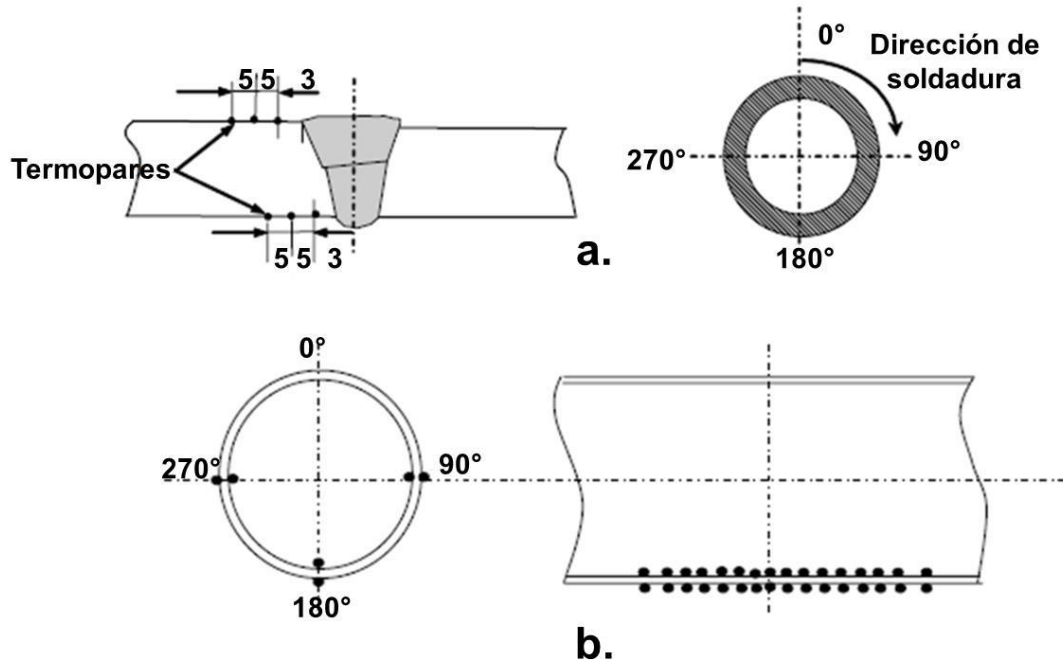
Figura 28 Perfil de temperaturas para 3 soluciones con una entrada de calor de $0,5 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$. [29]



Es a través del historial térmico que se permite establecer los efectos de la temperatura sobre la junta soldada afectando las propiedades mecánicas. Deng et al [30], desarrollaron dos modelos computacionales en 2D y 3D basados en el método de elementos finitos para determinar los ciclos térmicos y los esfuerzos residuales en la junta soldada.

Para la validación de los modelos computacionales en 2D y 3D se usaron termopares para la medición de las temperaturas y galgas extensiométricas para medir la deformación en la junta soldada. Las galgas y los termopares fueron ubicados en una tubería de acero inoxidable 304 de 6 mm de espesor y 800 mm de longitud como se muestra en la Figura 29. El proceso de soldadura usado fue GTAW y el número de cordones realizados fueron 2.

Figura 29 a). Ubicación de los termopares sobre la tubería de acero inoxidable. b). Ubicación de las galgas extensiométricas sobre la tubería de acero inoxidable. [30]



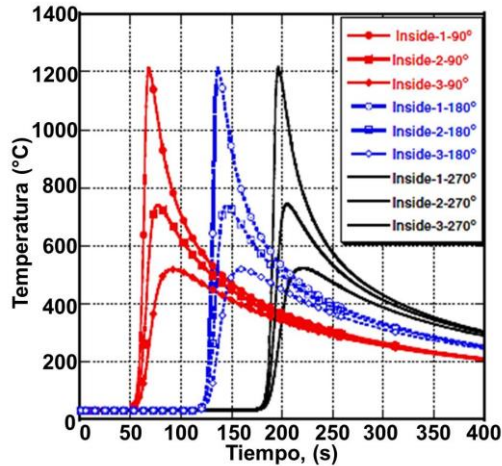
Los modelos en 2D y 3D fueron desarrollados usando un código en el programa ABAQUS los cuales estuvieron basados en las condiciones presentadas por Goldak [31].

Para el modelo simulado en 3D el análisis en elementos finitos conto con 9600 elementos y 12300 nodos. En la zona soldada la malla fue más fina. El elemento más pequeño es 1,5 x 1,5 x 5,3 mm. Las dimensiones del modelo de la tubería fueron de 400 mm de longitud, diámetro externo de 114,3 mm y un espesor de 6 mm. Para el modelo simulado en 2D se contó con un número de elementos creados de 300 y un número de nodos de 357. En la zona de fusión el tamaño mínimo de malla es de 0,5 mm x 1 mm.

Los ciclos térmicos por el modelo 3D desarrollado muestra una estabilidad de las temperaturas alcanzadas para una ubicación de 90°, 180° y 270°. Los resultados

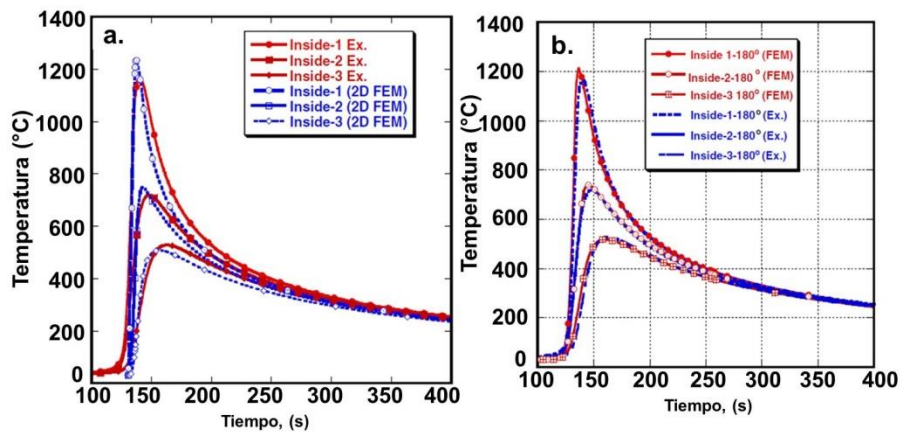
se muestran en la Figura 30. La razón de esto se debe a que la velocidad de soldadura es mucho mayor que tasa de conducción de calor, explican los autores.

Figura 30 Ciclos térmicos obtenidos a diferentes posiciones dentro de la tubería para la primera soldadura [30]



Los resultados de los modelos computacionales desarrollados en 2D y 3D son mostrados en la Figura 31 y son comparables con los resultados obtenidos experimentalmente. De esta manera, establecen que la mejor opción para simular es el modelo en 2D, debido al ahorro de procesamiento de datos computacionales.

Figura 31 Comparación ciclos térmicos modelos a). 2D y experimental, b) 3D y experimental [30]



Las temperaturas obtenidas durante la soldadura para el punto cercano a la zona de fusión en la superficie interna registraron temperaturas superiores a 1000°C mientras se generaba la soldadura por la parte externa de la tubería. Por tal motivo, la deformación plástica es más propensa a producirse en toda la sección transversal de la zona fundida y zonas cercanas en el momento de generar la segunda soldadura.

De esta manera, las investigaciones presentadas demuestran la importancia del estudio de los ciclos térmicos asociados a los procesos de soldadura. Sin embargo, la obtención de estos ciclos térmicos a través de programas especializados requiere de altos nivel de cómputo, altas exigencias computacionales de hardware y software y altos tiempos de espera para la obtención de los resultados. Por tal motivo, en este trabajo se pretende desarrollar un programa que permita la obtención de los ciclos térmicos de manera inmediata, con baja exigencia computacional y con una alta confiabilidad de los resultados.

3. DISEÑO METODOLOGICO

La Tabla 9 muestra el desarrollo de las actividades para la obtención de los ciclos térmicos experimentales y por el modelo desarrollado al igual que el análisis de resultados.

Tabla 9 Plan del desarrollo metodológico

Paso Metodológico 1: Selección de materiales, equipos de soldadura, sistema de medición de temperaturas para obtención experimental de ciclos térmicos
Actividades
<ul style="list-style-type: none"> • Selección de los materiales base, propiedades y dimensiones • Preparación de las juntas • Selección de los procesos de soldadura al arco • Selección de los sensores de medición de temperatura • Selección de equipos para traducir la señal de los sensores • Presentación de los ciclos térmicos obtenidos por los experimentos
Paso Metodológico 2: Parámetros y condiciones de frontera del modelo desarrollado para obtención de ciclos térmicos
Actividades
<ul style="list-style-type: none"> • Revisión bibliográfica de modelos existentes para obtención de la distribución de temperaturas en soldadura por arco eléctrico • Identificación de los parámetros y condiciones de frontera para la solución del modelo • Selección de programa para generar el algoritmo • Selección del programa para creación de la interfaz grafica • Presentación de los ciclos térmicos obtenidos por el modelo desarrollado • Presentación de la subrutina e interfaz gráfica del programa
Paso Metodológico 3: Evaluación y validación experimental
Actividades
<ul style="list-style-type: none"> • Comparación y análisis de resultados de los ciclos térmicos del modelo desarrollado y el experimento • Análisis estadístico de resultados del modelo desarrollado comparado con modelos de otros autores

3.1 Selección de materiales, equipos de soldadura y sistema de medición de temperaturas para obtención de ciclos térmicos

3.1.1 Materiales y equipos para soldadura

Se usará el desarrollo experimental de 2 proyectos de investigación:

- Efecto De Los Ciclos Térmicos Sobre La Microestructura De La Zona Afectada Térmicamente De Juntas Soldadas De Aceros Inoxidables Disímiles Obtenidas Por El Proceso SMAW [32].
- Influencia del Aporte Térmico en la Soldabilidad de la Aleación AA5083 – H 116 con Proceso GMAW-P automatizado [33].

La Tabla 10 presenta los materiales usados para cada proyecto, el espesor de la placa, el tipo de proceso de soldadura, el tipo de placa y preparación de junta.

Tabla 10 descripción de los materiales base, tipo de bisel, espesor de placa y proceso de soldadura

Ref.	Material Base	Proceso de Soldadura	Placa	Tipo de junta y Bisel	Espesor
[33]	AA 5083-H 116	GMAW-P	Rectangular	A tope, en V	5 mm
[32]	Acero AISI 430	SMAW Disímil	Rectangular	A tope, en V	4,3 mm
	Acero AISI 316L				

Las propiedades de los materiales para cada una de las referencias son presentadas en la Tabla 11. Estos parámetros son importantes ya que alimentan el modelo de distribución de calor implementado en este trabajo.

Tabla 11 Propiedades térmicas de los materiales base [34]

Material Base	D*-kg/m ³	CT+ Wm ⁻¹ °C ⁻¹	DT**-m ² s ⁻¹	CCV ** (Jm ⁻³ °C ⁻¹)	TF (°C)
AA 5083-H 116	2660	117	4,8872x10 ⁻⁵	2394000	638
Acero AISI 430	7800	24,9	6,9398x10 ⁻⁶	3588000	1510
Acero AISI 316L	8000	15,9	3,9750x10 ⁻⁶	4000000	1400

*D=densidad, +CT=Conductividad Térmica, **DT = Difusividad Térmica, **CCV = Capacidad Calorífica Volumétrica, TF=Temperatura de fusión

Las dimensiones de los materiales base así como la preparación de la junta se muestra a detalle en la Tabla 12. Las perforaciones presentes en el material base es donde se alojan los termopares. Detalles de la ubicación de los termopares para cada material base se presentan en la Tabla 13. La profundidad de las perforaciones para los 3 materiales se realizó a la mitad del espesor. Para fijar los termopares al material base se contó con un cemento refractario el cual fue distribuido por el mismo fabricante.

Tabla 12 Dimensiones de la placa y preparación de junta para los materiales base

Material base	Dimensiones de la placa (mm)	Preparación de junta (mm)
AA 5083-H 116		
AISI 430 – AISI 316L		

Tabla 13 Dimensiones de los termopares sobre el material base

Material base	Detalle de ubicación de los termopares (mm)
AA 5083 – H116	
AISI 430 – AISI 316L	

Se tuvo presente que una vez soldado se realizó cálculos de dilución para determinar las distancias de las perforaciones de los termopares una vez se soldó. Los equipos para los procesos de soldadura GMAW-P y SMAW, el tipo de electrodo y protección por gases para generar las juntas soldadas son presentados en la Tabla 14.

Tabla 14 Equipos de soldadura, electrodo y gas de protección usado para generar las juntas de soldadura

Material base	Equipo de soldadura	Electrodo	Proceso/Gas de protección
AA5083 – H116	Miller® S-74 MPa Plus	ER-5083	GMAW-P / Ar, He, O ₂
AISI 430 – AISI 316L	Lincoln® Rx 450	E-309 / E-2205	SMAW / NA

De las pruebas realizadas para el material base AA5083 H-116 se muestra en la Figura 32 el montaje del SAD y los termopares. La ubicación de los termopares es presentada en la Figura 33. Los números representan la ubicación de los termopares en el SAD. 1 y 2 representan los termopares más cercanos a la línea de fusión y en ese sentido se van alejando. El termopar 7 corresponde al termopar más alejado de la fuente de calor.

El montaje completo del experimento incluyendo el equipo de soldadura es mostrado en la Figura 34. Para el experimento con el material base AA 5083 H-116, se contó con un sistema *Rayl Track* como herramienta para realizar el proceso de soldadura y controlar la velocidad de avance. De esta manera, se logró automatizar el proceso de soldadura GMAW-P.

Figura 32 Montaje del sistema de adquisición de datos

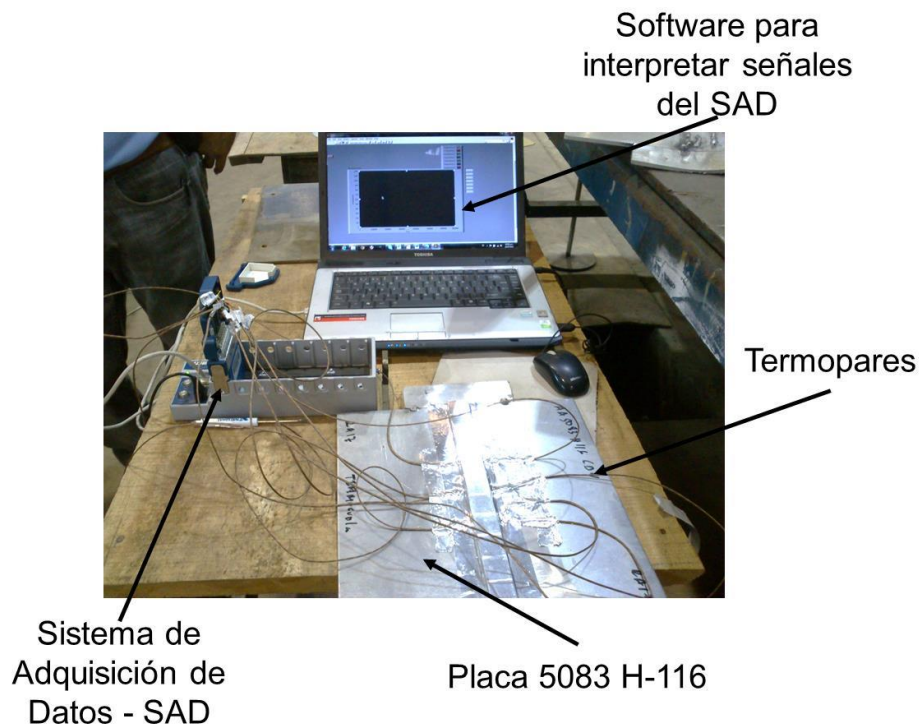


Figura 33 Ubicación de los termopares en el material base

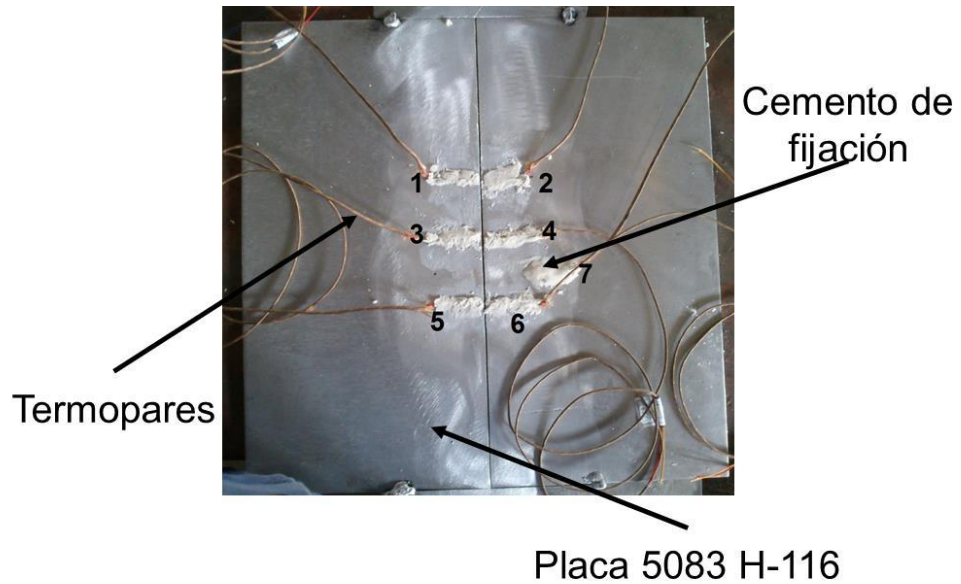
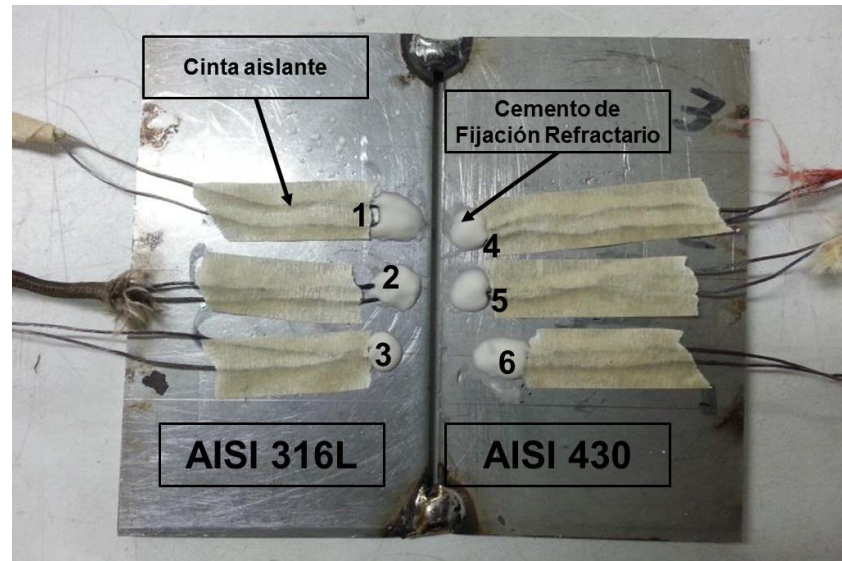


Figura 34 Montaje del experimento para el material base AA5083 H-116



La **Figura 35** muestra el montaje de los termopares sobre los materiales base AISI 430 y AISI 316L. La fijación de los termopares se realizó con la ayuda del cemento refractario. Se usó cinta aislante para fijar el termopar durante el secado del cemento refractario y evitar el contacto entre los alambres desnudos.

Figura 35 Fijación de los termopares sobre el material base



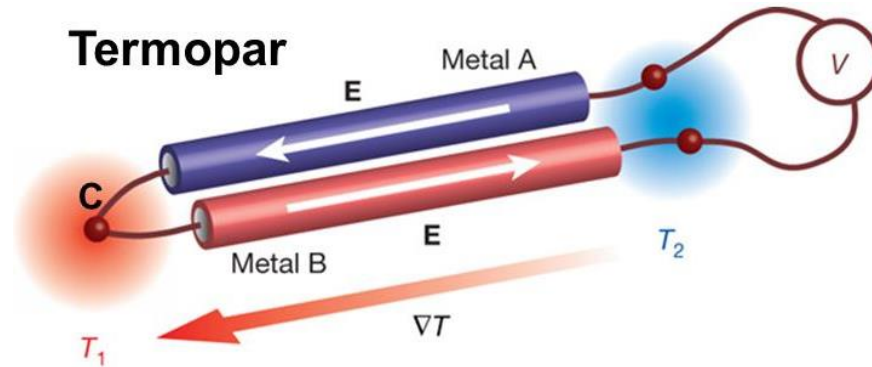
3.1.2 Sensores y equipos de medición de temperatura

Los elementos necesarios para determinar la distribución de temperaturas en la junta soldada para el desarrollo experimental son: los termopares y un sistema de adquisición de datos (SAD).

Los termopares son sensores que funcionan a través del *efecto seebeck*, donde en un circuito formado por dos metales (metal A y metal B) circula por ellos una corriente eléctrica debido al calentamiento de su punto común C, como se muestra en la Figura 36. La gran variedad de presentaciones de los termopares, la alta sensibilidad (hasta $68\mu V^{\circ}C^{-1}$), fácil uso, los variados intervalos de temperatura que ofrece, las respuestas que llegan a centésimas de segundo, lo hacen uno de los sensores de temperatura frecuentemente usados por la industrial y a nivel científico [35].

Por esto, y basado en la revisión bibliográfica presentada en el estado del arte [21, 29, 30], los termopares son los elementos usados para la tarea de adquirir la señal de temperatura durante el experimento.

Figura 36 Funcionamiento de un termopar a través del efecto Seebeck [36]

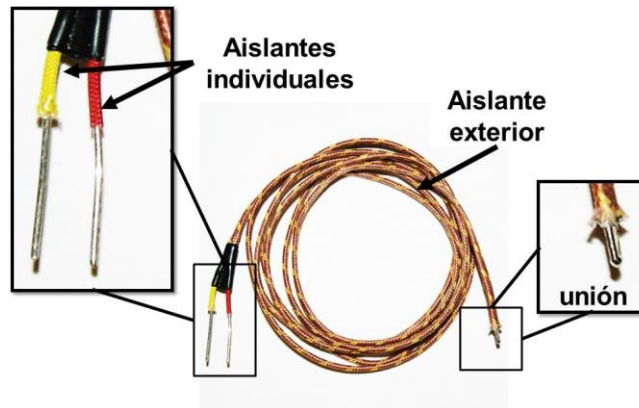


Se usaran termopares tipo k Níquel-Cromo (+) Níquel –Aluminio (-), el cual tiene un intervalo de medidas entre $-200 - 1370$ °C según fabricante. Los cables que constituyen al termopar son de calibre 24 y se encuentran aislados de manera individual y cuentan con un aislante exterior que permite cubrirlos a ambos de condiciones externas, tales como campos electromagnéticos. El aislante exterior es de fibra de vidrio flexible para que pueda ser manipulado con total libertad. La presentación real de un termopar es mostrada en la Figura 37.

La extensión del termopar es de 1 m de largo, para mantener la distancia entre el SAD y el proceso de soldadura. Además, evita que el usuario manipulador del SAD este muy cerca del proceso de soldadura.

Se realizará una prueba de calibración que consistirá en medir usando una pinza voltiamperimetrica el voltaje del termopar mientras se encuentra sensando una serie de valores de temperatura (200°C , 400°C , 600°C , 800°C y 1000°C). Los voltajes obtenidos serán comparados con los ofrecidos por el fabricante. Se graficara los valores de voltaje obtenidos experimentalmente con los voltajes presentado por la referencia [37] para determinar la relación de ajuste.

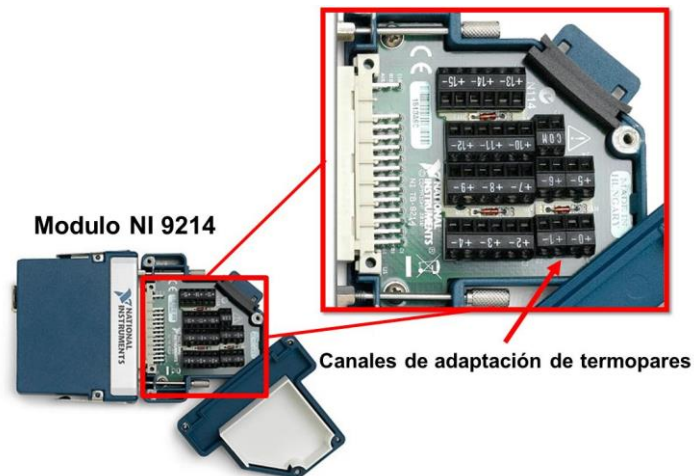
Figura 37 Representación real de un termopar [38]



El programa de ingeniería mecánica de la Universidad Autónoma del Caribe cuenta con un sistema de Adquisición de Datos financiado para el proyecto interno *Diseño, Montaje e Implementación de un Dispositivo para Medida de Temperatura Durante el Procesamiento de Materiales Basado en la Técnica de Adquisición de Datos en Tiempo Real (ADQ)* registrado bajo CONV- I – 004 – P010.

El SAD cuenta con un módulo y un chasis que permiten traducir la señal registrada por los termopares. El módulo NI9214 de la marca National Instrument, es un módulo que contiene 16 canales de entradas de termopares y soporta termopares J, K, T, E, N, B, R y S. Cuenta con 16 canales. La Figura 38 muestra el módulo de termopares y la apreciación interna del módulo para la conexión de los sensores.

Figura 38 Modulo NI9214 para conexión de termopares [39]



El módulo NI9214 funciona con un chasis de referencia cDAQ-9188, el cual permite la ejecución de manera simultánea de siete operaciones de E/S analógica temporizada por hardware, permite medir hasta 256 canales de señales eléctricas, físicas, mecánicas o acústicas. EL esquema del chasis cDAQ-9188 es presentado en la Figura 39.

Figura 39 Chasis de acople de módulo de termopares [40]

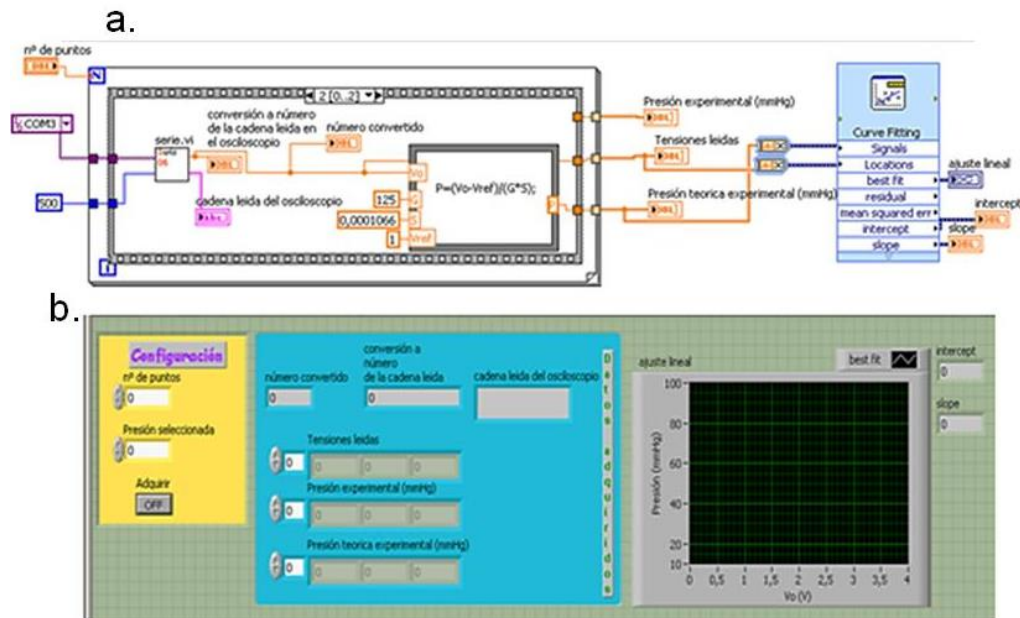


El software de LabVIEW®, integra los componentes físicos (hardware) de la marca NI® con el fin de procesar los datos obtenidos y poder visualizarlos bajo interfaces graficas creadas por el usuario.

Para la creación de un programa en LabVIEW® se genera una ventana en el cual, bloques que describen gráficas, contadores, constantes, entre otros son unidos por líneas de enlace arma uniendo cada bloque con líneas como se muestra en la Figura 40a. Una vez terminado, se genera una ventana de representación gráfica de cada uno de los bloques armados como se muestra en la Figura 40b.

Una vez la señal es codificada por el sistema de adquisición de datos es recibida y procesada por un algoritmo desarrollado en el software LabVIEW®. Este software está asociado a los equipos de NI®, lo cual asegura que no existirá ningún tipo de error en el procesamiento de datos, evitando el uso de programas intermedios para la codificación de señales.

Figura 40 a) presentación en diagramas de bloque para un ejemplo en LabVIEW®, b) resultado visual de programa generado [41]



3.1.3. Registro de ciclos térmicos obtenidos por los experimentos

Los ciclos térmicos obtenidos por el experimento serán presentados en graficas que describen el comportamiento de cada uno de los puntos de análisis donde se alojan los termopares al igual que los intervalos de las tasas de enfriamiento.

Para la obtención de los picos de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) se tendrá presente el valor máximo de temperatura en la gráfica del ciclo térmico y el valor de la tasa de enfriamiento ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$) se calcula en función de la curva de descenso de la gráfica del ciclo térmico.

3.2 Parámetros y condiciones de frontera

3.2.1 Selección del modelo para determinar las temperaturas en soldadura

La solución que permite determinar las temperaturas propuesta por Rosenthal [9] presenta un problema de singularidad alcanzado picos de temperatura muy

superiores (encima de 2000°C). La condición de tratar a la fuente de calor como un punto que se mueve a lo largo de la placa soldada tiene como consecuencia para el análisis de temperatura, que en puntos muy cercanos a la fuente de calor las temperaturas alcanzadas son elevadas por encima de la temperatura de fusión. Esto pudo evidenciarse en las referencias [19, 23] del capítulo del estado del arte.

El modelo que se usara en este trabajo esta basado en la solución de Rosenthal [9] y complementada para eliminar el problema de singularidad por Tsai [42] considerando como condición de frontera la temperatura de fusión del material base. Al igual que Rosenthal, Tsai describe dos posibles soluciones: Solución para placa delgada y solución para placa gruesa, las cuales son determinadas por el cálculo del espesor relativo (descrito en el capítulo del marco teórico). La solución de placa delgada se muestra en la ecuación 12

$$T - T_0 = B_z \exp\left[\frac{vw}{2a}\right] K_0\left[\frac{rv}{2a}\right] \quad (12)$$

Donde:

T = temperatura calculada (°C)

T₀ = temperatura inicial de la placa (°C)

v = velocidad de avance del proceso de soldadura (m*s⁻¹)

w = x - vt (m), donde x es un punto fijo en el metal base medido a lo largo de la soldadura, v es la velocidad de avance y t es el tiempo después que pasa la fuente de calor

α = difusividad térmica (m²*s⁻¹), calculada como k/ρC

k = conductividad térmica del material (J*m⁻¹s⁻¹*C⁻¹)

C = calor específico del material (W*m⁻³)

ρ = densidad del material base ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

r = distancia radial desde el origen del sistema de coordenadas O, a un punto P.

Esta dado por $r = \sqrt{w^2 + y^2}$

B_z = Constante de entrada de calor

Este ultimo término define la distribución de temperaturas estableciendo como limite la temperatura de fusión del materia para un ancho de cordón d . De esta manera el calculo de B_z es presentada en la ecuación 13 y el calculo de d es presentado en la ecuación 14

$$B_z = \frac{(T_m - T_0) \exp \frac{-vr_b}{2a} \left[\frac{K_0 \left(\frac{vr_b}{2a} \right)}{K_1 \left(\frac{vr_b}{2a} \right)} \right]}{K_0 \left(\frac{vr_b}{2a} \right)} \quad (13)$$

$$d = 2r_b \sqrt{1 - \left[\frac{K_0 \left(\frac{vr_b}{2a} \right)}{K_1 \left(\frac{vr_b}{2a} \right)} \right]^2} \quad (14)$$

Donde,

T_m = temperatura de fusión del material ($^{\circ}\text{C}$)

T_0 = temperatura de inicial de la placa ($^{\circ}\text{C}$)

v = velocidad de avance del proceso de soldadura ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

α = difusividad térmica ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$), calculada como $k/\rho C$

k = conductividad térmica del material ($\text{J}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$)

C = calor especifico del material ($\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$)

ρ = densidad del material base ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

r_b = extensión de la campana producida por la presencia del arco electrico (m)

K_0 = función modificada de Bessel de segunda clase y orden cero

K_1 = función modificada de Bessel de segunda clase y orden 1 y es definida como la derivada de $-K_0$ [43]

La ecuación 15 presenta la solución modificada para placa gruesa

$$T - T_0 = \frac{B_z \exp\left[\frac{-v(w+R)}{2a}\right]}{R} \quad (15)$$

Donde,

T = temperatura calculada ($^{\circ}\text{C}$)

T_0 = temperatura inicial de la placa ($^{\circ}\text{C}$)

v = velocidad de avance del proceso de soldadura ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

$w = x - vt$ (m), donde x es un punto fijo en el metal base medido a lo largo de la soldadura, v es la velocidad de avance y t es el tiempo después que pasa la fuente de calor

α = difusividad térmica ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$), calculada como $k/\rho C$

k = conductividad térmica del material ($\text{J}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$)

C = calor específico del material ($\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$)

ρ = densidad del material base ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

R = distancia radial desde el origen del sistema de coordenadas O , a un punto P .

Esta dado por $R = \sqrt{w^2 + y^2 + z^2}$

B_z = Constante de entrada de calor

La ecuación 16 muestra la solución de B_z y la ecuación 17 muestra el valor de d para el caso de placa gruesa:

$$B_z = (T_m - T_0)r_b \exp \frac{-vr_b}{2a} \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{2a}{vr_b}\right)} - 1 \right] \quad (16)$$

$$d = 2r_b \sqrt{1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{2a}{vr_b}\right)}} \quad (17)$$

Donde,

T_m = temperatura de fusión del material (°C)

T_0 = temperatura de inicial de la placa (°C)

v = velocidad de avance del proceso de soldadura ($m \cdot s^{-1}$)

α = difusividad térmica ($m^2 \cdot s$), calculada como $k/\rho C$

k = conductividad térmica del material ($J \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot C^{-1}$)

C = calor específico del material ($W \cdot m^{-3}$)

ρ = densidad del material base ($kg \cdot m^{-3}$)

r_b = extensión de la campana producida por la presencia del arco eléctrico (m)

Las condiciones del modelo asumidas para la distribución de temperaturas en la junta soldada son enunciadas a continuación:

- Las propiedades de conductividad y difusividad térmica del material son independientes de la temperatura.
- La evaluación de las temperaturas tendrá lugar después de la línea de fusión. Los fenómenos de fluidomagneto hidrodinámica dentro del charco de soldadura no forma parte del modelo.
- El cálculo de temperaturas está basado solo para placas rectangulares, con preparación de bisel en V y a tope.

- La condición del modelo permite el cálculo de temperatura para una pasada (un solo cordón de soldadura). El cálculo de temperaturas para múltiples cordones no es considerado.
- El modelo está ajustado para procesos de soldadura al arco eléctrico.

Los parámetros necesarios para el cálculo de la distribución de temperaturas usando el modelo presentado en este trabajo son mostrados en la Tabla 15.

Tabla 15 Parámetros usados para el desarrollo del modelo de distribución de temperaturas en juntas soldadas por procesos al arco eléctrico

Del proceso de Soldadura		
Parámetro	Símbolo	Unidad
Entrada de Calor	q_0	$J*m^{-1}$
Velocidad de avance	v	$mm*s^{-1}$
De las dimensiones de la placa		
Longitud	x	mm
ancho	y	mm
espesor	d	mm
De las propiedades del material		
Conductividad térmica	λ	$J*m^{-1}*s^{-1}*C^{-1}$
Difusividad térmica	α	m^2*s^{-1}
Densidad del material	ρ	$kg*m^{-3}$
Calor específico	C	$W*m^{-3}$
Temperatura de fusión	T_f	$^{\circ}C$
De las condiciones ambientales		
Temperatura ambiente	T_0	$^{\circ}C$

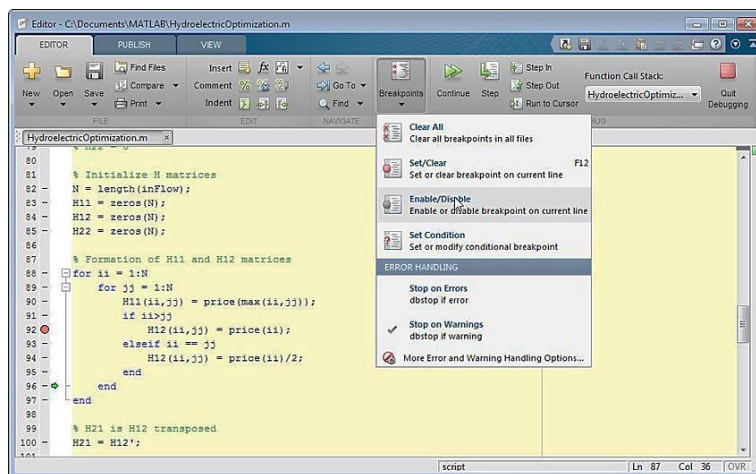
3.2.2 Selección de parámetros de programación

El ambiente virtual donde se desarrollará el código y la interfaz gráfica para el modelo de distribución de calor presentado en este trabajo será el programa Matlab®.

En el lenguaje de programación de Matlab® se pueden generar códigos sin la necesidad de declarar variables, especificar tipos de datos y asignar espacio en memoria, también permite la integración de los códigos con otros lenguajes de programación como C ó C++ [44].

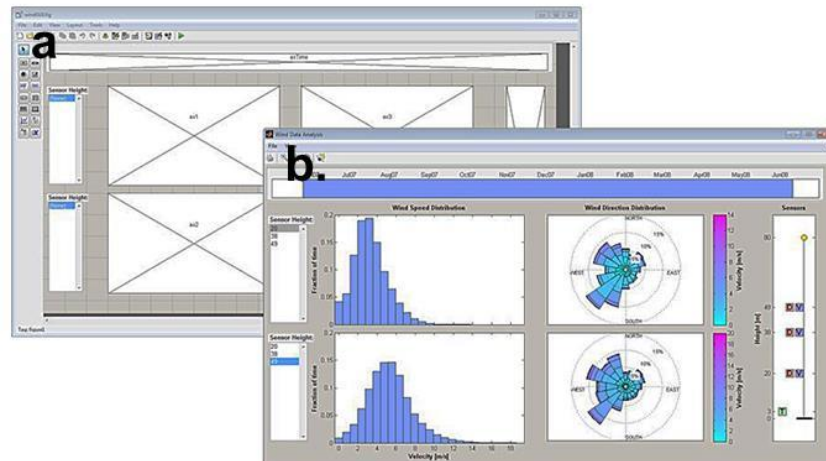
Entre las herramientas ofrecidas por Matlab® se cuenta con ventanas de comandos que permite el ingreso de datos, ejecución de programas y presentación de resultados; *MATLAB editor* que modifica códigos desarrollados; un identificador de código que permite identificar líneas en el código programado que pueden mejorarse. En la Figura 41 se muestra un ejemplo de creación de un código bajo el lenguaje de programación en Matlab®. Otra de las herramientas presentadas por Matlab® es *GUIDE* (entorno de desarrollo de interfaces graficas de usuario).

Figura 41 Líneas de código desarrollado en Matlab® [44]



Esta herramienta permite el diseño y edición de interfaces gráficas la cual permite generar pulsadores, menús desplegables y graficas de Matlab®. También, permite la creación de interfaces gráficas a través de líneas de código. En la Figura 42 se presenta un esquema donde se visualiza la creación de una interfaz usando GUIDE y la interfaz terminada.

Figura 42 a). Ambiente para la creación de la interfaz gráfica. b) Interfaz gráfica terminada [44]



3.2.3 Registro de los ciclos térmicos obtenidos por el modelo

Para los ciclos térmicos obtenidos por el modelo, serán evaluados en los mismos puntos de análisis que los ciclos térmicos obtenidos de manera experimental para así, comparar los picos de temperatura y las tasas de enfriamiento.

Para la obtención de los picos de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) se tendrá presente el valor máximo de temperatura en la gráfica del ciclo térmico y la tasa de enfriamiento ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$) está en función de la curva de descenso de la gráfica del ciclo térmico.

Para el cálculo de las tasas de enfriamiento de los resultados obtenidos por el modelo y el experimento se calculan basados en la ecuación 18:

$$TE = \frac{T_{max} - T_{min}}{t_{Tmax} - t_{Tmin}} \quad (18)$$

Donde

TE = Tasa de enfriamiento ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$)

T_{max} = Temperatura máxima tomada en la curva de descenso de temperatura del ciclo térmico ($^{\circ}\text{C}$)

T_{min} = Temperatura mínima tomada en la curva de descenso de temperatura del ciclo térmico ($^{\circ}\text{C}$)

t_{Tmax} = Tiempo que corresponde a la temperatura máxima tomada en la curva de descenso de temperatura del ciclo térmico ($^{\circ}\text{C}$)

t_{Tmin} = Tiempo que corresponde a la temperatura mínima tomada en la curva de descenso de temperatura del ciclo térmico ($^{\circ}\text{C}$)

3.3 Evaluación y validación experimental

3.3.1 Comparación y análisis de resultados modelo vs experimentos

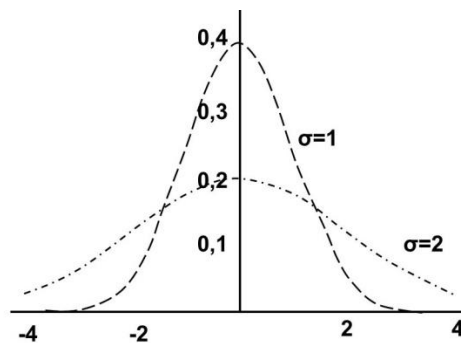
Una vez obtenidos los resultados de los picos de temperatura y tasas de enfriamiento del modelo desarrollado serán comparados con los picos de temperatura y tasas de enfriamiento de los experimentos. Los valores de los picos de temperatura y tasas de enfriamiento se mostrarán en tablas donde se presentarán los porcentajes de error para los picos de temperatura y las diferencias de las tasas de enfriamiento.

3.3.2 Comparación de resultados del modelo con otros Autores: análisis estadístico

El modelo desarrollado será comparado con los autores [45] y [46] y se usará como herramienta computacional Statgraphics® para realizar el análisis estadístico. Se obtendrán 3 conjuntos de datos: modelo propuesto, modelo

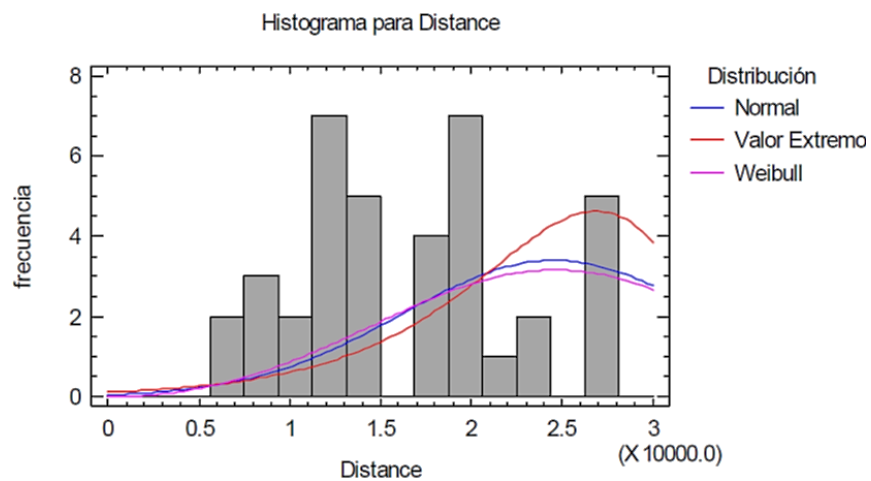
referencia y experimento referencia. La variable de análisis será el pico de temperatura. El análisis estadístico busca comprobar que los conjuntos de datos pertenezcan a una misma población. Para esto, se utilizara el análisis de datos no censurados, que permite determinar a través de un conjunto de datos conocidos la distribución normal [47], como se muestra en la Figura 43.

Figura 43 distribución normal [48]



Para determinar si el conjunto de datos posee una distribución normal se analizarán dos estadísticos del análisis de datos no censurados: Las gráficas de histogramas y Kolmogorov-Smirnov. La grafica de histogramas presenta en un diagrama de barras la frecuencia de valores y el ajuste de distribución normal como se muestra en la Figura 44

Figura 44 Representación de Histogramas [49]



Kolmogorov-Smirnov es una prueba de ajuste de bondad que compara la curva de distribución normal y a través del valor de P permite definir si la hipótesis planteada es aceptada o no [49]. Hasta este punto, solo se ha establecido que los datos analizados de manera independiente poseen una distribución normal.

Ahora, el análisis estadístico de dos muestras pretende analizar si los datos pertenecen a una misma población evaluando el valor de P que permite definir si la hipótesis es aceptada o no. Para este análisis se contarán con gráficas de cajas y bigotes y comparaciones de medias.

Dentro de los análisis estadísticos obtenidos por datos no censurados, los histogramas se presenta la gráfica de histograma representa a través de barras si los datos analizados siguen una distribución normal.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Selección de materiales, equipos de soldadura y sistema de medición de temperaturas para obtención de ciclos térmicos

4.1.1 Materiales y equipos para soldadura

Los parámetros de soldadura voltaje, intensidad y velocidad de avance para cada una de las pruebas realizadas son presentadas en la Tabla 16, de esta manera se puede calcular las entradas de calor para cada uno de los procesos de soldadura.

Tabla 16 Parámetros de los procesos de soldadura para cada experimento

Material base	Voltaje (V)	Intensidad (A)	Vel. De Avance (mm*s ⁻¹)	Eficiencia
AA5083 – H116	24,0	135,00	9,5	0,85
AISI 430 – AISI 316L	25,1	110,3	3,3	0,75

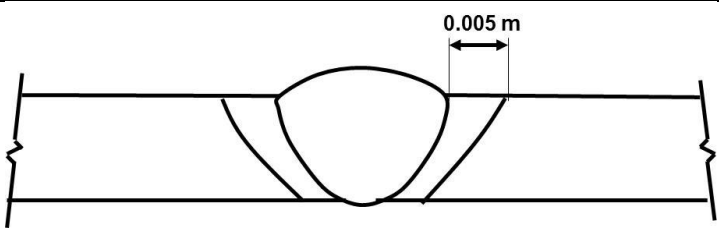
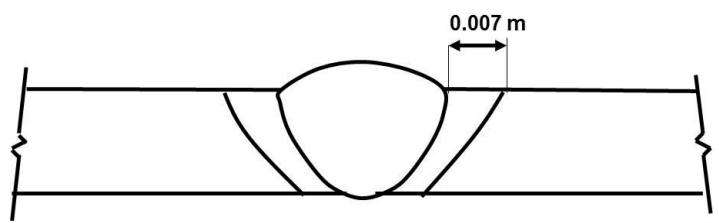
Las entradas de calor obtenidas de cada uno de los materiales base es presentado en la Tabla 17

Tabla 17 Entrada de calor para cada experimento

Material base	Entrada de calor (kJ*m ⁻¹)
AA5083 – H116	289,9
AISI 430 – AISI 316L	617,5

La extensión de la ZAT en los materiales base es presentada en la Tabla 18, es importante conocer esta extensión ya que por objetivo de este trabajo se considera el análisis de los ciclos térmicos en la ZAT. Para el caso de la junta disímil la extensión de la ZAT fue medida usando barridos de dureza y relacionándolo con macrografía de la junta como se muestra en [32].

Tabla 18 Extensión de la ZAT

Material Base	Extensión de la ZAT
AA5083 – H116	
AISI 430 – AISI 316L	

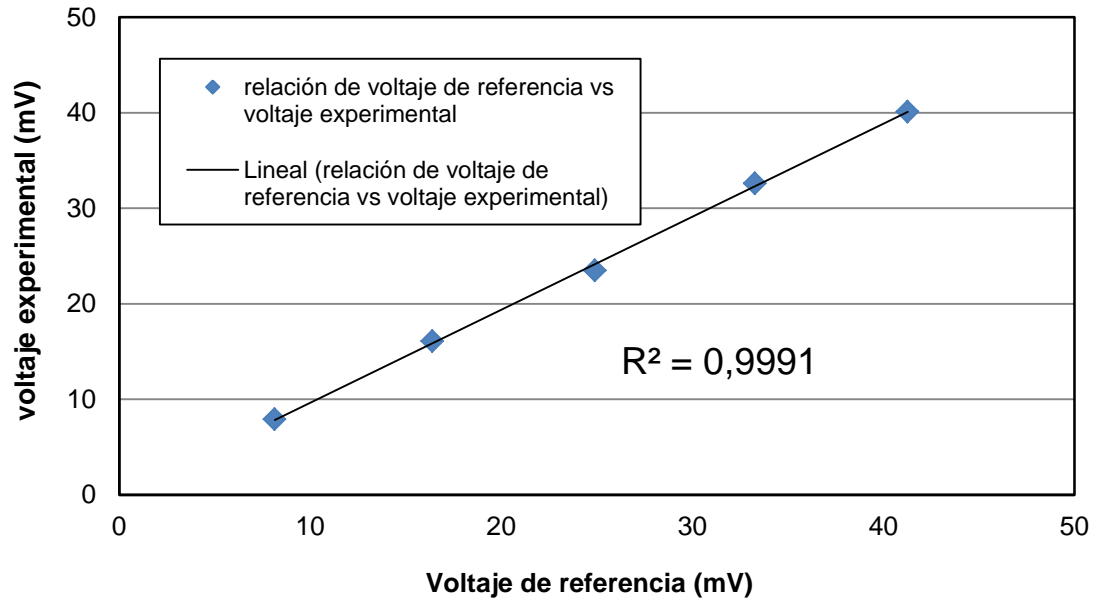
4.1.2 Sensores y equipos de medición de temperatura

La Tabla 19 muestra los valores de voltaje obtenidos para la calibración de los termopares y los voltajes obtenidos por el fabricante. Estos resultados son mostrados en la Figura 45 donde se obtuvo un ajuste de R^2 de 0,9991, presentado una buena calibración de los termopares.

Tabla 19 Resultados de voltaje experimental y voltaje de la referencia

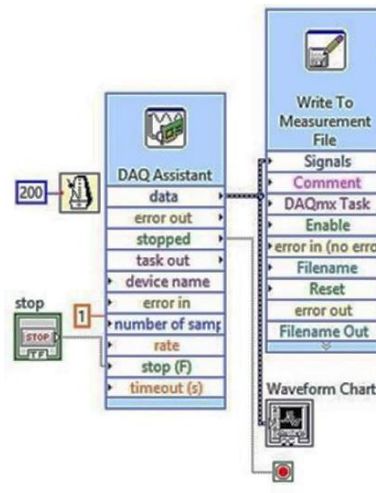
Medida de temperatura (°C)	Voltaje ref. (mV)	Voltaje experimental (mV)
200	8,1	7,9
400	16,4	16,1
600	24,9	23,5
800	33,3	32,6
1000	41,3	40,1

Figura 45 Relación de voltaje de referencia vs voltaje experimental



Para la adquisición de las medidas de temperaturas durante los procesos de soldadura se desarrolló un programa basado en el lenguaje de LabVIEW® que permitió la conexión entre los módulos de termocuplas y el chasis. La Figura 46 muestra el diagrama de bloques del programa de adquisición de señal escrito en LabVIEW®.

Figura 46 Diagrama de bloques del programa de adquisición de señales



4.1.3 Ciclos térmicos obtenidos experimentalmente para AA 5083 H-116 soldada con GMAW-P

La Figura 47 muestra el ciclo térmico obtenido para el termopar ubicado 2,1 mm de la línea de fusión. La Figura 48 muestra el comportamiento del ciclo térmico para el termopar ubicado a 5,3 mm de la línea de fusión. La Figura 49 muestra el ciclo térmico obtenido por el termopar ubicado 30 mm de la línea de fusión.

Figura 47 Ciclo térmico obtenido experimentalmente para material base AA5083 H-116. Para $y = 2,1$ mm

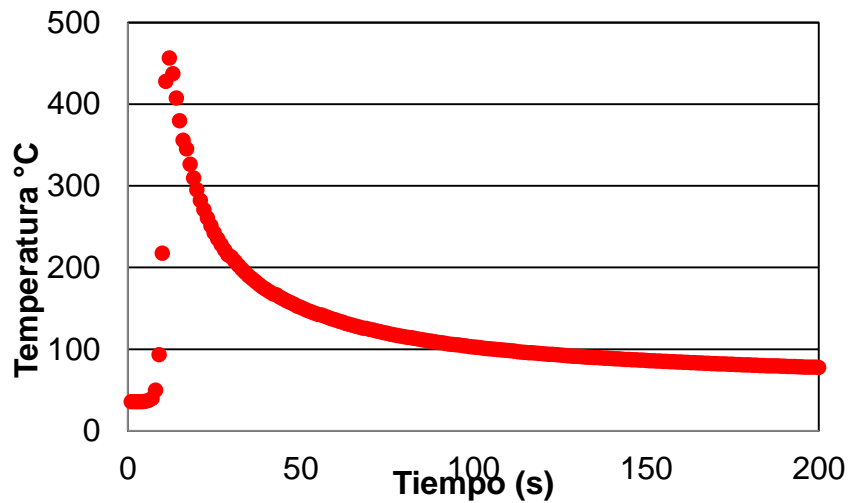


Figura 48 Ciclo térmico obtenido experimental para material base AA5083 H-116. $y = 5,3$ mm

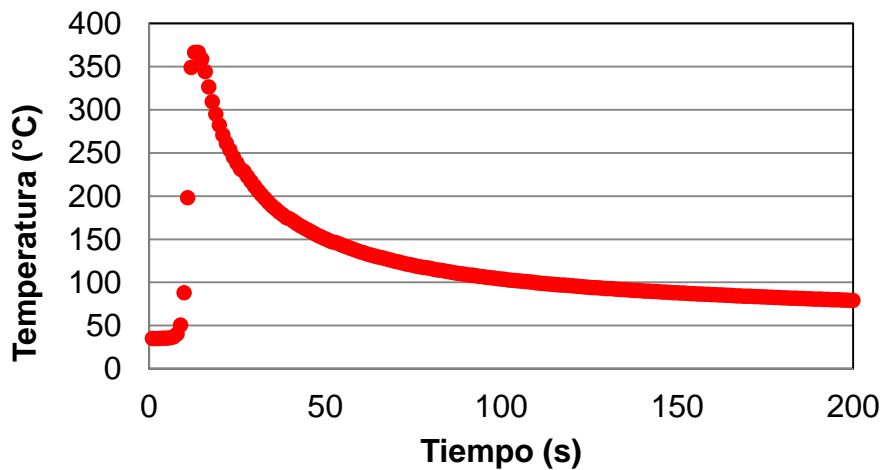
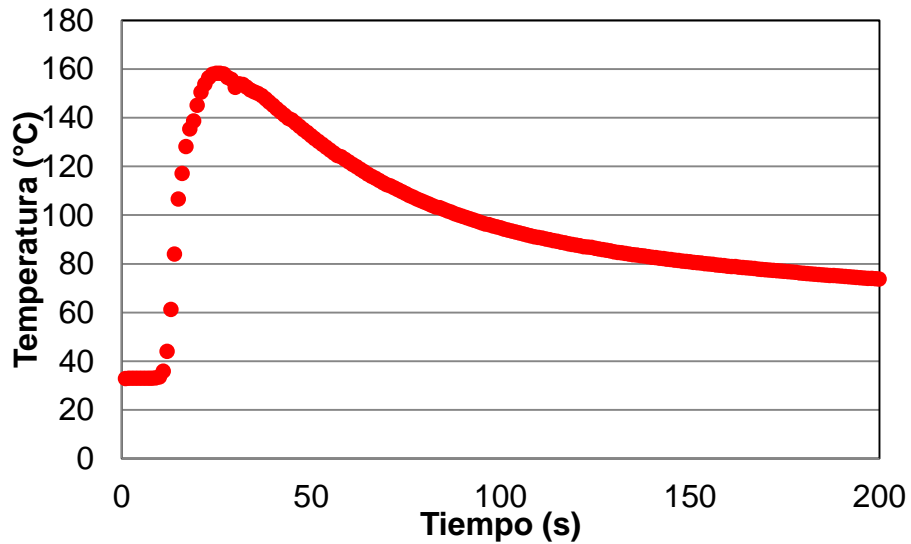


Figura 49 Ciclo térmico obtenido experimental para material base AA 5083 H-116. y = 30 mm



Los picos de temperatura obtenidos al igual que la tasa de enfriamiento son presentados en la Tabla 20.

Tabla 20 Picos de temperaturas y tasas de enfriamiento para AA 5083 H-116 soldadas con GMAW - P

Punto analizado	Pico de temperatura (°C)	Tasa de enfriamiento(°C*s ⁻¹) Intervalo [300°C – 100°C]
y=2,1 mm	456	2,46
y = 5,3 mm	366	2,34
y=30 mm	156	NA

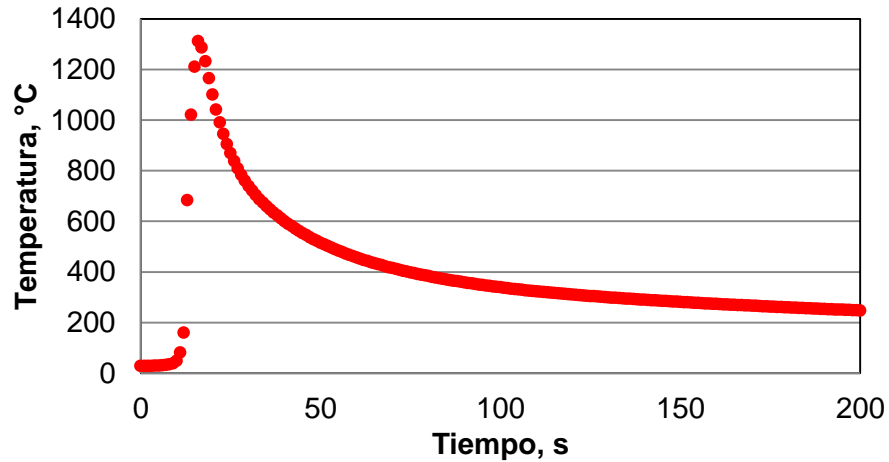
NA: No Aplica.

La discusión de los ciclos térmicos obtenidos por el experimento se realizará cuando se obtengan los ciclos térmicos del modelo desarrollado.

4.1.4 Ciclos térmicos obtenidos experimentalmente para AISI 430 y AISI 316L soldada con SMAW disímil

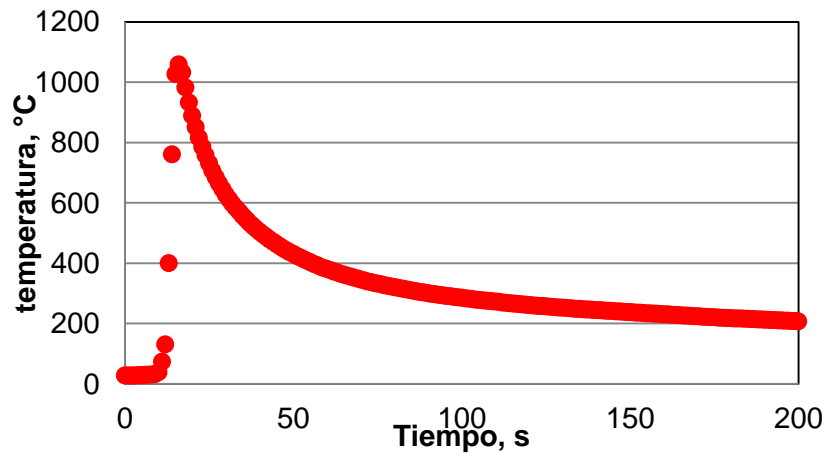
La Figura 50 muestra el ciclo térmico obtenido en el material AISI 430 y cuya ubicación del termopar medida desde la línea de fusión es de 0,68 mm.

Figura 50 Ciclo térmico experimental para material base AISI 430. $y=0,68$ mm



La Figura 51 muestra el ciclo térmico para el material AISI316L cuya ubicación del termopar medido desde la línea de fusión es de 0,91 mm y la Figura 52 muestra el ciclo térmico obtenido para el material AISI 316L cuyo termopar quedo a una distancia de 6,2 mm de la línea de fusión.

Figura 51 Ciclo térmico experimental para material base AISI 316L. $y=0,91$ mm



Los picos de temperatura obtenidos al igual que la tasa de enfriamiento son presentados en la Tabla 21.

Figura 52 Ciclo térmico experimental para material base AISI 316L. $y=6,2$ mm

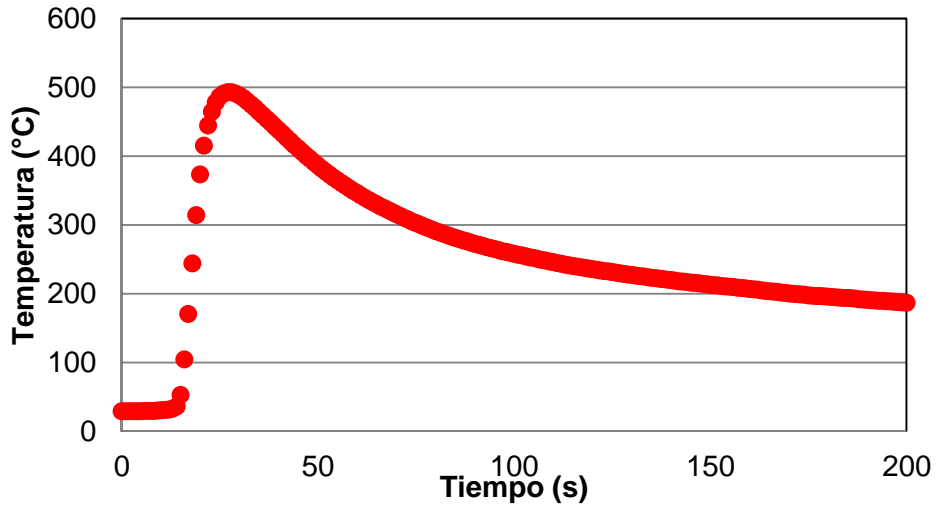


Tabla 21 Picos de temperatura y tasas de enfriamiento para AISI 430 y AISI 316L, soldadas con SMAW disímil.

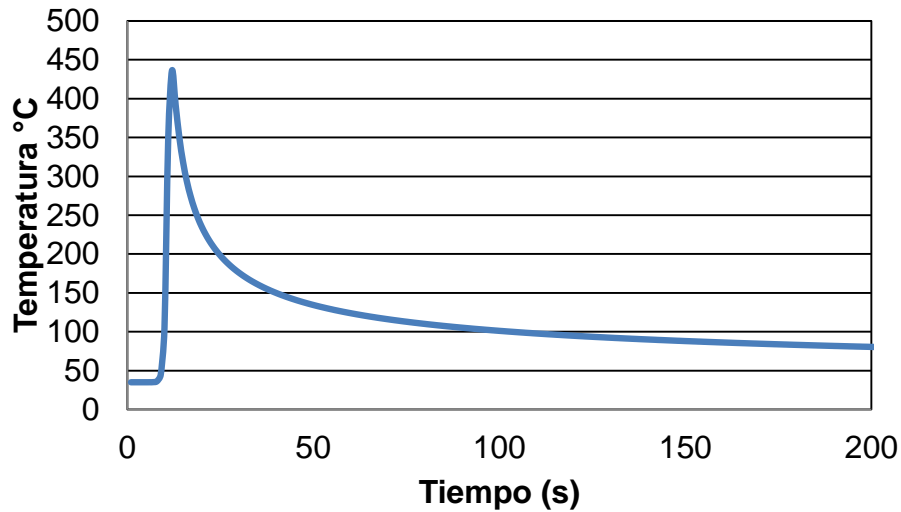
Punto analizado	Pico de temperatura (°C)	Tasa de enfriamiento(°C*s ⁻¹) Intervalo [800°C – 500°C] [50]
y=0,68 mm	1311	12,26
y=0,91 mm	1058	17,36
y=6,2 mm	492	NA

4.2 Parámetros y condiciones de frontera

4.2.1 Desarrollo del modelo para determinar las temperaturas en soldadura en juntas soldadas de AA 5083 H-116 con proceso de soldadura GMAW-P

La Figura 53 presenta el ciclo térmico obtenido por el modelo desarrollado para el proceso de soldadura al arco eléctrico GMAW-P en el material base AA5083 H-116. El punto de análisis para este ciclo térmico se encontró ubicado a 3,7 mm de la línea de fusión.

Figura 53 Ciclo térmico obtenido por el modelo para el material base AA5083 H-116 soldado con proceso GMAW-P. $y=2,1$ mm



La Figura 54 muestra el ciclo térmico para la junta AA5083 H-116 soldada con GMAW-P, cuyo punto de análisis está ubicado a 5,3 mm de la línea de fusión. Por último, se muestra en la Figura 55 los resultados de los ciclos térmicos para la junta AA 5083 H-116 soldada con GMAW-P, cuyo punto de análisis está ubicado a 30 mm de la línea de fusión.

Figura 54 Ciclo térmico obtenido por el modelo para el material base AA5083 H-116 soldado con proceso GMAW-P. $y=5,3$ mm

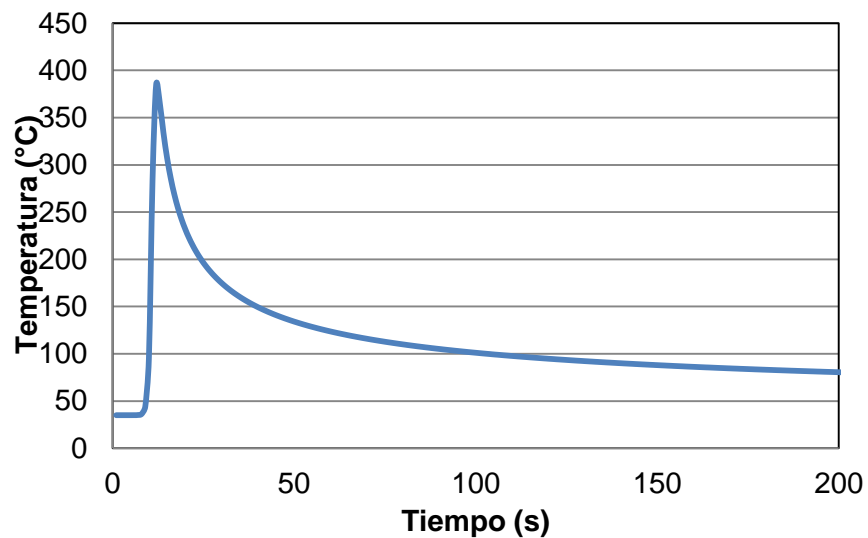
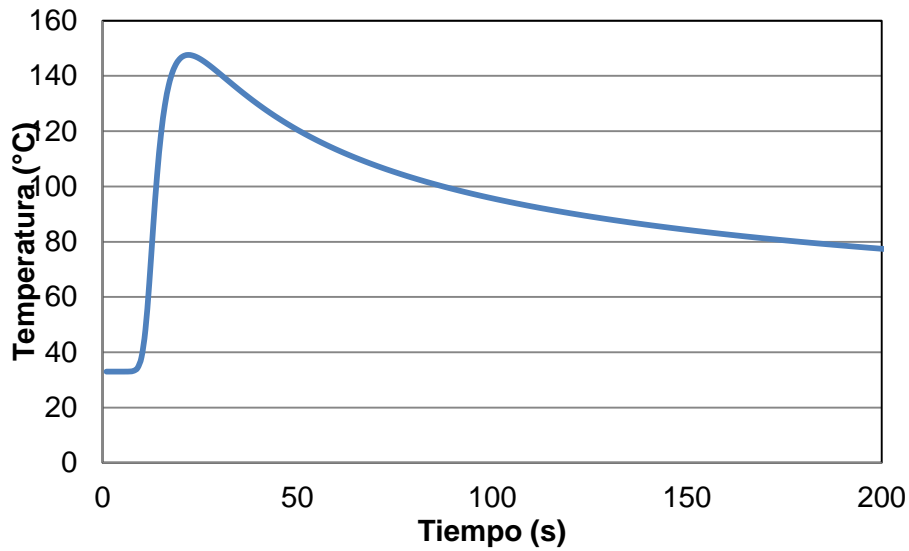


Figura 55 Ciclo térmico obtenido por el modelo para el material base AA5083 H-116 soldado con proceso GMAW-P. $y=30$ mm



Los picos de temperaturas y las tasas de enfriamiento para cada ciclo térmico son mostrados en la Tabla 22.

Tabla 22 Picos de temperatura y tasas de enfriamiento para los ciclos térmicos obtenidos por el modelo para AA5083-H116 soldada con GMAW-P

Punto analizado	Pico de temperatura (°C)	Tasa de enfriamiento(°C*s ⁻¹) Intervalo [300°C – 100°C]
y=2,1 mm	481	1,81
y=5,3 mm	419	1,94
y=30 mm	163	NA

NA: No Aplica

Para la obtención de los ciclos térmicos basado en el modelo de cálculo de temperatura desarrollado, se consideraron dos parámetros: r_b y y_0 . El parámetro r_b comprende la extensión de la campana de Gauss formada por la presencia del arco eléctrico. Autores como [22], [25], [26] y [27], usan este parámetro para definir sus puntos de análisis fuera del cordón de soldadura obteniendo temperaturas más reales. Ahora, el parámetro de y_0 permite definir como punto de partida la

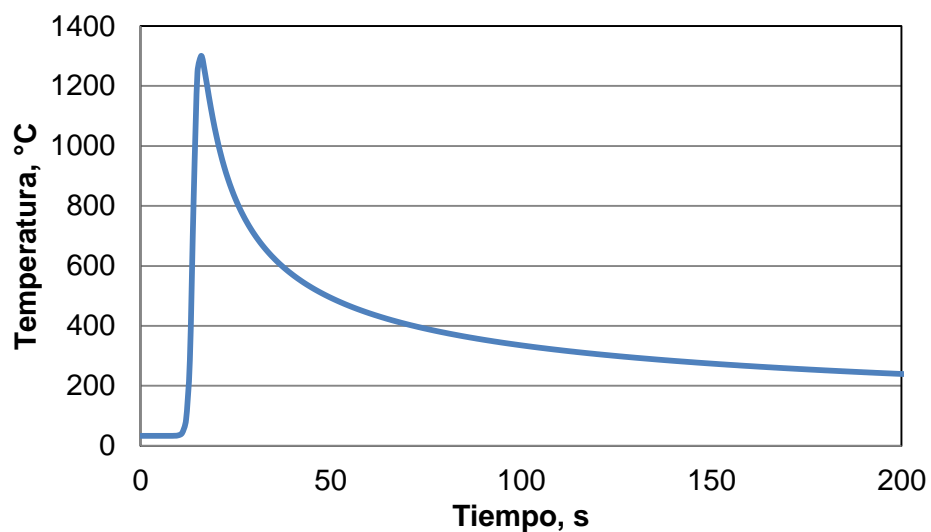
línea de fusión del cordón de soldadura. De esta manera, para los resultados de los ciclos térmicos calculados por el modelo desarrollado se considerara como valor de r_b y y_0 20 mm y 5,0 mm, respectivamente. Estos valores fueron ajustados de manera iterativa a diferentes corridas del modelo desarrollado.

4.2.2 Desarrollo del modelo para determinar las temperaturas en soldadura en juntas soldadas AISI 430 y AISI 316L soldadas con proceso SMAW disímil

Ahora, se presentan los resultados obtenidos por el modelo de cálculo de temperaturas desarrollado para los materiales base aceros AISI430 y AISI 316l soldados con SMAW disímil. El punto de análisis para la obtención del ciclo térmico obtenido para el material base AISI 430 fue de 0,68 mm medido desde la línea de fusión, la Figura 56 muestra el ciclo térmico calculado.

La Figura 57 muestra el ciclo térmico obtenido para el material AISI 316l donde el punto de análisis estuvo ubicado a 0,91 mm de la línea de fusión. Por último, la Figura 58 muestra el ciclo térmico de un punto de análisis ubicado a 6,2 mm de la línea de fusión para el material base AISI 316l.

Figura 56 Ciclo térmico obtenido por el modelo para el material base AISI 430 soldado con proceso SMAW disímil y electrodo E309.



Para el cálculo de los ciclos térmicos obtenidos por el modelo desarrollado se los parámetros de r_b y y_0 obtenidos de manera iterativa para los materiales AISI 430 y AISI 316 son presentados en la Tabla 23.

Figura 57 Ciclo térmico obtenido por el modelo para el material base AISI 316 soldado con proceso SMAW disímil y electrodo E309. $y=0,91$ mm

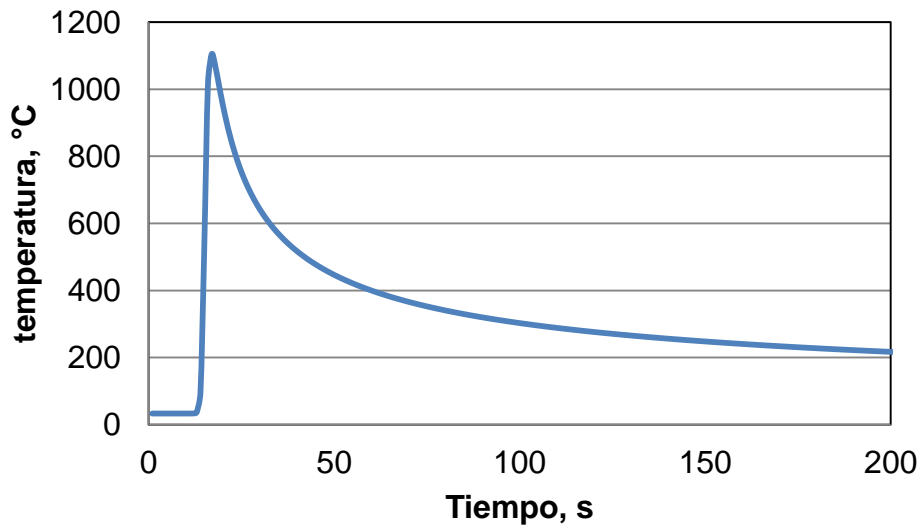


Figura 58 Ciclo térmico obtenido por el modelo para el material base AISI 316 soldado con proceso SMAW disímil y electrodo E309. $y=6,2$ mm

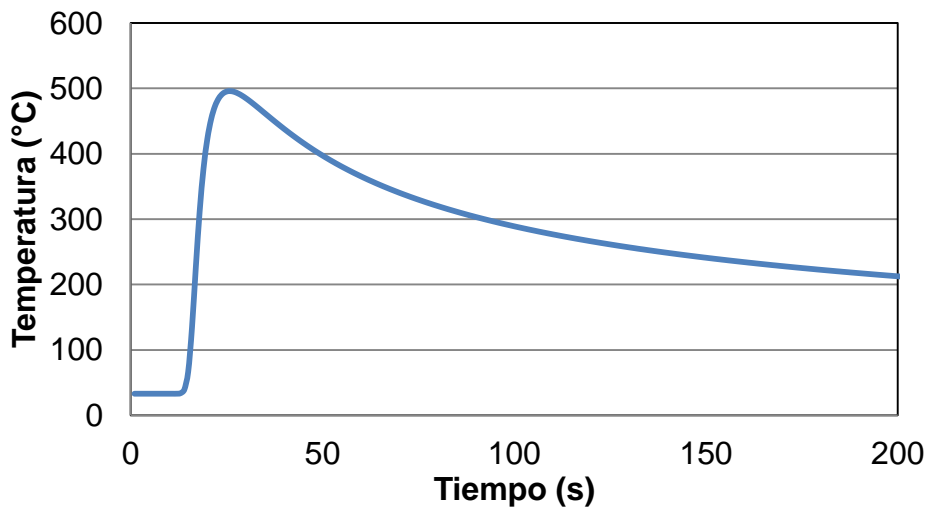


Tabla 23 Parámetros de r_b y y_0 para determinar la distribución de temperaturas de los casos estudiados

Material base	Parámetro r_b (mm)	Parámetro y_0 (mm)
AISI 430	15	4
AISI 316L	10	2,6

Los picos de temperatura y las tasas de enfriamiento para cada ciclo térmico obtenido para las juntas de AISI 430 y AISI 316L soldadas con SMAW disímil son presentados en la Tabla 24.

Tabla 24 Picos de temperatura y tasas de enfriamiento para los ciclos térmicos obtenidos por el modelo para AISI430 y AISI316 soldada con SMAW disímil.

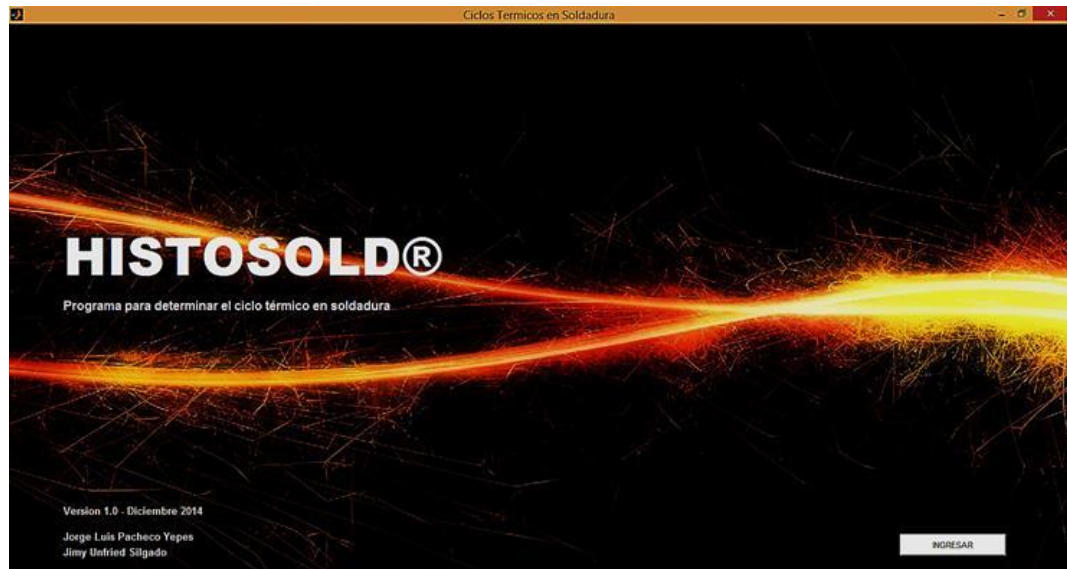
Punto analizado	Pico de temperatura (°C)	Tasa de enfriamiento(°C*s ⁻¹) Intervalo [800°C – 500°C]
$y=6,8 \times 10^{-4} \text{m}$	1300	12,54
$y=9,1 \times 10^{-4} \text{m}$	1104	16,79
$y=6,2 \times 10^{-3} \text{m}$	495	NA

NA: No Aplica

4.2.3 Selección de parámetros de programación

El modelo de distribución de temperaturas desarrollado fue presentado en una subrutina programada y vinculada a una interfaz gráfica, la cual fue desarrollada en Matlab®. La subrutina estuvo basada en el modelo desarrollado por [31]. *Histosold*® es el nombre de la subrutina y la interfaz gráfica del modelo de distribución de temperaturas. En este subcapítulo se explicara en que consiste el programa *Histosold*® y como está constituido. La Figura 59 presenta el inicio al programa *Histosold*®, donde se muestra el nombre de los creadores de la interfaz y una ruta de ingreso al programa. *Histosold*® se encuentran actualmente sometido a registro ante la Dirección Nacional de Derechos de Autor (DNDA) [51]

Figura 59 Ingreso al programa de Histosold®

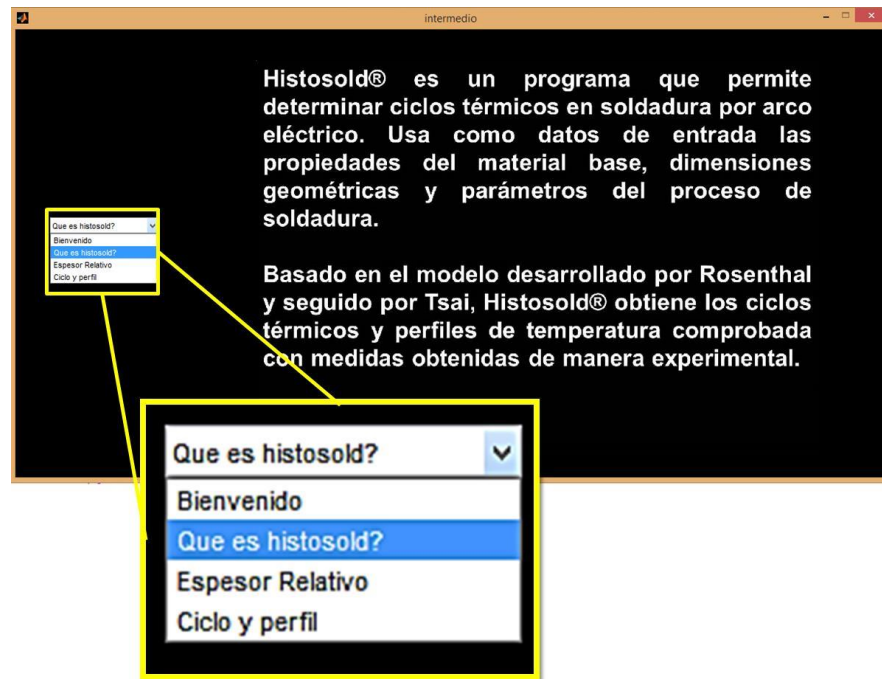


A través de la ruta de ingreso, se habilita una ventana que presenta un menú donde se explica al usuario que es *Histosold®* y como se obtiene los ciclos térmicos y perfiles de temperatura que se deseen calcular. En la Figura 60 se muestra el menú de opciones al usuario, cada componente se explica a continuación:

Que es Histosold?: Corresponde al objetivo del programa y bajo qué condiciones trabaja.

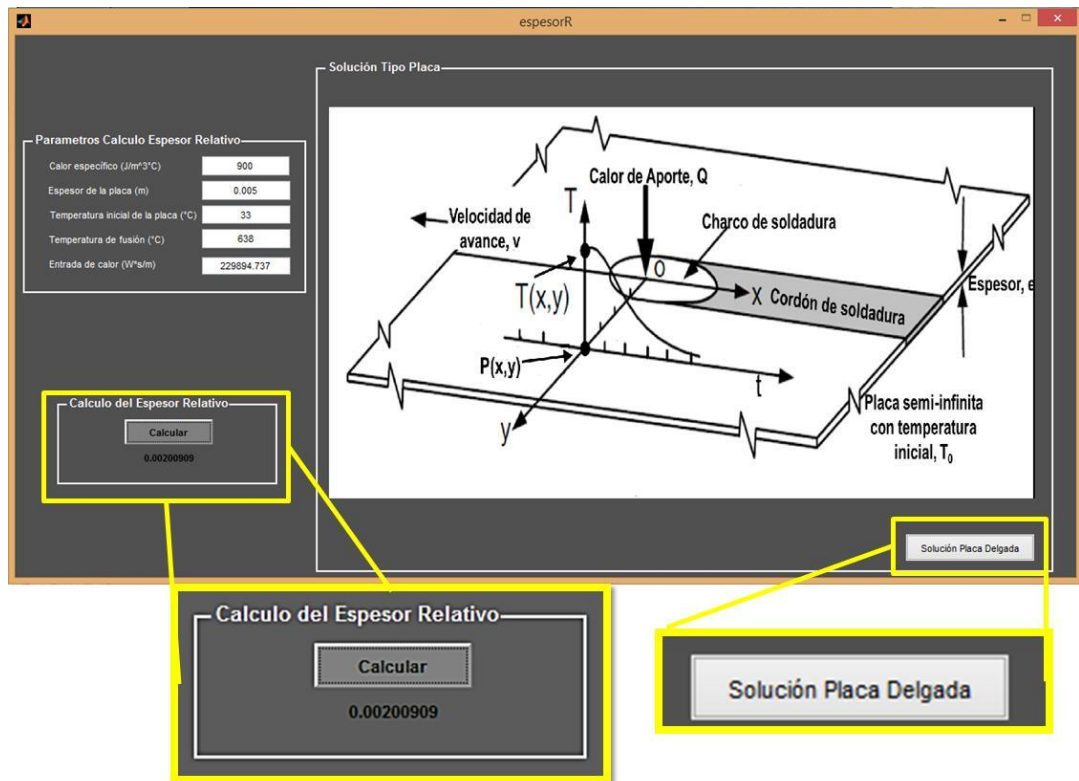
- *Espesor relativo:* Este componente permite determinar el espesor relativo para la junta la cual se desea determinar la distribución de temperaturas.
- *Ciclo y perfil:* Es la última ventana donde se realiza el ingreso de los parámetros conocidos y necesarios para el cálculo de los ciclos térmicos y el perfil de temperaturas.

Figura 60 Ventana intermedia para la presentación de los componentes del programa



Una vez realizado este paso, se ingresa a una nueva ventana donde se procede a calcular el espesor relativo para la junta que se desea obtener la distribución de temperaturas. Una vez ingresado los parámetros se pulsa el botón *calcular* de esta manera se obtiene la solución de placa delgada o placa gruesa. La Figura 61 muestra un ejemplo del tipo de solución obtenida para unos parámetros de entrada. Una vez realizado el cálculo de espesor relativo se habilitará una opción para ingresar al tipo de solución dada. En el ejemplo de la Figura 61 se habilitó la opción de *Solución Placa Delgada*.

Figura 61 Cálculo del espesor relativo para obtención del tipo de solución de distribución de temperaturas



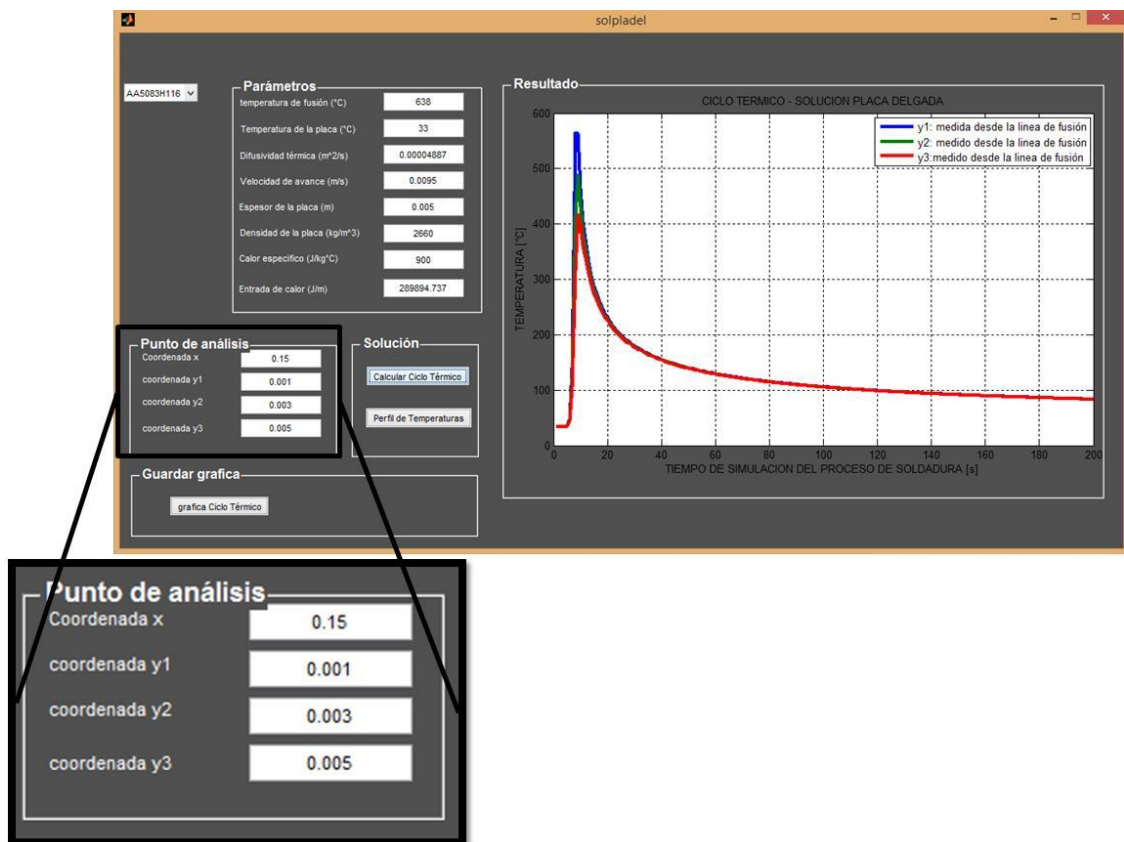
Una vez habilitada la solución obtenida por el cálculo de espesor relativo se ingresa a dicha solución, habilitando la última ventana donde se calcula el ciclo térmico y el perfil de temperaturas. Se presenta un menú donde el usuario puede seleccionar entre los materiales bases mostrados en este trabajo (AA 5083 H-116, AISI 430 y AISI 316L), o habilitar una opción en el menú del tipo de material que se desea trabajar. Actualmente *Histosold*® cuenta con 2 tipos de materiales: aleaciones de aluminio y Aceros.

Una vez el usuario selecciona el tipo de material, pasa al panel de parámetros donde ingresa los datos solicitados. Para el ingreso de parámetros debe hacerse en las unidades que solicita el programa. *Histosold*® actualmente no cuenta con una opción para modificar las unidades en las que se puedan ingresar los

parámetros. Además, se debe aclarar que el separador de decimales es el punto (viene predeterminado en el programa de Matlab®).

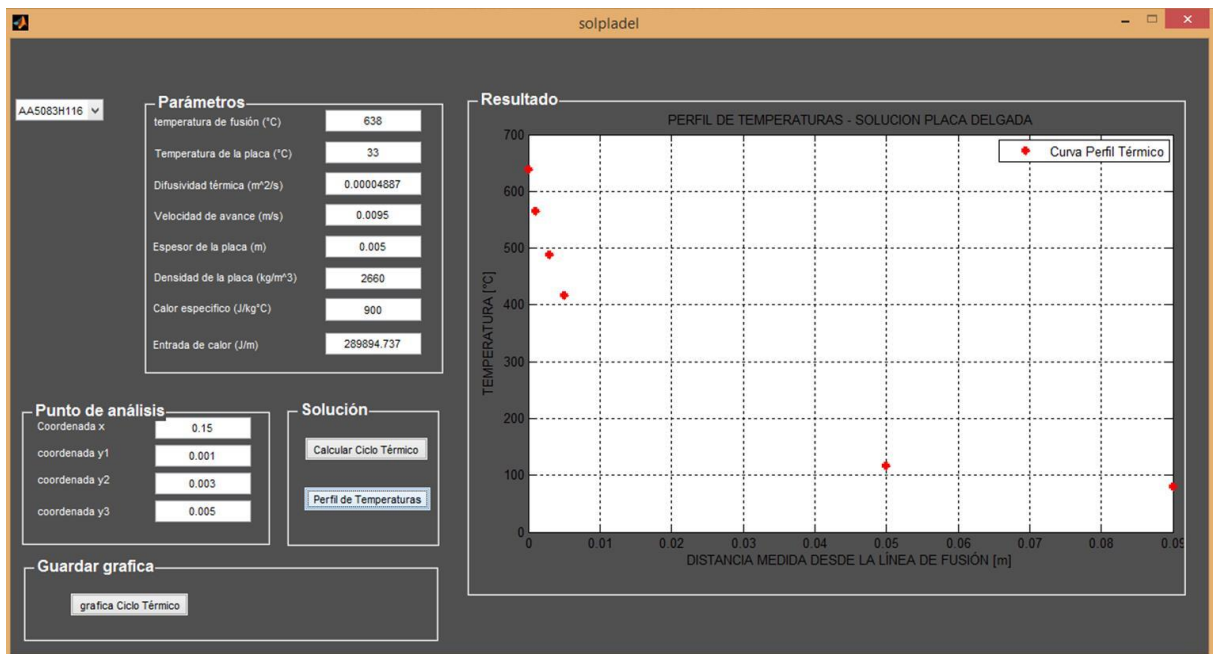
El panel denominado *punto de análisis* corresponde a los puntos de interés (medidos transversal al cordón de soldadura) sobre el material base. Las variaciones de los puntos de análisis están en función de la medida transversal al cordón lo que corresponde a los parámetros y_1 , y_2 , y_3 . En el caso de la coordenada x es igual para cada punto de análisis por tal motivo, la gráfica obtenida de ciclo térmico muestra el pico de temperatura en el mismo instante para los 3 puntos de análisis. La Figura 62 muestra la obtención del ciclo térmico a través del ingreso de los parámetros de entrada solicitados.

Figura 62 Cálculo del ciclo térmico en función de los parámetros presentados en el panel Punto de Análisis



Una vez obtenido el ciclo térmico, se calcula el perfil de temperaturas pulsando a la opción *Perfil de Temperatura*, los resultados obtenidos muestran los puntos para el análisis de las distancias ingresadas y otros puntos predeterminados que se encuentran dentro del programa. La Figura 63 muestra el perfil de temperaturas obtenido para el ejemplo mencionado anteriormente.

Figura 63 Perfil de temperaturas obtenido por el programa desarrollado



Por último, existe una opción el programa para guardar la gráfica obtenida (tanto el ciclo térmico como el perfil de temperaturas). También, automáticamente guarda un archivo en una hoja de cálculo donde muestra los valores obtenidos para el ciclo térmico.

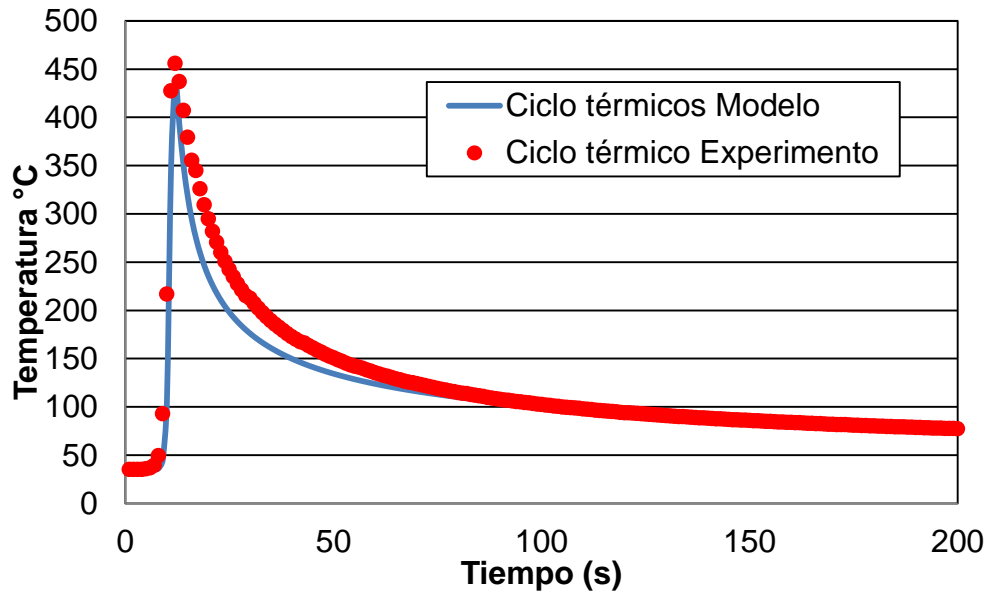
4.4 Evaluación y validación experimental

4.4.1 Comparación de los ciclos térmicos del modelo vs experimento con material base AA5083 H-116 y proceso de soldadura GMAW-P

La Figura 64 muestra los ciclos térmicos obtenidos por el modelo y comparados con el experimento para el mismo punto de análisis el cual está ubicado 3,7 mm

medido desde la línea de fusión. De la gráfica se obtiene los picos de temperatura y las tasas de enfriamiento.

Figura 64 Comparación de los ciclos térmicos obtenidos por el modelo y el experimento para el material base AA5083 H-116.



En la Tabla 25 se muestra el porcentaje de error asociado a los picos de temperatura y la Tabla 26 muestras las tasas de enfriamiento y el porcentaje de error para este primer punto de análisis. El análisis de las tasas de enfriamiento se realizó en el intervalo de 300 °C a 100°C.

Tabla 25 porcentaje de error para picos de temperatura obtenidos por el modelo y el experimento en AA 5083 H-116 para un $y = 2,1$ mm

Pico de temperatura (°C)		% de error
Modelo	Experimento	
481	456	5,48

Tabla 26 porcentaje de error para tasas de enfriamiento obtenidas por el modelo y el experimento en AA 5083 H-116 para un $y = 2,1$ mm

Tasa de enfriamiento ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$)		% error
Modelo	Experimento	
1,81	2,46	26,42

En la Figura 65 se muestra la comparación de los ciclos térmicos obtenidos por el modelo y de manera experimental para la ubicación de $y = 5,3$ mm. El error de los picos de temperatura y las tasas de enfriamiento se presentan en la Tabla 27 y Tabla 28, respectivamente. Las tasas de enfriamiento están evaluadas para un intervalo de $300 - 100$ $^{\circ}\text{C}$.

Figura 65 Comparación de los ciclos térmicos obtenidos por el modelo y el experimento para el material base AA5083 H-116.

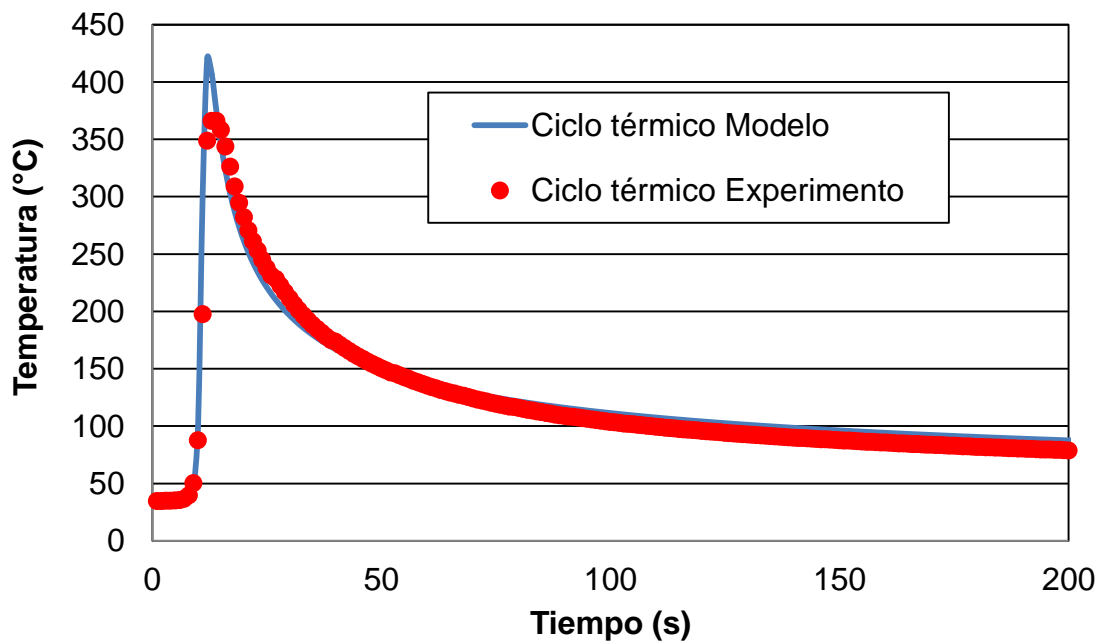


Tabla 27 porcentaje de error para picos de temperatura obtenidos por el modelo y el experimento en AA 5083 H-116 para un $y = 5,3 \text{ mm}$

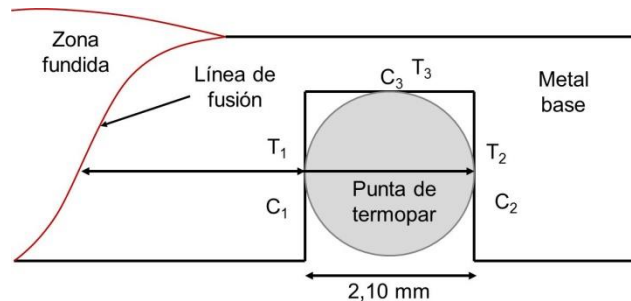
Pico de temperatura ($^{\circ}\text{C}$)		% de error
Modelo	Experimento	
419	366	14,69

Tabla 28 porcentaje de error para tasas de enfriamiento obtenidas por el modelo y el experimento en AA 5083 H-116 para un $y = 5,3 \times 10^{-3} \text{ m}$

Tasa de enfriamiento ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$)		% error
Modelo	Experimento	
1,94	2,34	17,10

La variación de los picos de temperatura obtenidos por el modelo y el experimento se explica usando el ejemplo mostrado en la Figura 66. Nótese, que puede existir 3 medidas de temperatura (T_1 , T_2 o T_3) en función del punto de contacto (C_1 o C_2 o C_3) del termopar con la pared donde se encuentra alojado.

Figura 66 Detalle de ubicación del termopar y punto de contacto con pared de perforación para lectura de temperatura



La medida de la cabeza del termopar usado para los experimentos es de 2,1 mm de diámetro. La figura 67a muestra el comportamiento de los ciclos térmicos alcanzados (usando la información de la figura 66) para los 3 puntos de contacto. Nótese, que para el mismo termopar puede existir 3 picos de temperatura. Para el caso del ciclo térmico experimental se establece que el punto del termopar que sensó la medida de temperatura está en el contacto C_2 , debe adicionarse 1,05 mm

a la medida transversal suministrada al modelo desarrollado. De esta manera, el valor de la medida transversal a la línea de fusión paso de 5,3 mm a 6,35 mm y el nuevo ciclo térmico del modelo y comparado con el experimento es mostrado en la Figura 67b. La Tabla 29 muestra la comparación de los picos de temperatura presentando una disminución del error de 10%. **Por tanto, es notable que la región de contacto del termopar dentro de la perforación presenta una consideración significativa dentro de las medidas del ciclo térmico**

Figura 67 a. comparación de los ciclos térmicos para 3 puntos de contacto, b. Nueva comparación de los ciclos térmicos obtenidos por el modelo y el experimento para el material base AA5083 H-116.

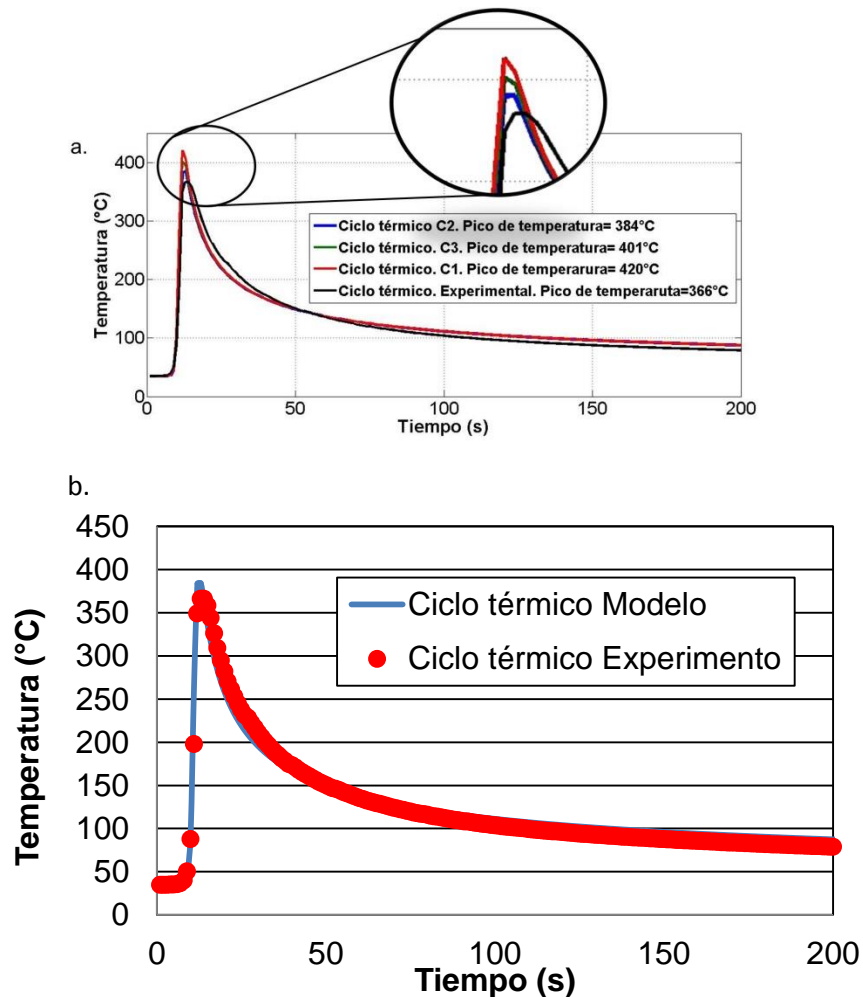


Tabla 29 Nuevo cálculo de porcentaje de error para picos de temperatura obtenidos por el modelo y el experimento en AA 5083 H-116. $y=6,35$ mm

Pico de temperatura (°C)		% de error
Modelo	Experimento	
384	366	4,91

La Figura 68, muestra los ciclos térmicos comparados entre el modelo y el experimento. El punto de análisis se encuentra $3,0 \times 10^{-2}$ m de la línea de fusión. Los picos de temperatura se muestran en la Tabla 30.

La caída de temperatura descrita en los ciclos térmicos obtenida por el modelo desarrollado difiere de la obtenida experimentalmente. Este hecho se explica por los dos efectos que tiene la conductividad térmica del material base y se exponen a continuación:

- Una alta conductividad térmica, como es el caso de la aleación de aluminio implica una alta tasa de enfriamiento [52]
- Dentro de las propiedades termo-físicas, la conductividad térmica representa un cambio significativo en la distribución de temperaturas en las juntas soldadas [53]

Este hecho se soporta también por la ecuación de tasa de enfriamiento presentada en el capítulo del marco teórico donde se muestra que la conductividad térmica es directamente proporcional a la tasa de enfriamiento.

Figura 68 Comparación de los ciclos térmicos obtenidos por el modelo y el experimento para el material base AA5083 H-116. $y = 30$ mm

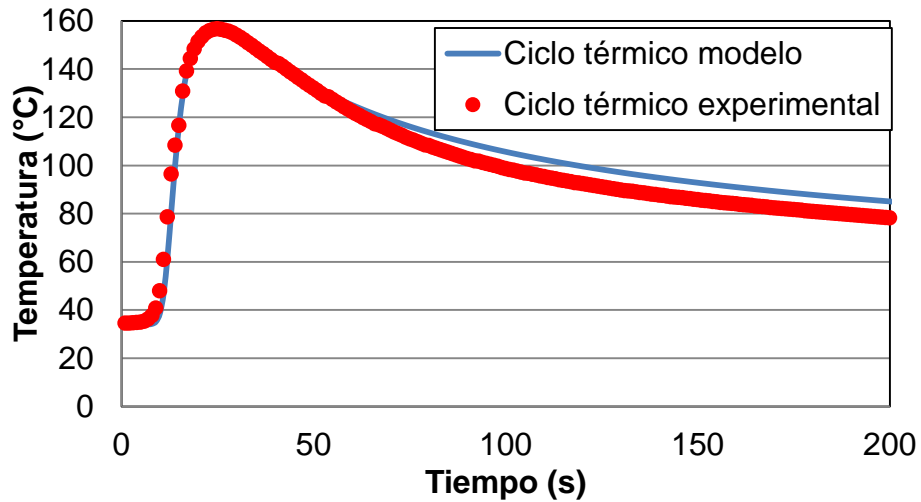


Tabla 30 Porcentaje de error para picos de temperatura obtenidos por el modelo y el experimento en AA 5083 H-116 para un $y = 30$ mm

Pico de temperatura (°C)		% de error
Modelo	Experimento	
156	156	0

4.4.2 Comparación de los ciclos térmicos del modelo vs experimento con material base AISI 430 y AISI 316L y proceso de soldadura SMAW disímil.

Los ciclos térmicos obtenidos por el modelo y el experimento para el acero AISI 430 son mostrados en la Figura 69. El punto de análisis se encuentra ubicado a 0,68 mm de la línea de fusión. Los picos de temperatura y las tasas de enfriamiento son presentados en la Tabla 31 y la Tabla 32, respectivamente. La evaluación de las tasas de enfriamiento se hizo para un intervalo de 800 – 500 °C.

Figura 69 Comparación de los ciclos térmicos obtenidos por el modelo y el experimento para el material base AISI 430.

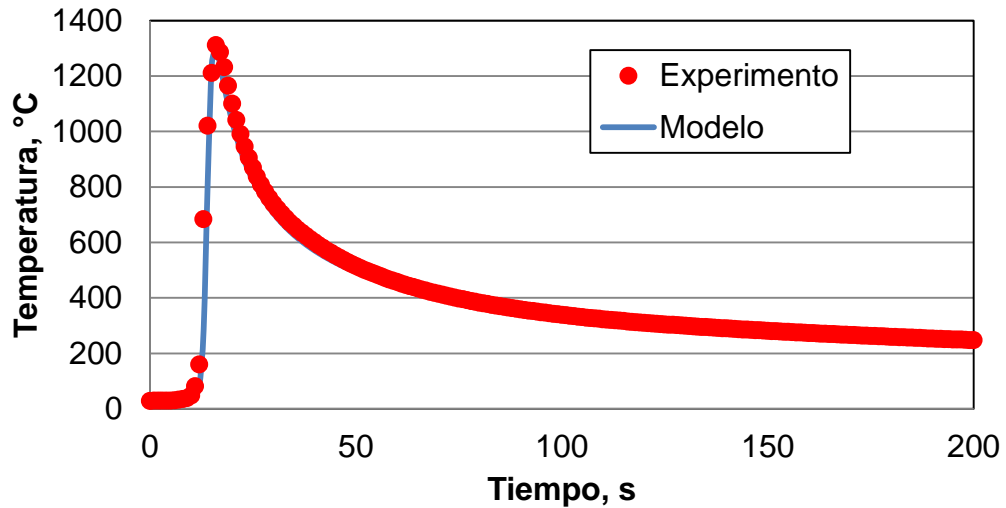


Tabla 31 Porcentaje de error para picos de temperatura obtenidos por el modelo y el experimento en AISI 430. $y=0,68$ mm

Pico de temperatura (°C)		% de error
Modelo	Experimento	
1300	1311	0,83

Tabla 32 Porcentaje de error para tasas de enfriamiento obtenidos por el modelo y el experimento en AISI 430. $y=6,8 \times 10^{-4}$ m

Tasa de enfriamiento (°C*s ⁻¹)		% error
Modelo	Experimento	
12,54	12,03	4,18

Para el material base AISI 316l, la comparación de los ciclos térmicos calculados es mostrado en la Figura 70. Los picos de temperatura y tasas de enfriamiento se muestran en la Tabla 33 y la Tabla 34, respectivamente. Para las tasas de enfriamiento se trabajó en el intervalo de 800 – 500 °C.

Figura 70 Comparación de los ciclos térmicos obtenidos por el modelo y el experimento para el material base AISI 316L. $y = 9,3 \times 10^{-4}$ m

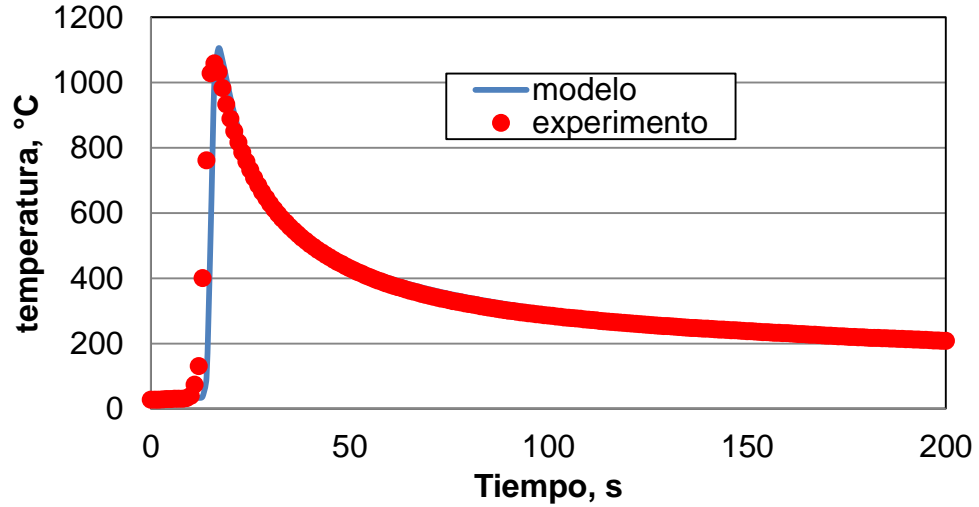


Tabla 33 Porcentaje de error para picos de temperatura obtenidos por el modelo y el experimento en AISI 316L para un $y = 0,93$ mm

Pico de temperatura (°C)		% de error
Modelo	Experimento	
1104	1058	4,34

Tabla 34 Porcentaje de error para tasas de enfriamiento obtenidos por el modelo y el experimento en AISI 316L para un $y = 0,93$ mm

Tasa de enfriamiento (°C*s ⁻¹)		% error
Modelo	Experimento	
16,79	16,42	2,24

Un análisis de un punto más alejado de la línea de fusión es mostrado en la Figura 71. El punto está ubicado a 6,2 mm de la línea de fusión y el material base es el AISI 316L. Los picos de temperatura son mostrados en la Tabla 35.

Figura 71 Comparación de los ciclos térmicos obtenidos por el modelo y el experimento para el material base AISI 316L. $y = 6,2$ mm

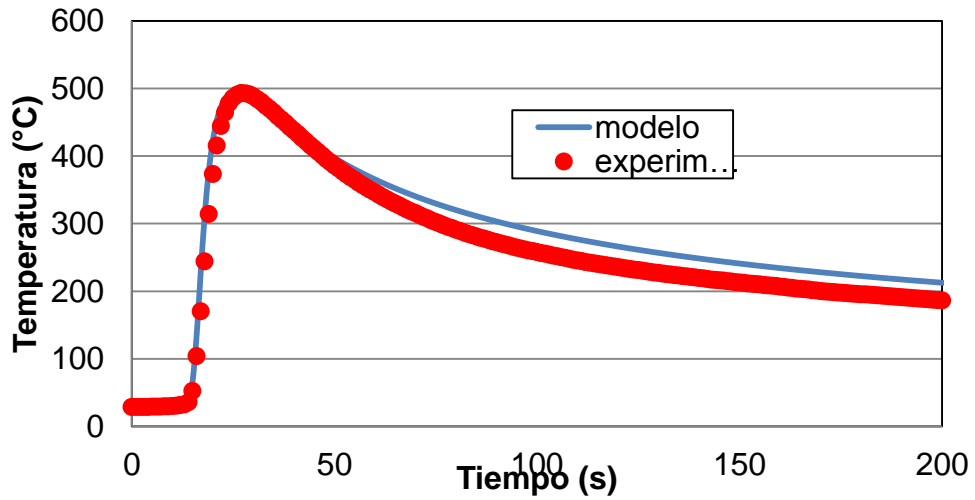


Tabla 35 Porcentaje de error para picos de temperatura obtenidos por el modelo y el experimento en AISI 316L para un $y = 6,2$ mm

Pico de temperatura (°C)		% de error
Modelo	Experimento	
495	492	0,60

Nótese que las tasas de enfriamiento calculadas por el modelo desarrollado para los aceros se ajustan más a las medidas experimentales. Esto ocurre por la difusividad térmica reducida que tiene frente a otros metales, producto de su estructura cristalina y propiedades físicas, que no representa un cambio significativo sobre el cálculo de las tasas de enfriamiento [53].

4.4.3 Comparación de resultados del modelo con otros Autores: análisis estadístico

La Tabla 36 muestra los picos de temperatura obtenidos por el modelo y experimento de la referencia [45], son comparados con los resultados del modelo desarrollado que fue alimentado con los parámetros de soldadura, propiedades y dimensiones de la placa de dicha referencia.

Tabla 36 Conjunto de datos obtenidos por el modelo desarrollado y la referencia

Posición	modelo Propuesto	Modelo [45]	Experimento [45]
7,5 mm	803 °C	800 °C	750 °C
12,5 mm	579 °C	610 °C	570 °C
17,5 mm	455 °C	500 °C	450 °C

A partir de estos resultados se realizaron los análisis de datos no censurados para determinar la distribución normal para cada conjunto de datos. De los datos obtenidos por el modelo propuesto se muestra en la Figura 72 el grafico de histograma, evidenciándose una distribución normal para un intervalo de confianza de 95%. Esto es comparable con la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov que se muestra en la Tabla 37 el cual permite definir con un valor de P de 0,9947 y un intervalo de confianza del 95% que los picos de temperatura para el modelo desarrollado presentados describen una distribución normal.

Figura 72 Histograma para modelo propuesto

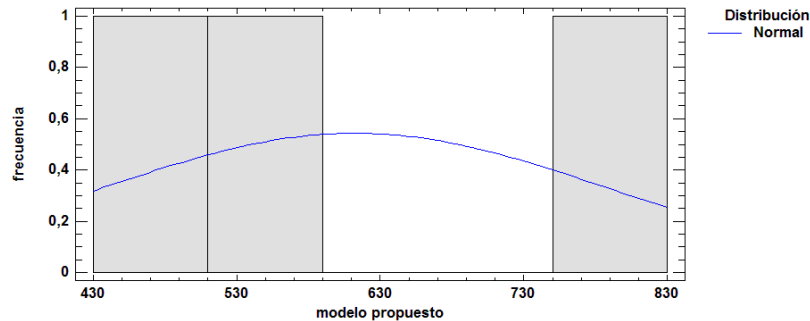


Tabla 37 Pruebas de Bondad de Ajuste para modelo propuesto

	<i>Normal</i>
DMAS	0,241618
DMENOS	0,193487
DN	0,241618
Valor-P	0,994774

De igual manera se determinó el gráfico de histogramas y la prueba de bondad de ajuste para el modelo y el experimento presentado por la referencia [45]. La figura 72 muestra el gráfico de histogramas para el modelo y el experimento evidenciando una distribución normal para ambos conjuntos de datos.

Ahora, esto es confirmado a través de la Tabla 38 y la Tabla 39 donde los valores de P ambos con intervalos de confiabilidad del 95% permiten confirmar que los conjuntos de datos poseen una distribución normal. Ahora, que se conoce que todos los conjuntos de datos cumplen una distribución normal, entonces se procede analizar la comparación de conjuntos de datos para establecer si pertenecen a una misma población.

Figura 73 a) Histogramas para el modelo de la referencia, b) Histograma para el experimento de la referencia

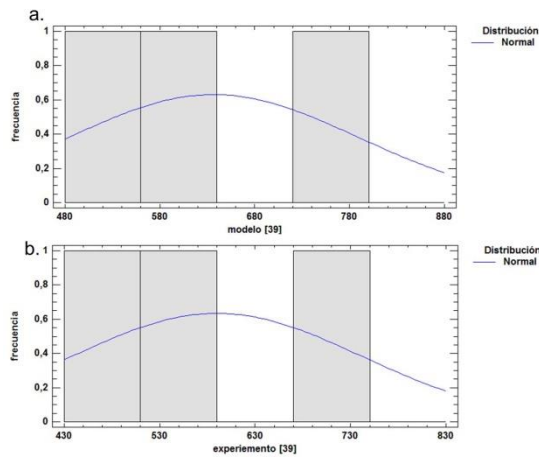


Tabla 38 Prueba de bondad de ajuste para modelo de la referencia [46]

	Normal
DMAS	0,236407
DMENOS	0,192417
DN	0,236407
Valor-P	0,996098

Tabla 39 Prueba de bondad de ajuste para experimento de la referencia [46]

	Normal
DMAS	0,236407
DMENOS	0,192417
DN	0,236407
Valor-P	0,996098

Para el primer análisis estadístico se compararon el conjunto de datos obtenidos por el modelo desarrollado y el conjunto de datos del modelo propuesto en la referencia. La Figura 74 muestra el histograma de los datos, evidenciando una relación de datos que acompañado del análisis de comparación de medias mostrado en la Tabla 40 para un intervalo de confianza del 95% obtiene un valor de P igual a 0,8650, lo que permite establecer que no existe una diferencia significativa entre el conjunto de datos analizado. Esto es confirmado con el gráfico de caja y bigotes como se muestra en la Figura 75, definiendo que los datos de los picos de temperatura obtenidos por el modelo desarrollado y el modelo propuesto pertenecen a una misma población, validando de esta manera el modelo desarrollado.

Figura 74 Histograma de los datos obtenidos por el modelo desarrollado y el modelo propuesto por la referencia

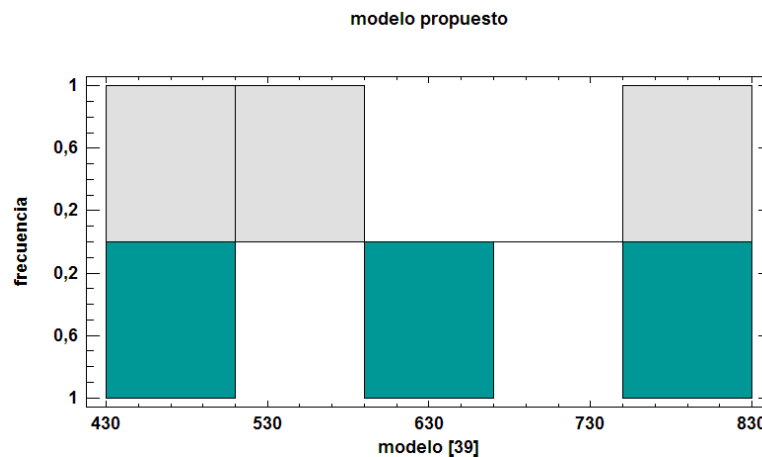
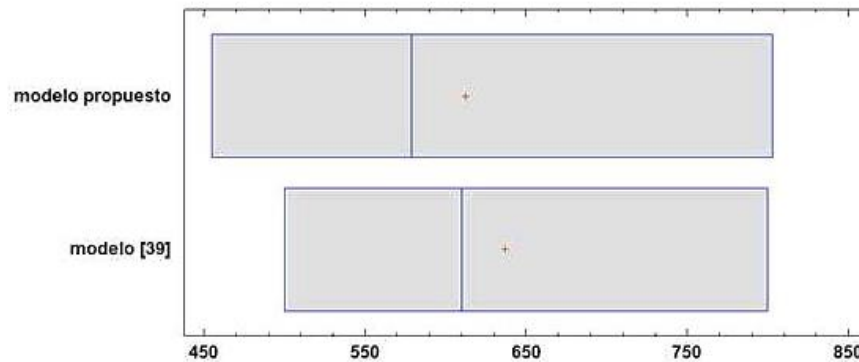


Tabla 40 Comparación de medias para el modelo desarrollado y el modelo de la referencia

	Modelo propuesto	Modelo referencia
Intervalo de confianza: 95%	[174,185, 1050,48]	[259,656, 1013,68]
Intervalo de confianza: 95% para diferencia de medias	[-397,325, 348,659]	
Valor - P	0,865072	
No se rechaza la hipótesis para valor de alfa	0,05	

Figura 75 Diagrama de barras y bigotes para análisis de comparación del modelo desarrollado vs modelo propuesto



Para el segundo análisis, se tomaron el conjunto de datos del modelo desarrollado y el modelo experimental de la referencia. El análisis de los datos presentados en el histograma que se muestra en la Figura 76 evidencia una relación de los datos que soportado con la comparación de medias calculados para un intervalo de confianza del 95% mostrado en la Tabla 41 obtiene un valor de P de 0,8757 lo que permite definir que los conjuntos de datos pertenecen a una misma población. La relación de los datos se aprecia también a través del grafico de cajas y bigote como se muestra en la Figura 77

Figura 76 Histograma del modelo desarrollado vs el experimento

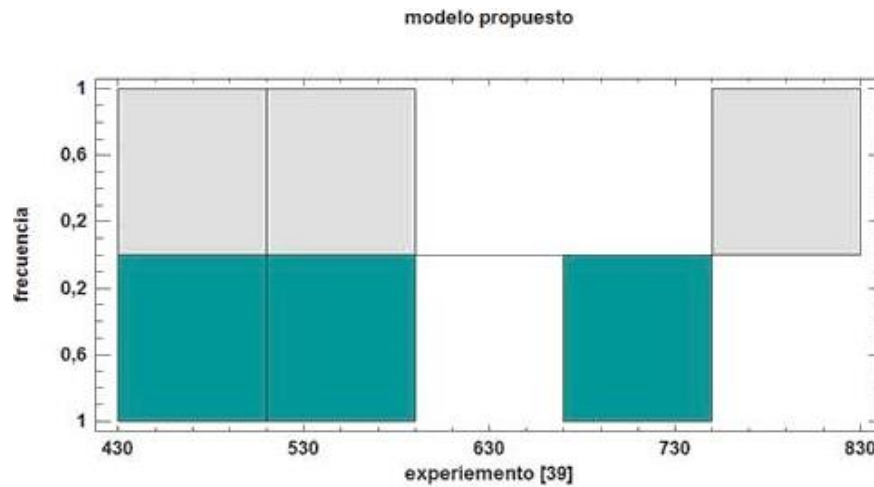
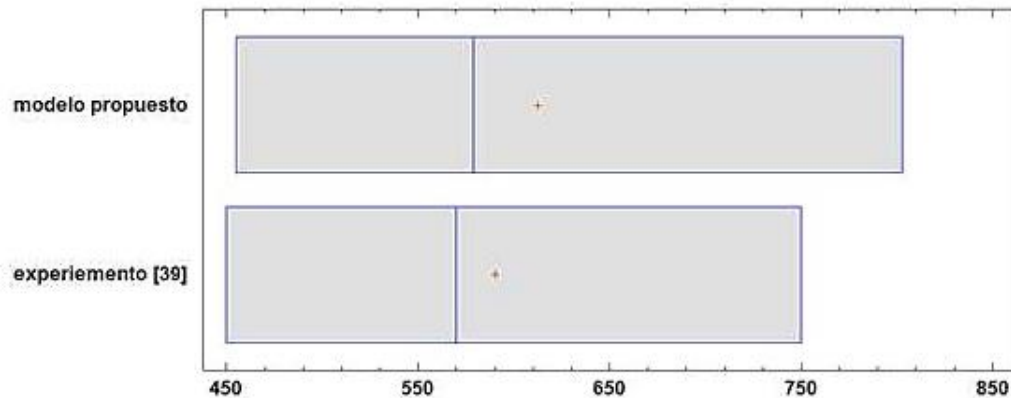


Tabla 41 Comparación de medias para el modelo desarrollado y el experimento de la referencia

	Modelo propuesto	Experimento referencia
Intervalo de confianza: 95%	[174,185, 1050,48]	[214,903, 965,097]
Intervalo de confianza: 95% para diferencia de medias	[-349,854, 394,521]	
Valor - P	0,875765	
No se rechaza la hipótesis para valor de alfa	0,05	

Figura 77 Diagrama de cajas y bigotes para el modelo desarrollo vs experimento referencia



De los conjuntos de datos analizados se muestra que los resultados siguen una distribución normal y que pertenecen a una misma población, de esta manera se comprueba la validez del modelo con la referencia [45].

El modelo desarrollado también fue comparado con la referencia [46]. Los datos analizados son presentados en la Tabla 42.

Tabla 42 Conjunto de datos obtenidos por el modelo y la referencia [46]

Posición	modelo Propuesto	Modelo [46]	Experimento [46]
4 mm	407,02	397,6	402,5
8 mm	314	317,2	327,2
16 mm	226,74	276,7	285,8

Se comprobó la distribución normal para cada conjunto de datos, obteniendo valores de P mayores de 0,05. Conociendo la distribución normal se analizó el conjunto de datos para determinar si los resultados obtenidos por el modelo desarrollado pertenecen a la misma población de los resultados obtenidos por la referencia. Usando análisis de dos muestras se determinó a través de la prueba de bondad y en conjunto con los histogramas que los datos pertenecen a una misma población. Los valores de P para cada conjunto de datos fueron superiores a 0,05. Las tablas de ajuste de bondad, histogramas y gráficos de caja y bigote de los análisis de datos censurados y comparación de muestras son presentadas en los anexos.

5. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos y la discusión realizada en este trabajo se puede concluir que:

El modelo de distribución de temperaturas presentado en este trabajo funciona satisfactoriamente para diferentes materiales de base y procesos de soldadura al arco eléctrico. El modelo desarrollado usando las herramientas computacionales y su integración a la interfaz gráfica de Histosold® permite obtener de manera inmediata y sin alta demanda de capacidad de procesamiento de datos los ciclos térmicos en juntas soldadas con procesos de soldadura al arco eléctrico.

El problema de singularidad asociado al modelo inicial de Rosenthal, fue plausiblemente solucionado a través de la integración de los parámetros r_b y y_0 . Usando estos parámetros el modelo quedó definido en la zona afectada térmicamente, teniendo como frontera la línea de fusión. El parámetro r_b depende de la entrada de calor y las propiedades del material, esencialmente la difusividad térmica; y_0 es dependiente de r_b .

El modelo desarrollado permite recrear los ciclos térmicos y las temperaturas pico con una diferencia porcentual inferior al 6% comparada con las pruebas experimentales. El análisis estadístico comparativo entre los resultados experimentales propios y de otros autores con los obtenidos por medio del modelo desarrollado en este trabajo mostro una relación de confiabilidad del 95% ajustándose de manera exitosa.

Las tasas de enfriamiento calculadas por el modelo desarrollado presentan un buen ajuste con diferencias porcentuales de 3% para metales como el acero cuya difusividad térmica es menor comparada con metales como el aluminio donde se obtuvo errores de un 20% con respecto a medidas experimentales.

Los resultados comparativos entre el modelo desarrollado y las medidas experimentales son afectados por la localización de los termopares. Por tal motivo

es necesario tener en cuenta dos cosas, la dilución para determinar su ubicación relativa y la región de contacto del termopar con la zona donde se determinará el ciclo térmico

6. RECOMENDACIONES Y SUGERENCIAS DE TRABAJOS FUTUROS

- [1] Extender el uso del modelo de distribución de calor presentado en este trabajo para procesos de soldadura que no requieran de fusión del material, como el caso de soldadura por fricción - agitación. Para esto, se puede considerar como condición de frontera para el límite del cordón de soldadura un porcentaje de la temperatura de fusión del material base.
- [2] Determinar las ecuaciones que rigen el comportamiento de los parámetros r_b y y_0 , considerando como parámetros para el cálculo de r_b la entrada del proceso de soldadura y la difusividad térmica del material. Esto permitirá obtener con mayor precisión los ciclos térmicos para un material base específico sin el uso de iteraciones.
- [3] Establecer dentro del modelo desarrollado una ecuación que permita describir el cambio de la conductividad térmica en función de la temperatura. Establecer una función para ingresar esa información al código de programación. De esta manera se mejorará las tasas de enfriamiento obtenidas en los ciclos térmicos para materiales cuya conductividad térmica es elevada, como el caso de las aleaciones de aluminio.
- [4] Establecer una condición en la programación para comparaciones de medidas experimentales que considere la región de contacto del termopar para la medida del ciclo térmico. Esto permite determinar con mayor precisión los ciclos térmicos.

BIBLIOGRAFIA

- [1] E. J. W., A. S. M. y E. T. W., «Microstructural development during solidifaction of stainless steel alloys,» *Metallurgical Transactions A*, 1989.
- [2] Y. R. Wang J., J. C. Feng y Z. D. Zhang, «Microstructure characteristics of resistance spot welds of AZ31 Mg alloy,» *Science and Technology of Welding and Joining*, 2013.
- [3] S. Tosto, F. Nenci y J. Hu, «Microstructure and properties of electron beam welded and post weld 2219 aluminium alloy,» *Material Science and Technology*, 1996.
- [4] J. Z. Chen y D. F. Farson, «Analytical modeling of heat conduction for small scale resistance spot welding process,» *Journal of Materials Processing Technology*, 2006.
- [5] K. S. Kumar, «Analytical modeling of temperature distribution, peak temperature, cooling rate and thermal cycles in a solid work piece welded by laser welding process,» *Procedia Materials Science*, 2014.
- [6] H. Vemanaboina, S. Akella y K. Buddu, «Welding process simulation model for temperature and residual stress analysis,» *Procedia materials science*, 2014.
- [7] A. N. Sekhar Badu y L. Kishore T., «Finite element simulation of hibrid welding process of welding 304 austenitic stainless steel plate,» *International journal of research in engineering and technology*, 2012.
- [8] D. Alves do Carmo y A. Rocha de Faria, «2D finite element with through the thickness parabolic temperature distribution for heat transfer simulations including welding,» *Finite elements in analysis and desing*, 2015.
- [9] D. Rosenthal, «The theory of moving sources of heat and its application to metal treatment,» *Trans. ASME* , 1946.
- [10] American Welding Society, Standar welding terms and definitions, Miami, 2009.
- [11] L. F. Jeffus, *Welding: Principles and applications*, Cengage Learning, 2002.

- [12] Soldexa, Manual de soldadura & catalogos de productos, Lima - Perú, 2011.
- [13] R. Messler, Joining of materials and structures from pragmatic process to enabling technology, New York, 2004.
- [14] S. Kou, Welding Metallurgy, New Jersey, 2002.
- [15] O. Grong, Metallurgical modeling of welding, London, 1994.
- [16] J. Robert W. Messler, Principles of welding process, physics, chemistry, and metallurgy, New York, 2004.
- [17] C. M. J. Adams, Weld. J., vol. 37, 1958, p. 210s.
- [18] ASM International, ASM Handbook: Welding, Brazing and Soldering, vol. 6, 1993.
- [19] D. B. Darmadi, J. Norrish y A. Kiet Tieu, «Analytic and finite element solutions for temperature profiles in welding using varied heat source models,» *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2011.
- [20] H. S. Carslaw y J. C. Jaeger, Conduction of heat in solid, Oxford: Clarendon Press, 1959.
- [21] M. J. Attarha y I. Sattari-Far, «Study on welding temperature distribution in thin welded plates through experimental measurements and finite elements simulation,» *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 688 - 694, 2011.
- [22] A. M. Malik, E. M. Qureshi, N. Ullah Dar y I. Khan, «Analysis of circumferentially arc welded thin-walled cylinders to investigate the residual stress fields,» *Thin-Walled Struct.*, vol. 46, pp. 1391 - 1401, 2008.
- [23] R. N. Fassani y O. V. Trevisan, «Analytical modeling of multipass welding process with distributed heat source,» de *15th Brazilian congress of mechanical engineering*, Sao Paulo, 2002.
- [24] S. R.N., *Solucao Analitica para distribuicao de temperatura no processo de soldagem MIG com múltiplos passes*, Sao Paulo, 1996.

- [25] Z. Han, J. Orozco, J. E. Indacochea y C. H. Chen, «Resistance spot welding : a heat transfer study,» *Welding Journal*, vol. 68, pp. 363s - 371s, 1989.
- [26] S. Kou y Y. H. Wang, «Weld pool convection and its effect,» *Welding Journal*, vol. 65, pp. 63s - 70s, 1986.
- [27] T. Zacharia, A. H. Eraslan, D. K. Aidun y S. A. Davi, «three dimensional transient model for arc welding process,» *Metallurgical transactions B*, vol. 20B, pp. 645 - 659, 1989.
- [28] C. S. Wu, «Computer simulation of three-dimensional convection in traveling MIG weld pools,» *Engineering computations*, vol. 9, pp. 529 - 537, 1992.
- [29] K. Poorhaydari, B. M. Patchett y D. G. Ivey, «Estimation of cooling rate in the welding of plate with intermediate thickness,» *Supplement to the welding Journal*, pp. 149s - 155 s, 2005.
- [30] D. Deng y H. Murakawa, «Numerical simulation of temperature field and residual stress in multipass welds in stainless steel pipe and comparison with experimental measurements,» *Computational Materials Science*, vol. 37, pp. 269 - 277, 2006.
- [31] J. Goldak, A. Chakravarti y M. Bibby, «A new finite element model for welding heat source,» *Metallurgical Transactions B*, vol. 15, pp. 299 - 305, 1984.
- [32] M. E. Olmos Molinares, «Efecto de los ciclos térmicos sobre la microestructura de la zona afectada térmicamente de juntas soldadas de aceros inoxidables disímiles obtenidas por el proceso SMAW,» Barranquilla, 2014.
- [33] E. E. Niebles Nuñez, «Influencia del Aporte Térmico en la Soldabilidad de la Aleación AA5083 – H 116 con Proceso GMAW-P automatizado,» Barranquilla, 2014.
- [34] Automation Creations, «Matweb,» 2011. [En línea]. Available: www.matweb.com. [Último acceso: 10 12 2014].
- [35] A. G. Montero, «fisica.unav.es,» 20 mayo 2005. [En línea]. Available:

- http://fisica.unav.es/~angel/smad_2005_c.pdf. [Último acceso: 22 12 2014].
- [36] K. Uchida, S. Takahashi, K. Harii, J. Ieda, W. Koshibae, K. Ando, S. Maekawa y E. Saitoh, «Observation of the spin Seebeck effect,» *Nature international weekly journal of science*, nº 455, pp. 778 -789, 2008.
- [37] J. Jensen, «Ametek test & calibration instruments,» 13 09 2004. [En línea]. Available: www.ametekcalibration.com. [Último acceso: 25 02 2015].
- [38] UltiMachine, «UltiMachine,» [En línea]. Available: <https://ultimachine.com/content/30-awg-insulated-thermocouple-0>. [Último acceso: 2015 01 10].
- [39] «National Instrument,» [En línea]. Available: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/209414>. [Último acceso: 21 12 2014].
- [40] National Instrument, «National Instrument,» [En línea]. Available: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/208990>. [Último acceso: 11 12 2014].
- [41] National Instrument, «National Instrument,» [En línea]. Available: <http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-12742>. [Último acceso: 11 12 2014].
- [42] C. L. Tsai y u. s. d. a. d. center, «Heat Flow in Fusio Welding,» *ASM International*, vol. 6, pp. 7 - 18, 2011.
- [43] M. Abramowitz y I. A. Stegun, Handbook of Mathematical Function with Formulas, Graphs, and Mathmetical tables, Washintong D.C, 1964.
- [44] Mathworks, «es.mathworks.com,» 1984. [En línea]. Available: http://es.mathworks.com/products/matlab/features.html#programming_algorithm_development. [Último acceso: 22 12 2014].
- [45] M. Gaoyang, W. Yanhong, Z. Xianohong, G. Cheng y Y. Fengyi, «A coupled thermal and metallurgical model for welding simulation of Ti-6Al-4V alloy,» *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 214, pp. 2434 - 2443, 2014.
- [46] T. Zhang, Z. Zheng y R. Zhao, «A dynamic welding heat source model in

- pulsed current gas tungsten arc welding,» *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 213, pp. 2329 - 2338, 2013.
- [47] J. Ángel A, M. Sedano y A. Vila, «<http://www.uoc.edu/>,» [En línea]. Available: http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/Distrib_Normal.pdf. [Último acceso: 10 01 2015].
- [48] C. M. Grinstead y J. L. Snell, «Introduction to Probability,» 2003.
- [49] statgraphics, «<http://www.statgraphics.net/>,» 14 9 2006. [En línea]. Available: [http://www.statgraphics.net/wp-content/uploads/2011/12/tutoriales/Ajustando%20Distribucion%20\(Datos%20No%20Censurados\).pdf](http://www.statgraphics.net/wp-content/uploads/2011/12/tutoriales/Ajustando%20Distribucion%20(Datos%20No%20Censurados).pdf). [Último acceso: 10 01 2015].
- [50] E. Diaz Cedre, A. Cruz Crespo, F. Ramos Morales, M. Tello Rico, J. Chaparro Gonzales, M. Rodriguez Perez, J. A. Pozo Morejon y N. M. Perez Pino, «Influencia de la cantidad de O₂ adicionando al CO₂ en el gas de protección sobre la microestructura del metal depositado en uniones soldadas de bordes rector en aceros de bajo contenido de carbono con el proceso GMAW,» *Soldag. insp.*, vol. vol. 15, nº 4, pp. 281 - 288, 2010.
- [51] J. L. Pacheco Yepes y J. Unfried Silgado, «Histosold». Colombia Patente 1-2015-11333, 18 02 2015.
- [52] K. Suresh Kumar, «Analytical Modeling of Temperature Distribution, Peak Temperature, Cooling Rate and Thermal Cycles in a Solid Works Piece Welded by Laser Welding Process,» *Procedia Materials Science*, vol. 6, pp. 821 -834, 2014.
- [53] A. A. Bhatti, Z. Barsoum, H. Murakawa y I. Barsoum, «Influence of thermo-mechanical material properties of different steel grades on welding residual stresses and angular distorsion,» *Materials and Design*, vol. 65, pp. 878 - 889, 2015.

ANEXOS

Anexo A: Análisis Estadístico Datos Comparados Con Otros Autores

A través del gráfico de histograma mostrado en la Figura 78 obtenido por el modelo desarrollado y en conjunto con la Tabla 43 de prueba de bondad de ajuste muestra que los datos presentan una distribución normal para un intervalo de confianza del 95%.

Figura 78 Histograma del modelo desarrollado para determinar la distribución normal de datos

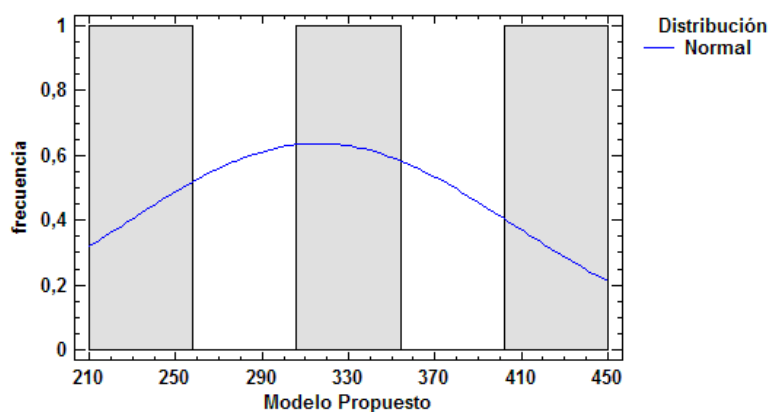


Tabla 43 Prueba de ajuste de bondad para datos obtenidos por el modelo desarrollado

	Normal
DMAS	0,175165
DMENOS	0,177201
DN	0,177201
Valor-P	0,999983

Para los datos del modelo y experimento de la referencia se presenta en la Figura 79 los histogramas obtenidos y en conjunto con el análisis de prueba de bondad de ajuste mostrado en la Tabla 44 se establece que los conjuntos de datos poseen

una distribución normal con intervalo de confianza del 95%. Los valores de P obtenidos para el modelo y el experimento son 0,9910 y 0,9945, respectivamente.

Figura 79 Histograma del modelo y experimento de la referencia [46]

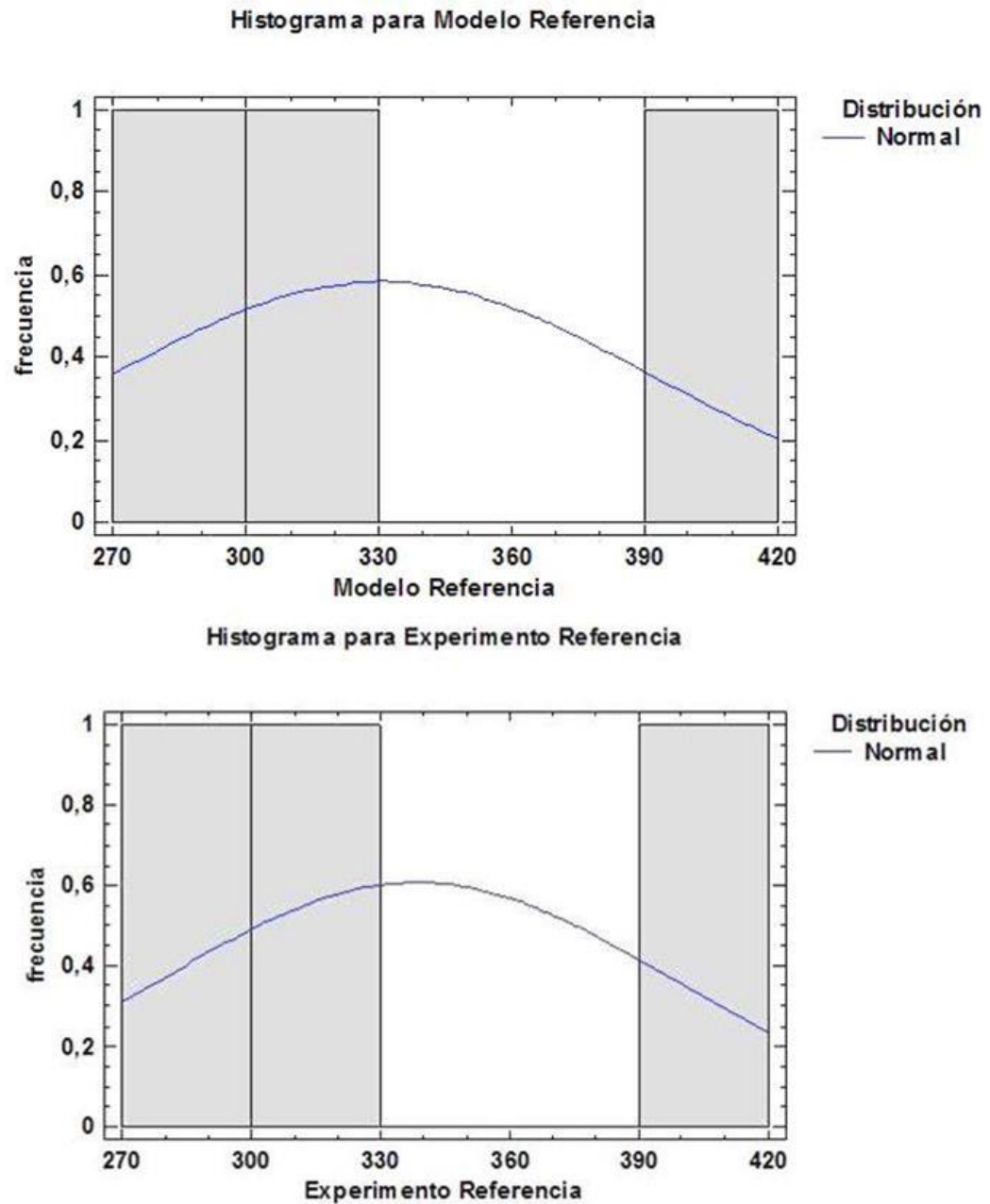


Tabla 44 Prueba de ajuste de bondad para el modelo y experimento de la referencia [46]

Prueba de Kolmogorov – Smirnov. Modelo referencia	
DMAS	0,252225
DMENOS	0,195563
DN	0,252225
Valor - P	0,991059
Prueba de Kolmogorov – Smirnov Experimento referencia	
DMAS	0,242403
DMENOS	0,193646
DN	0,242403
Valor - P	0,994548

La Figura 80 muestra el histograma para el modelo desarrollado y el modelo de la referencia y la Figura 81 muestra el gráfico de caja y bigotes. La Tabla 45 muestra la comparación de medias obtenidas para el modelo desarrollado y el modelo de al referencia.

Figura 80 Histograma del modelo desarrollado vs el modelo de la referencia [46]

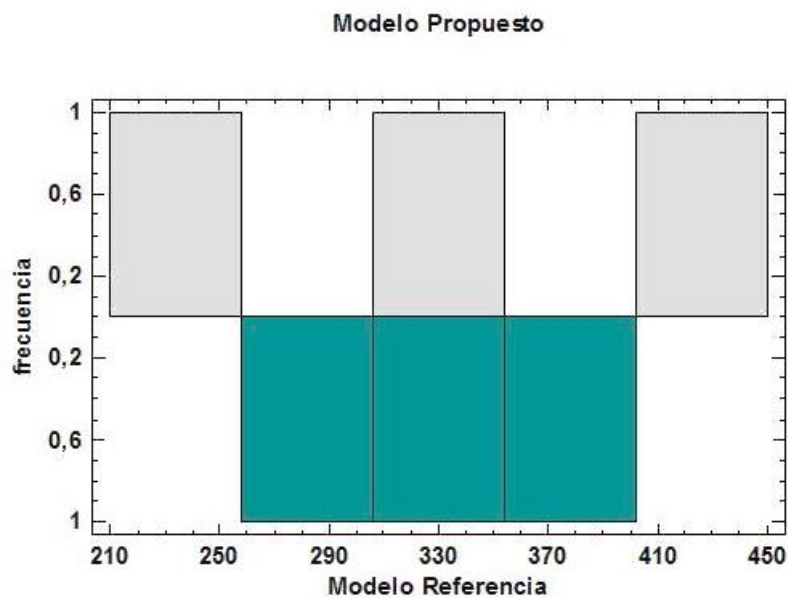


Figura 81 Grafico de caja y bigotes para análisis del modelo desarrollado y la referencia [46]

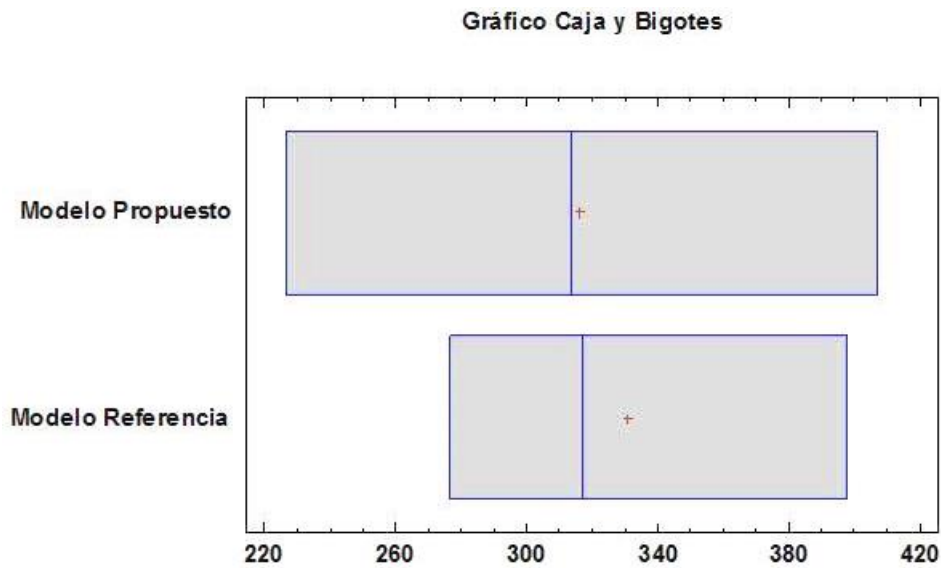


Tabla 45 Comparación de medias para el modelo desarrollado y el modelo de la referencia [46]

	Modelo propuesto	Modelo referencia
Intervalo de confianza: 95%	[91,9617, 539,878]	[177,632, 483,368]
Intervalo de confianza: 95% para diferencia de medias	[-189,554, 160,394]	
Valor - P	0,828394	
No se rechaza la hipótesis para valor de alfa	0,05	

La Figura 82 muestra el histograma para el modelo desarrollado y el modelo de la referencia y la Figura 83 muestra el gráfico de caja y bigotes. La Tabla 45 muestra la comparación de medias obtenidas para el modelo desarrollado y el modelo de referencia.

Figura 82 Histograma de la comparación del modelo desarrollado y el experimento de la referencia [46]

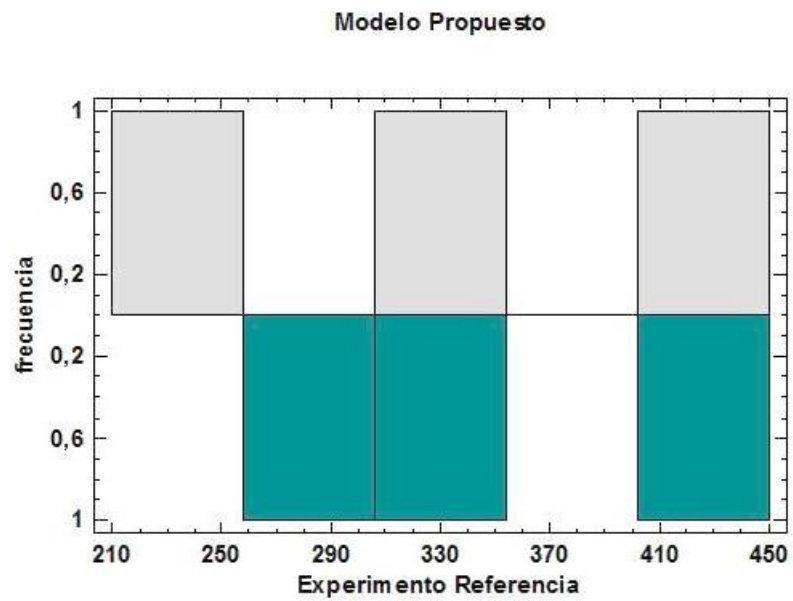


Figura 83 Grafico de caja y bigote para el modelo desarrollado y la referencia [46]

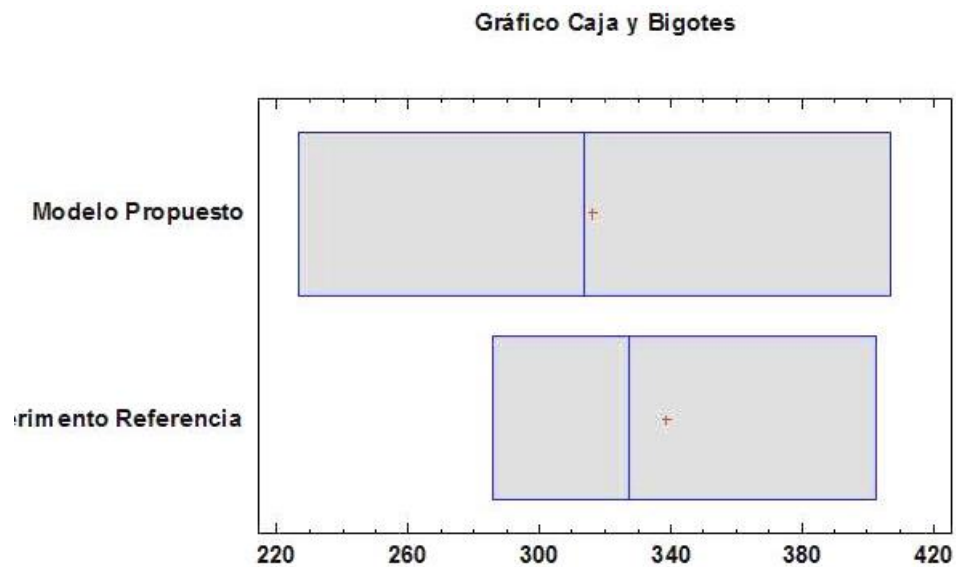


Tabla 46 Comparación de medias para el modelo desarrollado y el experimento de la referencia [46]

	Modelo propuesto	Experimento referencia
Intervalo de confianza: 95%	[91,9617, 539,878]	[191,526, 485,474]
Intervalo de confianza: 95% para diferencia de medias	[-195,439, 150,279]	
Valor - P	0,735196	
No se rechaza la hipótesis para valor de alfa	0,05	

Anexo B. Medidas de Temperaturas Obtenidas Experimentalmente AA 5083 – H116

En la tabla 47 se muestra los picos de temperatura obtenidos en la medida experimental por cada uno de los termopares. Nótese, que para las medidas más cercanas el termopar 1 presento una medida de temperatura más baja que el termopar 2, por tal motivo, se consideró la medida alcanzada por el termopar 2.

Las medidas de los termopar 3 y 4 presentaron errores en la medición, es notable los errores cuando son comparados con las máximas temperaturas alcanzadas por puntos más lejanos como el caso de los termopares 5 y 6.

Tabla 47 Relación de todas las medidas de temperatura obtenidas de manera experimental para la junta de AA 5083 H 116

Termopar	Medida a la línea de fusión	Temperatura máxima alcanzada
1	2,1 mm	293 °C
2	2,1 mm	456 °C
3	3,6 mm	206 °C
4	3,6 mm	215 °C
5	5,3 mm	361 °C
6	5,3 mm	366 °C
7	30 mm	156 °C

Anexo C. Medidas de Temperaturas Obtenidas Experimentalmente AISI 430 – AISI 316L

En la tabla 48 se muestra los picos de temperaturas obtenidos por los termopares en las juntas disimiles AISI 430 y AISI 316L. Para el material base AISI 316L la figura 84 muestra la relación de los ciclos térmicos obtenidos de manera experimental con el modelo para el termopar restante ubicado a 1,4 mm de la línea de fusión.

Los picos de temperatura alcanzados fueron 723 °C para el modelo y 777 °C para el experimento, dando un porcentaje de error de 6%. Para este caso, no se analizó la tasa de enfriamiento ya que las medidas de temperatura alcanzadas no llegan al intervalo establecido.

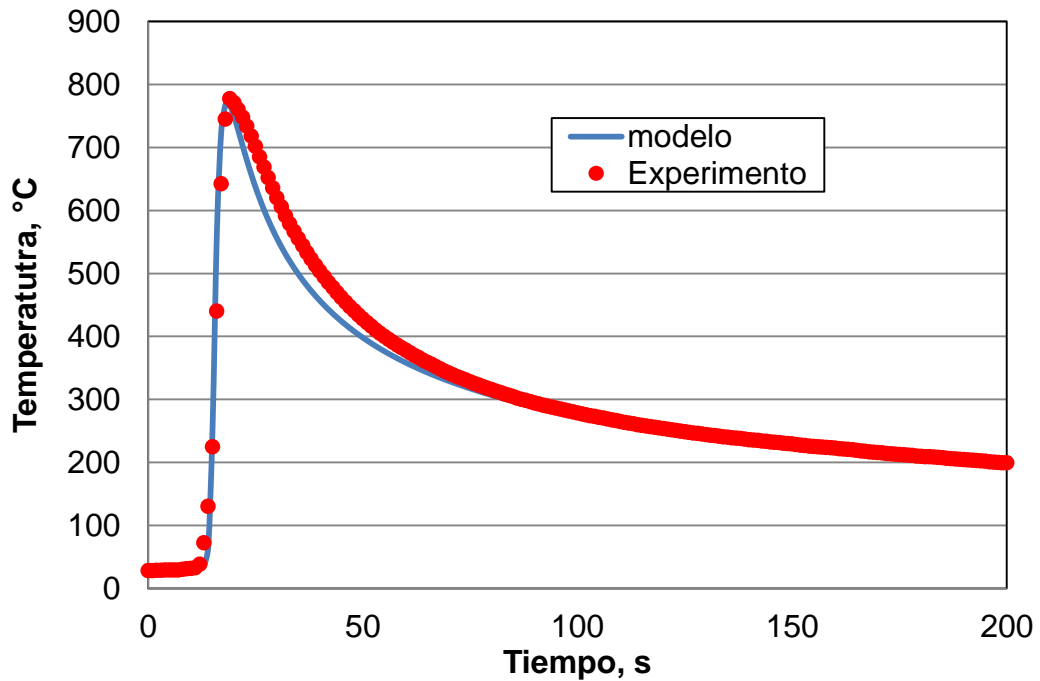
Tabla 48 Relación de todas las medidas de temperatura obtenidas de manera experimental para la junta de AA 5083 H 116

Material Base	Termopar	Medida a la línea de fusión	Temperatura máxima alcanzada
AISI 316L	1	0,93 mm	1062 °C
	2	1,4 mm	777 °C
	3	6,3 mm	492 °C
AISI 430	4	0,68 mm	1311 °C
	5	1,09 mm	772 °C
	6	5,96 mm	566 °C

Del material base AISI 430, se presenta la relación de los ciclos térmicos restantes. En la figura 85 se muestra la relación de los picos de temperatura obtenidos por el modelo y el experimento para el termopar ubicado 1,09 mm de la línea de fusión

Se evidencia muy claramente que la medida experimental presento un nivel de ruido que evito garantizar la medida de temperatura. La posible razón de este fenómeno, se explica por ausencia del aislante cerámico, lo que permitió que el campo electromagnético formado por el arco impidiera una buena lectura del termopar.

Figura 84 Ciclo térmico experimento vs modelo de la junta disímil AISI 316I. y = 1,4 mm de la línea de fusión



En la figura 86 se muestra la relación de los ciclos térmicos obtenidos por el modelo y el experimento para la posición de 6 mm medidos a la línea de fusión. Los picos de temperatura alcanzados para estos ciclos térmicos son de 604 °C por el modelo y 566 °C por el experimento, dando de esta manera un porcentaje de error de 8%. Debido a que las medidas de temperaturas alcanzadas no superan los 800°C para este caso, no se realiza el cálculo de las tasas de enfriamiento.

Figura 85 Ciclo térmico experimento vs modelo de la junta disímil AISI 430. $y = 1$ mm de la línea de fusión

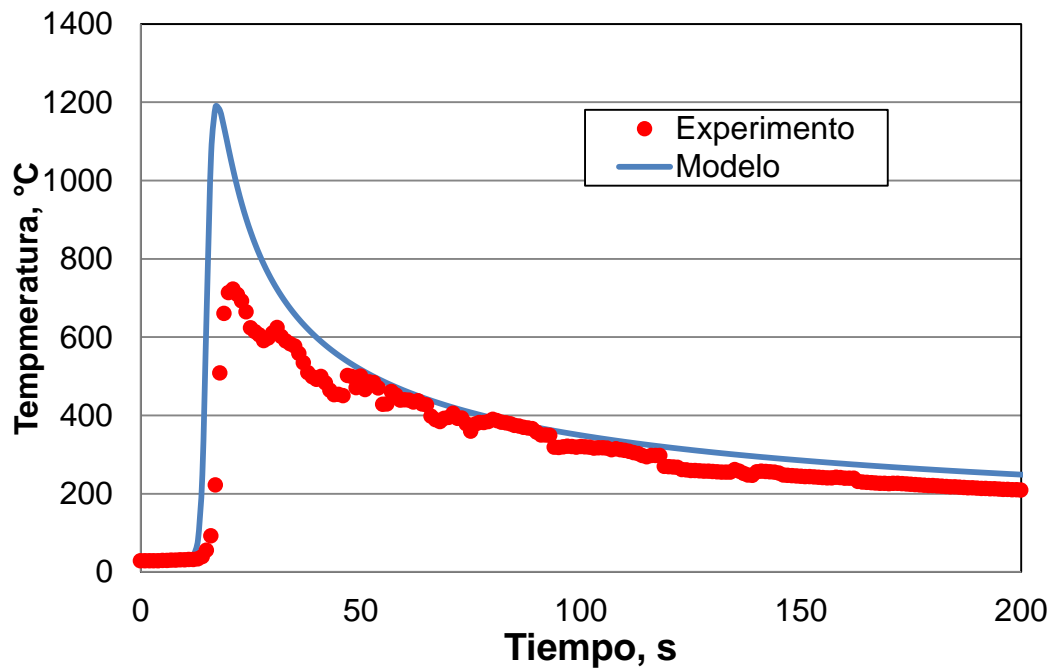


Figura 86 Ciclo térmico experimento vs modelo de la junta disímil AISI 430. $y = 6$ mm de la línea de fusión

