

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**PREDICCIÓN DE LA DISTORSIÓN DE PARTES SOLDADAS POR EL
PROCESO GMAW-P ROBOTIZADO MEDIANTE SOFTWARE DE
SIMULACIÓN**

POR

ESTUARDO RAYMUNDO RIVERA SÁNCHEZ

TESIS

**EN OPCIÓN COMO MAESTRO
EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

SALTILLO, COAHUILA, DICIEMBRE 2017

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**PREDICCIÓN DE LA DISTORSIÓN DE PARTES SOLDADAS POR EL
PROCESO GMAW-P ROBOTIZADO MEDIANTE SOFTWARE DE
SIMULACIÓN**

POR

ESTUARDO RAYMUNDO RIVERA SÁNCHEZ

TESIS

**EN OPCIÓN COMO MAESTRO
EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

SALTILLO, COAHUILA, DICIEMBRE 2017

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales

Gerencia de Desarrollo Humano

División de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la tesis **“PREDICCIÓN DE LA DISTORSIÓN DE PARTES SOLDADAS POR EL PROCESO GMAW-P ROBOTIZADO MEDIANTE SOFTWARE DE SIMULACIÓN”**, realizado por el alumno **ESTUARDO RAYMUNDO RIVERA SÁNCHEZ** con número de matrícula **15MS-044** sea aceptado para su defensa como Maestro en Tecnología de la Soldadura Industrial.

El Comité Tutorial

Dra. Gladys Yerania Pérez Medina

Tutor Académico

José Antonio Ferniza Flores

Tutor en Planta

Dra. Argelia Fabiola Miranda Pérez

Asesor

Dr. Eduardo Hurtado Delgado

Asesor

Vo.Bo.

Dr. Pedro Pérez Villanueva

Coordinador de Posgrado

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales

Gerencia de Desarrollo Humano

División de Estudios de Posgrado

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de Maestría del alumno **ESTUARDO RAYMUNDO RIVERA SÁNCHEZ**, una vez leído y revisada la Tesis titulada “**PREDICCIÓN DE LA DISTORSIÓN DE PARTES SOLDADAS POR EL PROCESO GMAW-P ROBOTIZADO MEDIANTE SOFTWARE DE SIMULACIÓN**”, aceptamos que la referida Tesis revisada y corregida, sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Maestro en Tecnología de la Soldadura Industrial durante la defensa de la tesis correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los 19 días de diciembre del 2017

**Dr. Francisco Fernando
Curiel López**
Presidente

**Dr. Felipe de Jesús
García Vázquez**
Secretario

**Dra. Gladys Yerania Pérez
Medina**
Vocal

AGRADECIMIENTOS

Mis sinceros agradecimientos al personal de COMIMSA que me proporcionó su apoyo para la realización de este trabajo tanto en la experimentación, en los laboratorios así como en asesoría, a lo largo de los periodos de estudio y desarrollo, mencionando a David Vargas, Claudia Morales, Leticia Rodriguez, Dr. Eduardo Hurtado, Leonardo Carrasco, incluyendo claro a mis compañeros de clase, y muy especialmente a mi tutora académica, Gladys Pérez por su gran apoyo.

De la misma forma, a Industrias John Deere por el soporte para llevar acabo la experimentación de este trabajo, sin su colaboración no hubiera sido posible materializarlo. También agradezco de forma particular a mi colaborador en la planta de IJD Loaders Ramos Arizpe, Martín Alvarado, educador del centro de entrenamiento de soldadura, por su participación y apoyo en el desarrollo de la experimentación de este trabajo.

Y en general a todos aquellos que han contribuido de forma directa e indirecta, a mis compañeros de trabajo, así como a Raul Arreola, Ex Gerente de Manufactura de Línea de Producto de Cargadoras Frontales, y a Carlos Guzmán, Gerente de Manufactura Estratégica, por el soporte y apoyo con recursos materiales y espacio de tiempo para atender la Maestría.

Por último, pero no menos importante, agradezco a mi esposa Blanca Mayo por su ayuda en la discusión, revisión y corrección de estilo del trabajo.

DEDICATORIAS

De forma muy especial dedico todo el tiempo invertido y el esfuerzo que ha demandado este trabajo a mi amada esposa, Blanca Mayo, por el generoso e incondicional apoyo para avanzar durante las jornadas laborales, de estudio, experimentación y elaboración de este documento.

También dedico este aprendizaje a mis queridos padres, Estela Sánchez Ríos y Raymundo Rivera Soto, y hermana, Blanca Estela Rivera, que siempre me han impulsado a mantener mi mente activa, creativa y productiva.

A ustedes muchas gracias por seguir siendo parte de este viaje.

ÍNDICE

SÍNTESIS	1
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	3
1.1. Antecedentes.....	3
1.2. Planteamiento del problema	4
1.3. Objetivos.....	5
1.3.1. Objetivo general	5
1.3.2. Objetivos específicos	5
1.4. Justificación	6
1.5. Aportación tecnológica	6
1.6. Definición de hipótesis.....	6
1.7. Límites del estudio.....	7
CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE	8
2.1. Soldadura por arco de gas metal.....	8
2.1.1. Proceso.....	8
2.2. Modos de transferencia	11
2.2.1. Corto circuito	11
2.2.2. Globular.....	12
2.2.3. Por rociado.....	13
2.2.4. Por rociado pulsado	13
2.3. Diseños de uniones en soldadura.....	14
2.4. Esfuerzos residuales y distorsión	17
2.4.1. Esfuerzos residuales	17

2.4.2.	Distorsión	22
2.5.	Sistemas de Simulación de distorsión y mecánica de soldadura computacional	26
2.5.1.	Métodos de modelación	28
2.5.2.	Proceso conceptual de la simulación	32
2.5.3.	Modelos de fuentes calor en simulación numérica.....	33
2.5.4.	Doble elipsoide de Goldak	34
2.5.5.	Discretización.....	36
2.5.6.	Futuro de la mecánica de soldadura computacional	39
2.5.7.	Software disponible	41
CAPÍTULO 3	METODOLOGÍA.....	46
3.1.	Metodología.....	46
3.1.1.	Diseño de Experimentos	47
3.1.2.	Experimentación Preliminar	48
3.1.3.	Calibración de la Simulación	48
3.1.4.	Simulación.....	49
3.1.5.	Experimentación Final.....	49
3.1.6.	Validación de la Simulación	50
3.2.	Diseño de Experimentos de Distorsión.....	50
3.2.1.	Variables de entrada	51
3.2.2.	Matriz de escenarios	51
3.2.3.	Geometría de parte de trabajo	52
3.2.4.	Materiales.....	55
3.2.5.	Variables de salida.....	56
3.2.6.	Aplicación y junta de soldadura.....	57
3.2.7.	Secuencia de aplicación de soldadura	58
3.2.8.	Preparación de las partes para medición de temperatura.....	59
3.2.9.	Proceso de soldadura	62
3.3.	Desarrollo del modelo de simulación vía software.....	62
3.3.1.	Originar geometría 3D de pieza	63
3.3.2.	Software de simulación de soldadura	63

3.3.3. Solución de escenarios del diseño de experimentos vía software de simulación.....	65
3.3.4. Equipo de Cómputo	66
3.4. Verificación de la validez del sistema virtual mediante experimentación de escenarios selectos.....	66
3.5. Determinación de margen de incertidumbre	66
CAPÍTULO 4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS	67
4.1. Resultados y Análisis.....	67
4.2. Temperaturas	69
4.3. Macroataque.....	74
4.4. Microdureza	75
4.5. Microestructura	77
4.6. Dimensional	80
CONCLUSIONES	83
RECOMENDACIONES	86
BIBLIOGRAFÍA.....	87
ÍNDICE DE TABLAS	91
ÍNDICE DE FIGURAS.....	92

SÍNTESIS

El presente trabajo fue realizado para analizar, comprender y predecir el comportamiento de la deformación que sufren partes de acero HSLA de componentes estructurales de maquinaria pesada y agrícola tras ser sometidas al proceso de soldadura por arco GMAW-P robotizado mediante una herramienta de software comercial de simulación basado en el método de elemento finito.

Para lograr dicho fin, el documento estudia los fundamentos del proceso de soldadura por arco de gas metal con el modo de transferencia de rociado pulsado, GMAW-P, así como de la distorsión y los esfuerzos residuales que lo provocan. Los principios de la simulación de soldadura mediante software, también conocido como mecánica de la soldadura computacional (CWM por su nombre en inglés) son estudiados, incluyendo usos futuros de esta tecnología, la discretización de las partes para la preparación de la simulación, el modelo matemático de la fuente de calor, así como la metodología que implica el proceso de una evaluación virtual como el descrito. También es incluido un análisis comparativo entre diversos software comerciales que son afines al estudio presente.

Finalmente, se realizó una simulación de soldadura sobre una pieza de dos componentes mediante el software comercial SYSWELD, apoyando la calibración del sistema y la posterior validación de los resultados de la predicción de distorsión con datos experimentales con la finalidad de comprobar la metodología así como establecer el margen de error y la confiabilidad del sistema.

Es pertinente acotar que el trabajo de simulación y experimentación se realiza sobre juntas de soldadura de bisel ensanchado.

PALABRAS CLAVE:

Simulación, CWM, distorsión, GMAW-P, bisel ensanchado, Sysweld.

CAMPO ESPECÍFICO:

Simulación de Distorsión.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

La industria de maquinaria agrícola, como tantas otras industrias de fabricación, se ve constantemente retada para ofrecer nuevos productos que satisfagan y excedan las expectativas de los usuarios, lo cual significa usualmente mejores prestaciones de los equipos, como lo es mayor eficiencia y desempeño, aumento en funcionalidad, y visualmente más estéticos. Las innovaciones de producto como respuesta a estas demandas también acarrearán cambios en los procesos de manufactura que los hacen posible.

Cada alteración a un proceso existente de manufactura o la implementación de uno nuevo lleva consigo fases de diseño y pruebas para corroborar que es factible su producción, y evidentemente el consumo de recursos económicos para estos fines. En particular, la industria metal-mecánica enfocada a la soldadura tiene por sí sola una enorme cantidad de variables a controlar en la fabricación de productos que sean dimensionalmente repetibles, a esto se le suma la dificultad de entender el comportamiento de las partes al ser soldadas dada la distorsión que sufren por el propio proceso. La cantidad de calor inducida a las piezas de trabajo provoca deformaciones afectando de forma negativa al cumplimiento de las características dimensionales para las que fue diseñada en primera instancia.

Esto obliga a tener múltiples iteraciones en el proceso de ajuste de producto con una mecánica de “prueba y error”, siendo lento y costoso para las empresas.

Hoy en día se conocen herramientas como la mecánica de soldadura computacional, CWM (por su nombre en inglés, Computational Weld Mechanics) en la que involucra modelos, algoritmos numéricos y software computacional para predecir la mecánica de las estructuras soldadas así como de la propia soldadura. Esto a través de teorías multi-físicas térmicas, análisis de microestructuras y de esfuerzos, los cuales son llamados también modelos termo-mecánico-metalúrgicos. Previo a estos cálculos es imprescindible el calibrar el CWM con datos experimentales con el fin de asentar la simulación con la realidad. De la misma forma se requiere realizar la validación de los resultados de la simulación para calcular el margen de error que estos tienen confrontados con lecturas de datos experimentales ejecutados bajo las mismas condiciones.

1.2. Planteamiento del problema

La modificación de diseño de las juntas de soldadura en componentes principales estructurales de equipo agrícola para manejo de tierra ha tenido, dimensionalmente, un impacto negativo importante en los subensambles tras ser soldados debido a la distorsión de las nuevas geometrías, teniendo un comportamiento muy diferente al diseño antecesor.

La creación de herramientas para la sujeción de estas partes durante el proceso de soldadura suele ser empírico, ya que no se conoce la reacción de la pieza soldada, quedando a la experiencia del ingeniero responsable, preguntas como:

- ¿De dónde apoyar?
- ¿Dónde sujetar?
- ¿Requiere predeformar?

- De ser así, ¿que tanto se debe predeformar?
- ¿En qué dirección?
- ¿Qué parámetros usar?
- ¿Cómo minimizo la distorsión?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Analizar, simular y predecir la distorsión de partes soldadas por el proceso GMAW-P robotizado mediante el uso de software de análisis de elemento finito.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Estudiar los fundamentos del proceso GMAW-P, y el calor de entrada que le suministra a placas de acero HSLA ASTM A572 de espesores de 6 mm.
2. Estudiar los fundamentos de la simulación de distorsión en soldadura mediante software de análisis de elemento finito disponible.
3. Realizar la simulación de la distorsión de partes soldadas mediante el proceso GMAW-P robotizado mediante software generando una sesión o modelo electrónico que permita predecir su comportamiento.
4. Verificar la validez de la simulación de forma experimental analizando el comportamiento de la distorsión determinando el margen de error entre ambas fuentes de datos.

1.4. Justificación

Los altos costos de la metodología empírica de ajuste dimensional de productos a “prueba y error” pueden ser reducidos de forma significativa teniendo conocimiento del comportamiento de las partes al ser soldadas antes de que esto ocurra. De forma que se pueden generar ajustes anticipando la reacción de las piezas reduciendo o eliminando el desperdicio de material así como de tiempo.

Por otro lado, el uso de herramientas de software comercial que permitan predecir la distorsión en partes soldadas incluso facilita la selección de equipos más apropiados de soldadura, y en la toma de decisiones en el diseño de herramientas de proceso de manufactura para la sujeción del producto.

1.5. Aportación tecnológica

La aportación tecnológica va encaminada al entendimiento de una herramienta que permita predecir el comportamiento de la distorsión de partes sometidas al proceso de soldadura por arco que sea capaz de ser aplicable para la industria de fabricación de maquinaria agrícola y metal-mecánica en general.

También se considera como contribución el trabajo realizado sobre las soldaduras en juntas de bisel ensanchado, y su discretización para el proceso de simulación, ya que no se ha encontrado literatura referente a este tipo de unión con fines semejantes al presente estudio.

1.6. Definición de hipótesis

Es posible predecir el comportamiento de la deformación que sufren las partes tras ser sometidas al proceso de soldadura por arco GMAW-P robotizado mediante una herramienta de software comercial de simulación basado en el análisis de elemento finito.

1.7. Límites del estudio

El estudio se acota para realizar la simulación por software de dos piezas específicas de referencia a ser unidas, sentando las bases como pilar para mantener la misma metodología usándose en partes más complejas o con usos diferentes al mostrado en este documento en un futuro.

El documento no profundiza ni intenta ahondar en el manejo, programación o uso del robot industrial empleado en la experimentación. De la misma forma, no es propósito ser un medio de instrucciones para el uso y parametrización de las máquinas de soldar empleadas. Siendo el mismo caso, para el uso del software empleado para el cálculo de la distorsión.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

2.1. Soldadura por arco de gas metal

2.1.1. Proceso

La soldadura por arco de Gas Metal, GMAW (por sus siglas en inglés, Gas Metal Arc Welding), es un proceso de soldadura eléctrica que permite realizar la unión de dos piezas de metal mediante un material de aporte que es llamado electrodo. Este material de aporte es usado en forma de alambre para facilitar su alimentación constante en sistemas manuales, semiautomáticos o automáticos.

El proceso se basa en hacer pasar energía eléctrica entre el electrodo de material de aporte y las piezas de trabajo a ser unidas de forma que ambos materiales y el alambre electrodo se fundan para generar la unión. En la Figura 2.1 se presentan los elementos claves en el proceso de soldadura (1) (2).

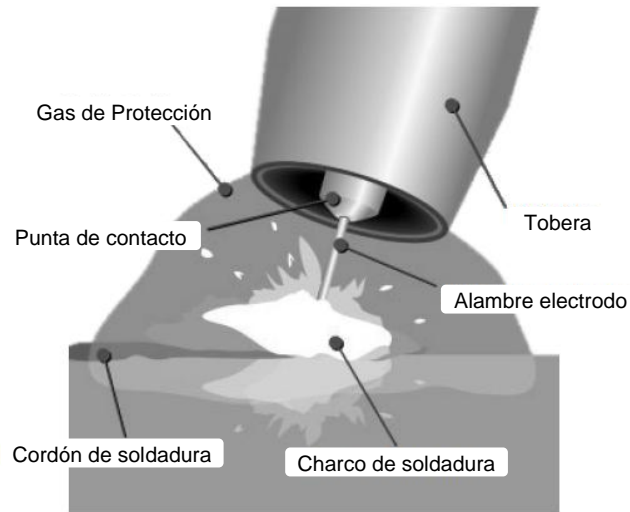


Figura 2.1.- Esquema del proceso de soldadura GMAW (1).

Los componentes de un sistema completo de soldadura GMAW se aprecian en la Figura 2.2. Se distinguen los siguientes componentes principales y su función:

- Fuente de alimentación.- Suministra una corriente eléctrica manipulada y controlada para que el proceso se lleve a cabo.
- Alimentador de alambre.- Jala el electrodo de su contenedor y lo empuja a través de la antorcha para su contacto con la pieza de trabajo.
- Antorcha de soldadura.- Conduce el alambre electrodo hacia la pieza de trabajo, y hace contacto con el positivo de la fuente.
- Pieza de trabajo.
- Tierra.- Permite cerrar el circuito eléctrico con el positivo de la fuente.
- Suministro de gas de protección.- El gas cumple con diversas funciones, genera un ambiente inerte, libre del aire del ambiente. También sirve como medio para que se transfiera la energía eléctrica del electrodo a la pieza de trabajo en ciertos modos de transferencia.

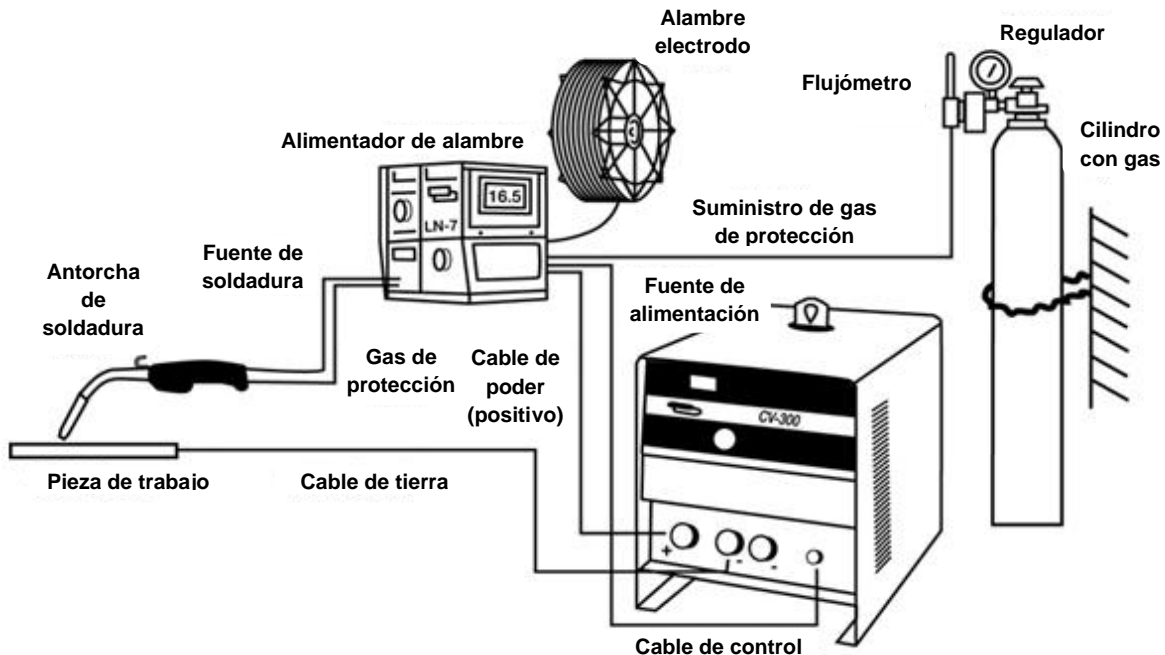


Figura 2.2.- Componentes de un sistema completo de soldadura GMAW (2).

2.1.1.1. Ventajas, desventajas y limitaciones

El proceso de soldadura GMAW tiene varias ventajas respecto a otros procesos de soldadura (los cuales no han sido analizados en este documento por estar fuera del alcance). Se destacan cuatro principalmente:

- Puede ser usado para soldaduras en todas posiciones
- Soldaduras de calidad
- Mínima o sin escoria
- Bajo chisporroteo

Sin embargo, se reconocen las siguientes desventajas y limitaciones:

- El sistema requiere de equipo costoso
- Generalmente muy poco portable.

- No se recomienda para uso al aire libre ya que puede generar defectos por el ambiente.
- Requiere que el material este limpio de óxido y otros contaminantes.

2.2. Modos de transferencia

Existen diferentes maneras de depositar el material de aporte al material base las cuales son llamadas Modos de transferencia. Estos se refieren a la mecánica de llevar el electrodo en su presentación de alambre a ser parte de las piezas a soldar.

De acuerdo con la Sociedad Americana de Soldadura (AWS, por sus siglas en inglés, American Welding Society) y el Instituto Internacional de la Soldadura (IIW, por sus siglas en inglés, International Institute of Welding), existen tres métodos de transferencia principales:

- Modo de corto circuito
- Modo globular
- Modo de rociado.

2.2.1. Corto circuito

En este modo de transferencia el material de aporte se deposita al entrar en contacto con la pieza de trabajo. Al ocurrir el corto circuito entre el polo positivo del electrodo y el negativo de la pieza de trabajo, se genera un efecto llamado “pellizco” provocando el desprendimiento de una gota de metal del alambre (2).

Su uso es limitado a placas de bajo espesor, menos de un $\frac{1}{4}$ de pulgada, dados sus bajos parámetros. Se caracteriza por:

- Bajos voltajes: 16V a 22V
- Bajos amperajes: 30A a 200A
- Tamaño del electrodo: 0.025” (0.60 mm) a 0.045” (1.10 mm)

- Gas de protección: 100% CO₂
75% Ar / 25% CO₂

Debido a las pequeñas explosiones que se crean en el corto circuito, este modo de transferencia provoca chisporroteo considerable.

2.2.2. Globular

Dados los altos parámetros de corriente que se emplean con este método de transferencia, la cantidad de energía concentrada básicamente derrite el metal del electrodo en gotas mayores al diámetro del alambre, cayendo por gravedad. Figura 2.3 (2).

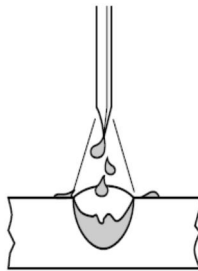


Figura 2.3.- Modo de transferencia globular.

Permite ser usado en espesores arriba de ¼ de pulgada. Se caracteriza por:

- Altos voltajes: 25V a 35V
- Altos amperajes: 200A a 500A
- Tamaño del electrodo: 0.035" (0.90 mm) o superior
- Gas de protección: 100% CO₂
75% Ar / 25% CO₂

Este modo de transferencia permite altas tasas de depósito y emplea gas de bajo costo. Sin embargo, genera una cantidad excesiva de chisporroteo. Únicamente puede usarse en aplicaciones en horizontal.

2.2.3. Por rociado

El modo de transferencia de interés para este estudio es el modo por rociado, el cual se basa en el uso de parámetros altos de corriente, por encima de los 210 amperes para una transferencia alta de energía en el depósito generando una brisa de material fundido arrojado de forma ordenada al charco de soldadura. Figura 2.4 (2).

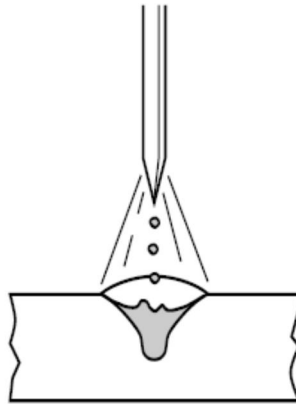


Figura 2.4.- Modo de transferencia por rociado.

2.2.4. Por rociado pulsado

El método de transferencia de GMAW por arco pulsado es una modificación del modo de transferencia por rociado, también llamado GMAW-P por su denominación en inglés “Gas Metal Arc Welding Pulse Spray”, en el cual se manipula la forma de la onda de la energía eléctrica que es empleada en la generación del arco para soldar. Mediante esta manipulación se logra crear el desprendimiento de pequeñas gotas de material de aporte más pequeñas que el diámetro del alambre, de forma periódica, constante y dirigida, lo que permite una gran estabilidad en el arco de soldadura minimizando discontinuidades en las uniones (2).

Hoy en día, en el mercado, se disponen de máquinas de soldar digitales en las cuales es posible realizar la manipulación necesaria en las ondas de la corriente

de soldadura. Presenta un costo más elevado que las máquinas convencionales de transformador, sin embargo, a largo plazo dan beneficios por el escaso mantenimiento que requieren, así como por su alta eficiencia que lleva a un bajo consumo de energía.

2.3. Diseños de uniones en soldadura

Existen 5 diseños básicos de uniones para soldadura, que son a tope, esquina, traslape, borde y tipo "T". En la Figura 2.5 y Figura 2.6 son mostrados los cinco diseños. Para efectos del desarrollo de este estudio se emplearon las uniones a tope y de borde.

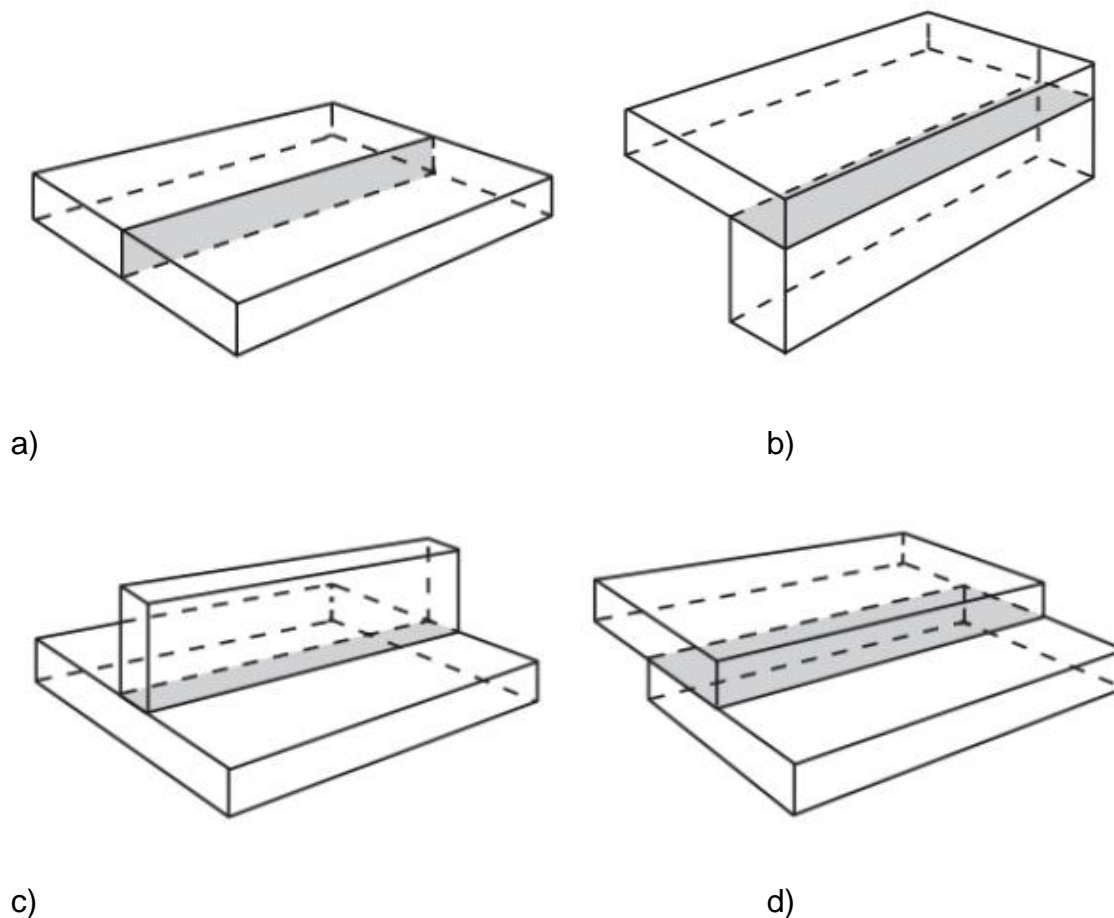
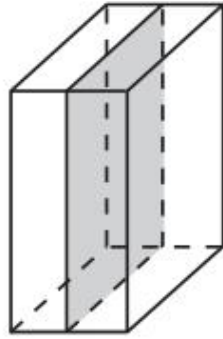


Figura 2.5.- Tipos básicos de uniones de soldadura. a) A tope; b) Esquina; c) Tipo "T"; d) Traslape, (3).



e)

Figura 2.6.- Tipos básicos de uniones de soldadura; e) Borde, (3).

En la Figura 2.7 se describen los elementos característicos de un cordón de soldadura en una unión tipo “T” en corte transversal.

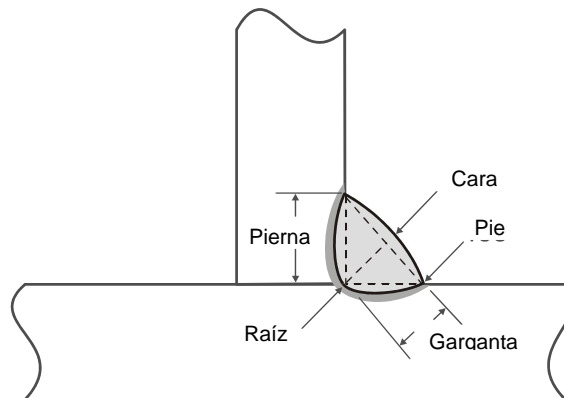


Figura 2.7.- Junta en “T” a 90° (4).

Las juntas con ángulo fuera de los 90° requieren consideraciones especiales respecto a la soldadura en “T”, ya que geoméricamente presenta diferentes características (5). Estas se muestran en la Figura 2.8.

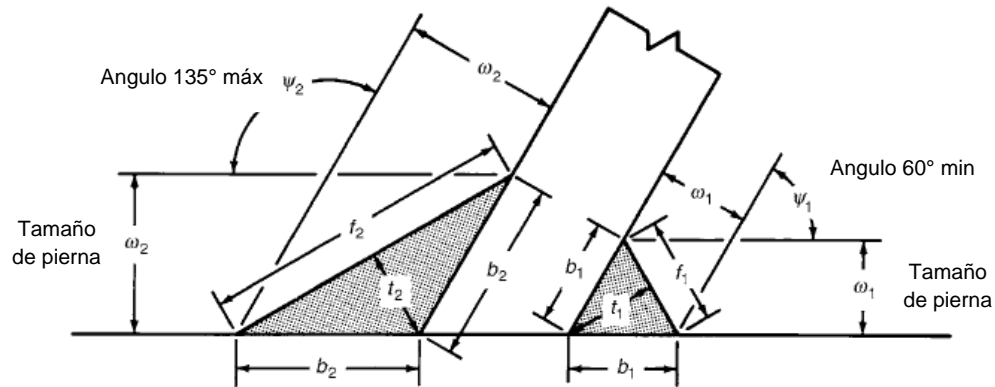


Figura 2.8.- Junta en ángulo agudo y obtuso (4).

Además de estas 5 juntas básicas existen variaciones de composición ya sea por la geometría de las partes o de la preparación de la pieza de trabajo que ofrecen distintas características tanto estructurales o de proceso así como estéticas.

En el caso de este estudio se trabaja con juntas en borde con componentes curvos dando como resultado una soldadura de bisel de $\frac{1}{2} V$ ensanchado, según el estándar de términos y definiciones de soldadura de la ANSI/AWS A3 (3). Esta se aprecia en la Figura 2.9.

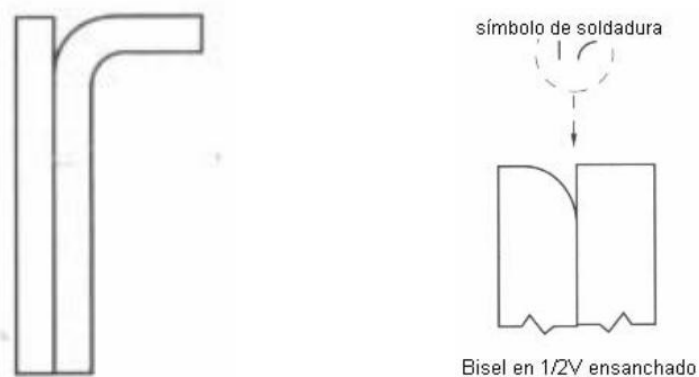


Figura 2.9.- Juntas en borde con componentes curvos para una soldadura de bisel de $\frac{1}{2} V$ ensanchado.

2.4. Esfuerzos residuales y distorsión

2.4.1. Esfuerzos residuales

Los esfuerzos residuales son aquellos que existen en un cuerpo aun cuando todas las cargas ya han sido removidas de él. También son llamados esfuerzos internos. Son generados básicamente por las temperaturas no uniformes que se presentan en las partes durante el proceso de soldadura.

Los esfuerzos residuales se producen por deformaciones no plásticas distribuidas no uniformemente. Esto es, al ser sometido a los cambios de temperatura ocasionados por algún proceso, las partes sufren de estrés térmico, dado como resultado esfuerzos residuales.

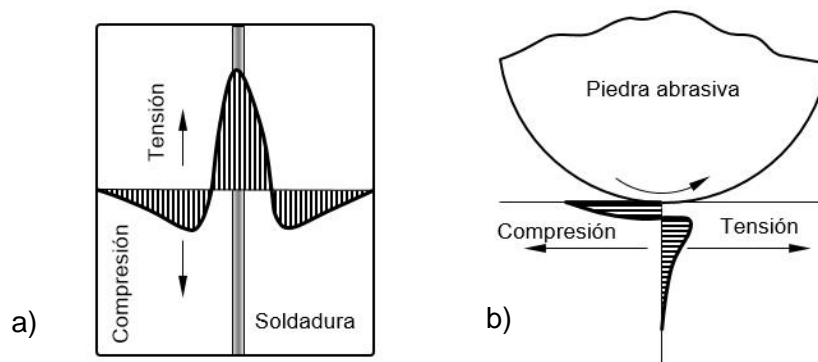


Figura 2.10.- a) Esfuerzo residual ocasionado por soldadura. b) Esfuerzo residual ocasionado por esmerilado. Imágenes redibujadas de (6).

En el caso del proceso de la soldadura, el calor fluye del área soldada provocando que el área de la junta se expanda. La expansión y contracción térmica generada por la soldadura puede dejar esfuerzos permanentes. Mientras más calor de entrada se tenga en la soldadura, las partes son más propensas a sufrir esfuerzos residuales. Por otra parte, si se tienen más restricciones mecánicas que impidan la distorsión mecánica de la pieza también pueden darse mayores esfuerzos residuales.

Los esfuerzos de tensión residual existen en el metal soldado y en el metal base adyacente. Por otro lado, los esfuerzos de compresión residual se observan en las áreas más lejanas al metal soldado.

Se supone el caso de tres barras verticales que son colocadas entre dos barras horizontales que las van a restringir. Si la barra del centro es calentada, estaría sometida a compresión, por la dilatación del material, luego, las barras laterales presentarían esfuerzos de tensión. Después de que este calor es detenido y la barra central se enfría, ahora esta barra estaría presentando esfuerzos de tensión. Generando el esfuerzo residual de tensión. Las barras laterales, tras el enfriamiento, tendrían esfuerzos residuales de compresión (6).

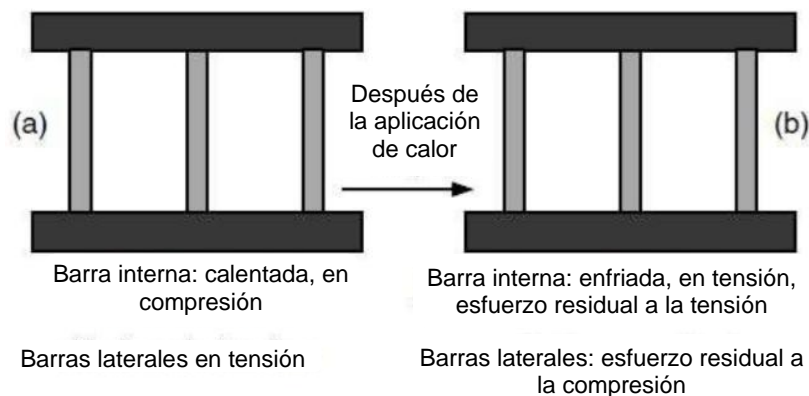


Figura 2.11.- Principio de tres barras. (6).

Ahora se supone que dos placas rectangulares son unidas por una soldadura a tope. El mismo fenómeno de las tres barras ocurre con este ejemplo. La soldadura funge como la barra central, y las áreas más alejadas a soldadura trabajan como las barras laterales de nuestro ejemplo. Así que el cordón de soldadura presenta esfuerzos residuales de tensión y las áreas laterales esfuerzos residuales a compresión.

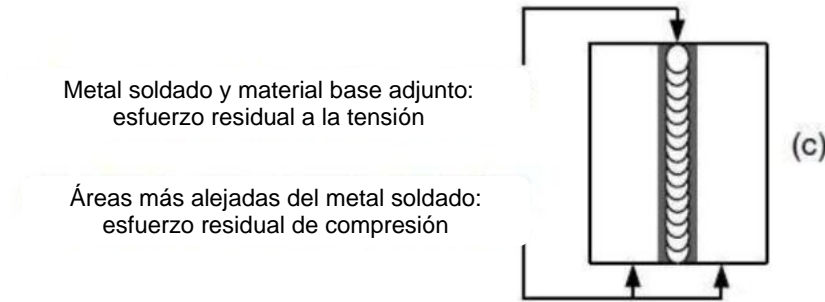


Figura 2.12.- Un cordón de soldadura se comporta bajo el mismo principio de las tres barras. El área soldada se comporta como la columna central. Las áreas al rededor fungen con las columnas exteriores (6).

Viendo con más detalle cómo se comportan los esfuerzos de las placas soldadas contra los cambios de temperatura ΔT , Figura 2.13, en la línea A-A, se tiene un diferencial de temperatura $\Delta T=0$ ya que la soldadura aún no ha alcanzado ese punto, de forma que el esfuerzo es prácticamente cero.

Cuando la soldadura llega a la línea B-B se tiene el máximo diferencial de temperatura ya que el material de depósito está fundido dando el máximo aporte de calor, en la línea que dibuja el eje x mantiene esfuerzo=0 ya que esta líquido el material, sin embargo empieza a crear esfuerzos de compresión en las áreas inmediatas laterales y se genera tensión en la parte más alejada de la soldadura.

Al pasar la soldadura y quedar solidificada por completo, ubicando la línea C-C, donde el pico del diferencial de temperatura ha bajado y comienza a disiparse a los lados, aumentando la temperatura de las áreas cercanas a la soldadura. Entonces el cordón de soldadura, en la línea x, sufre de esfuerzos de tensión por la contracción del material, y en el material de los costados se incrementa el esfuerzo de compresión que se presentó durante el depósito de material.

Cuando ha pasado tiempo suficiente para que la pieza se enfríe por completo, se tiene un diferencial de temperatura $\Delta T \approx 0$, sin embargo ya se han creado esfuerzos residuales de tensión en la línea del cordón de soldadura siendo mucho mayores a los generados durante el proceso de soldadura, y en las áreas a los

costados se incrementa el esfuerzo de compresión que se generó durante el aporte de calor, teniendo un esfuerzo residual de compresión.

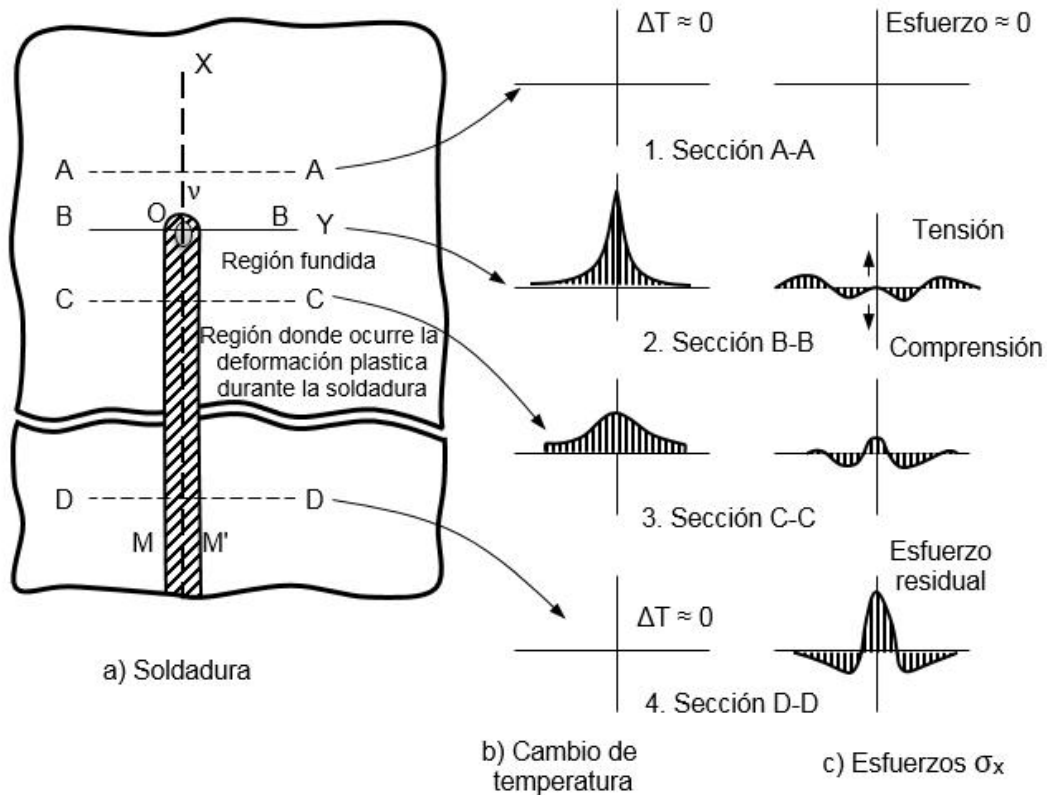


Figura 2.13.- Cambio de temperatura y de esfuerzos durante la soldadura. Imágenes redibujadas de (6).

En la Figura 2.14, con fines únicamente ilustrativos, se puede apreciar aspecto físico de las placas soldadas, así como de los esfuerzos residuales que se derivan del proceso de soldadura, las áreas rojas en el centro denotan una gran concentración de esfuerzos residuales de tensión. Las áreas inferiores en color azul, hacen referencia al esfuerzo residual de compresión.

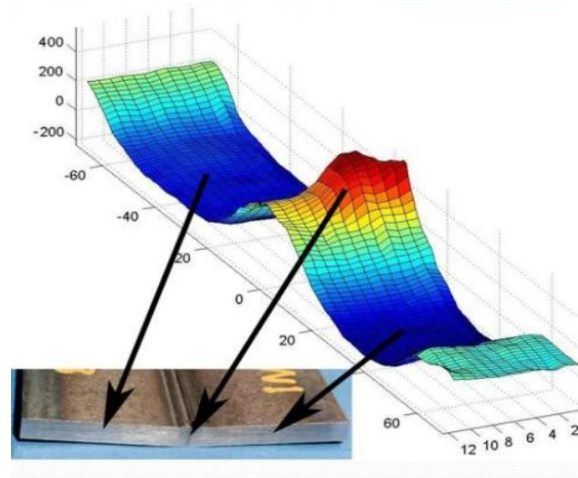


Figura 2.14.- Grafica tridimensional de esfuerzos residuales en la unión de dos placas soldaduras contra la distancia (7).

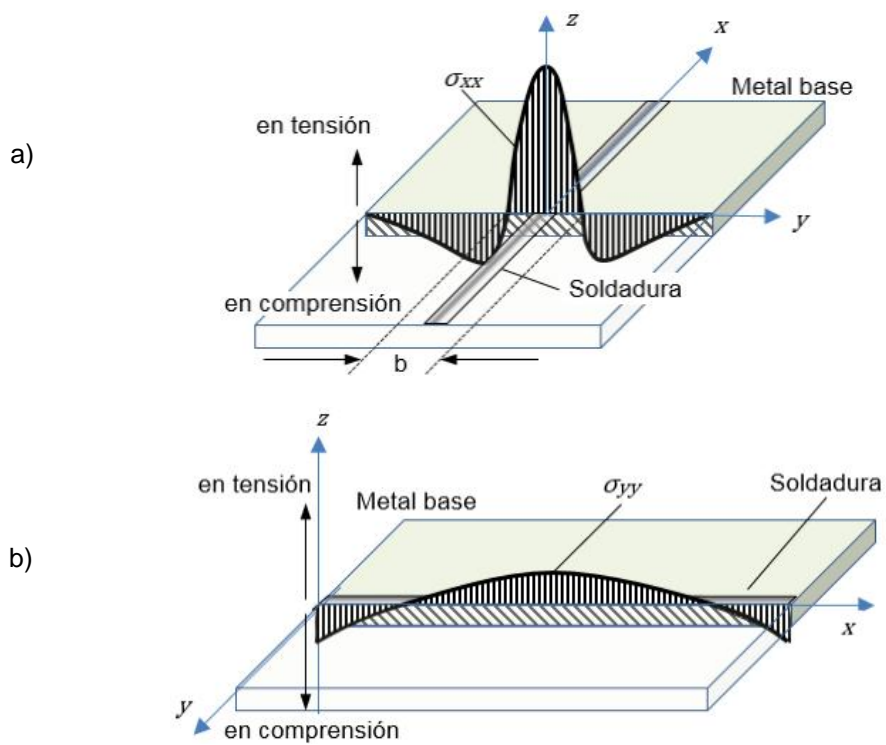


Figura 2.15.- Distribución típica de esfuerzos residuales longitudinal (σ_{xx}) y transversal (σ_{yy}) en soldadura a tope; a) sección transversal; y b) sección longitudinal. Adaptación de (6).

En la Figura 2.15 se muestra la distribución típica de los esfuerzos residuales en una soldadura a tope. Donde σ_{xx} es el esfuerzo residual en el plano normal a x

en dirección x a lo largo del eje y . Luego σ_{yy} es el esfuerzo residual en el plano normal a y en dirección y a lo largo del eje x . Ambos esfuerzos son considerados sobre la superficie de la placa. El parámetro b es el ancho de la zona de tensión de σ_{xx} .

2.4.1.1. Efecto de los esfuerzos residuales

Los esfuerzos residuales generan varias afectaciones a las propiedades mecánicas de los materiales. La resistencia a la fractura disminuye. La resistencia al esfuerzo de cedencia se reduce. El esfuerzo residual de compresión incrementa la resistencia a la fatiga.

En ambientes hostiles, como ambientes corrosivos, el esfuerzo residual puede provocar grietas o fallas en el material aun sin estar siendo sometido a cargas.

2.4.2. Distorsión

Tras la aplicación de soldaduras en estructuras metálicas, es usual que los materiales unidos sufran cambios dimensionales. A esto se le conoce como distorsión por soldadura. El metal fundido para la unión se contrae irregularmente durante el proceso de enfriado a llegar a la tempera ambiente, ocasionando contracción en la soldadura creando fuerzas en la sección transversal de forma excéntrica (8) (9).

A causa de la reducción durante la solidificación y la contracción térmica del metal durante la soldadura, la pieza tiene una tendencia a distorsionarse. Existen diferentes tipos de distorsión que pueden presentarse en las partes, a) reducción de la parte en dirección transversal, así como también b) en dirección longitudinal al cordón de soldadura. La distorsión angular también es un tipo muy común, que se

puede presentar tanto en c) soldaduras a tope, como en d) soldaduras de filete. Tal como es mostrado en la Figura 2.16 (6).

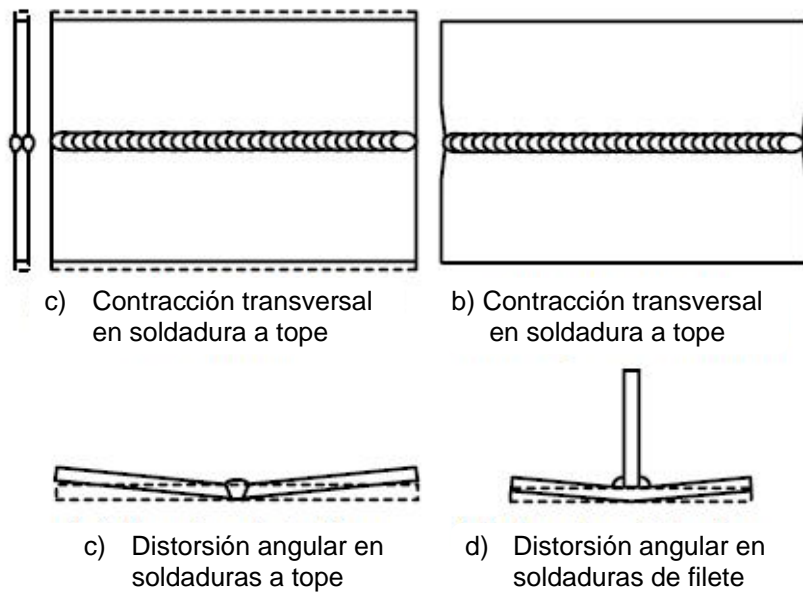


Figura 2.16.- Distorsión en estructuras soldadas (6).

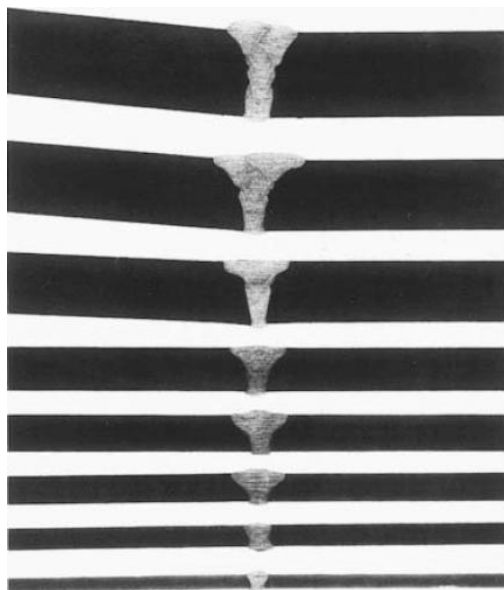


Figura 2.17.- Distorsión en soldadura a tope en aluminio 5083 con espesores de 6.4 a 38 mm (6).

En la Figura 2.17 se muestra la distorsión angular en soldaduras a tope en aluminio en diferentes espesores. Se puede apreciar que la distorsión angular se incrementa conforme se aumenta el espesor. Esto es debido a que al aumentar el espesor también se incrementa el tamaño de la junta, y de la misma forma la cantidad de soldadura. Esto evidentemente provoca un aumento significativo en la cantidad de calor que se aporta, así que la reducción por la solidificación y la contracción térmica también.

2.4.2.1. Control de la distorsión

Existen varias técnicas que permiten controlar o reducir la distorsión por soldadura. La reducción del volumen de soldadura permite reducir la distorsión angular y la reducción lateral. Una preparación de ángulo adecuada en la junta puede ayudar a esta condición, Figura 2.18. Por ejemplo, no usar bisel de preparación en la junta o usar una preparación de doble V alternando las soldaduras, Figura 2.19 (6).

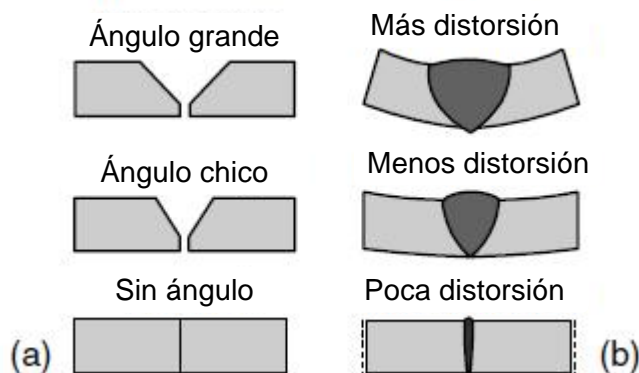


Figura 2.18.- Reducción de distorsión angular disminuyendo el volumen de metal soldado un solo paso con penetración profunda (6).

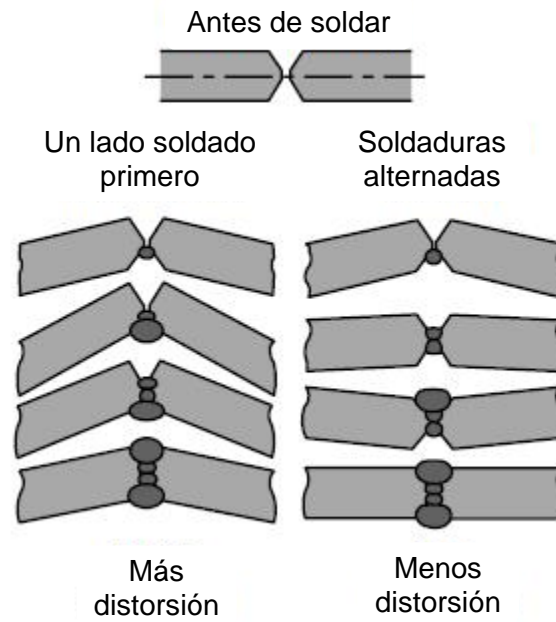


Figura 2.19.- Reducción de distorsión angular usando doble junta en V alternando las soldaduras (6).

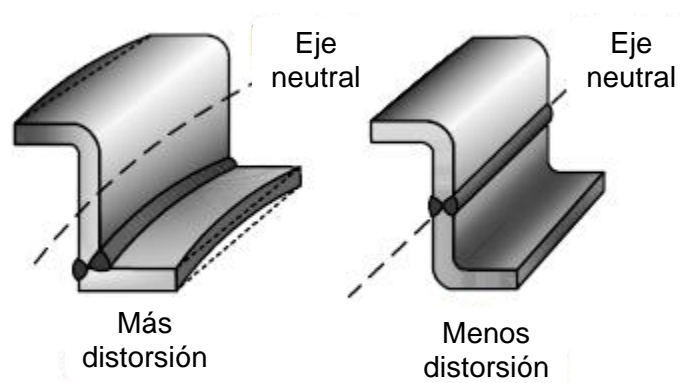


Figura 2.20.- Reducción de distorsión soldando sobre el eje neutral de la parte (6).

Otro método es usar los ejes neutros de las partes para minimizar el impacto de la distorsión, Figura 2.20. También el preposicionar las partes para compensar la distorsión angular o la predeformación de la partes a través de medios de sujeción, Figura 2.21. Éstas son opciones comúnmente usadas.

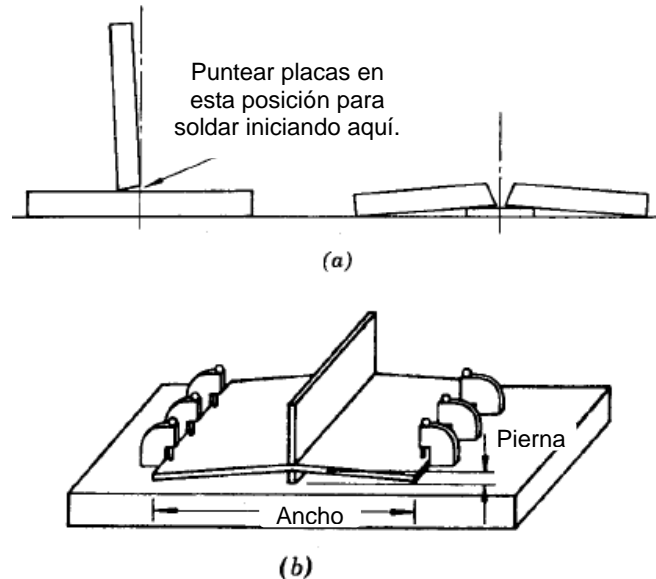


Figura 2.21.- Metodos de control para distorsión. a) fuera de posición o preposicionamiento, b) predeformando (6).

Para mayor referencia del tema de mitigación de los esfuerzos residuales y la distorsión es tratado a profundidad por Zhili (10), incluyendo el control de distorsión de torcedura en placas y armazones.

2.5. Sistemas de Simulación de distorsión y mecánica de soldadura computacional

El diseño asistido por computadora, (CAD, por su nombre de origen, Computer Aided Design), y la manufactura integrada por computadora, (CIM por su nombre en inglés, Computer Integrated Manufacturing) se han hecho de uso

cotidiano de forma general en la industria. Los análisis asistidos por computadora, como el método de elementos finitos (FEM, por su nombre en inglés, Finite Element Method), se encuentran al día de hoy bastante desarrollados, dando la oportunidad de un uso amplio a nivel industrial que está en aumento. Esto se explica ya que estas simulaciones permiten mejorar los diseños e incrementar el nivel de certidumbre de los productos, sin requerir la inversión correspondiente a hacer pruebas físicas y valorar su desempeño (11).

Lo anterior con un foco hacia el desarrollo de las partes y su uso, así como análisis estructurales de esfuerzos, de fatiga y térmicos. Sin embargo, la simulación de los procesos de unión de metales por fusión ha sido un desarrollo más lento.

Hoy en día se conocen herramientas como la mecánica de soldadura computacional, CWM, en la que involucra modelos matemáticos, algoritmos numéricos y software computacional, apoyada usualmente en FEM, para predecir la mecánica de las estructuras soldadas así como de la propia soldadura. Esto a través de teorías multi-físicas térmicas, análisis de microestructuras y de esfuerzos, los cuales son llamados también modelos termo-mecánico-metalúrgicos (12) (13).

Respecto a su historia se puede decir que el CWM fue concebido en los años 70's, nació en los años 80's, y estuvo madurando cerca del año 2000. Tras el 2010 se puede considerar que alcanzó una madurez suficiente para hacer factible su uso en la industria, y pese que a algunas empresas, como John Deere y Caterpillar, adoptaron el CWM de forma temprana en el periodo de 2000-2005, sigue siendo de uso muy bajo en la industria pesada. Esto se explica dada la alta complejidad que ha requerido históricamente para poder llevarse a cabo, así como a las limitaciones en las prestaciones que ha dado. En Figura 2.22 se aprecia la evolución en la funcionalidad del CWM del año 1970 a la proyección del 2020, siendo la línea superior el desarrollo en el ámbito académico y de investigación, y la curva inferior el uso en la industria (14).

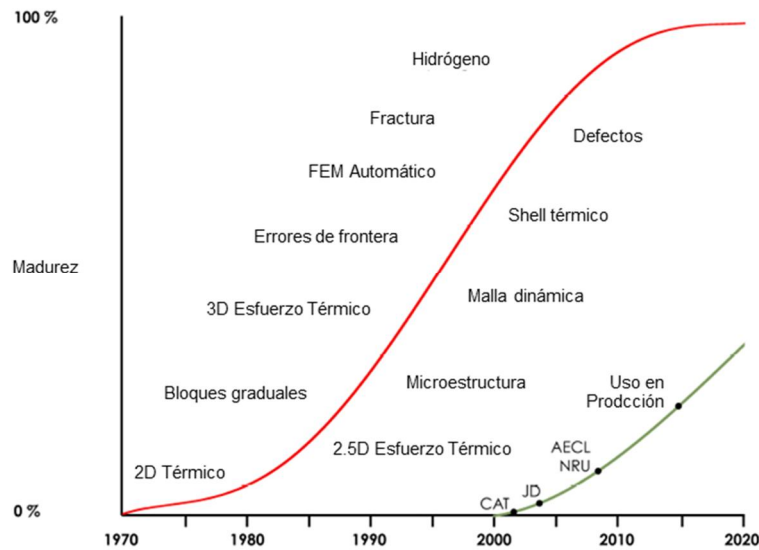


Figura 2.22.- Evolución de la funcionalidad de CWM del año 1970 al 2020. La curva superior indica su desarrollo en el ámbito de investigación, y la curva inferior marca su uso en la industria (14).

2.5.1. Métodos de modelación

En la actualidad existen diversos modelos para realizar la simulación virtual de la distorsión por soldadura, siendo posible abarcar un amplio rango de procesos físicos que se dan paso durante y después de la soldadura como lo son las dinámicas ocurridas dentro del charco de soldadura, la transferencia de calor, la solidificación del material, transformaciones de fase, así como alteraciones en las propiedades mecánicas del material.

Se pueden clasificar los modelos de distorsión en 3 categorías dependiendo de su complejidad. Mientras más complejo es el modelo tiene más fenómenos en consideración y por tanto es más preciso en sus predicciones, sin embargo, el consumo de tiempo para su preparación y la ejecución de los cálculos es muy grande. Por otro lado, se cuenta con modelos simplificados que son menos exactos por tener menos consideraciones pero son más rápidos que los anteriores. En la Figura 2.23 se aprecian estas categorías con sus implicaciones (15).

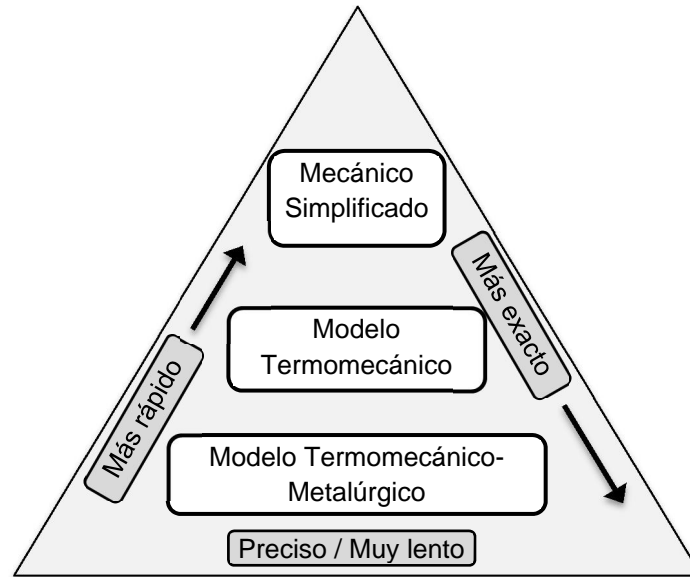


Figura 2.23.- Modelos para simulación de distorsión por soldadura (15).

2.5.1.1. Modelos Termomecánicos-metalúrgicos

Este es el nivel de modelado más extenso. Son considerados diferentes fenómenos físicos durante la soldadura como lo son el comportamiento elastoplástico del material del componente, el comportamiento de la viscosidad de la zona fundida, las transformaciones de fase en la soldadura y en la zona afectada por el calor, las propiedades térmicas y dependientes de fase, el calor transferido a la parte, las pérdidas de calor en la superficie, entre otros. Figura 2.24 (15).

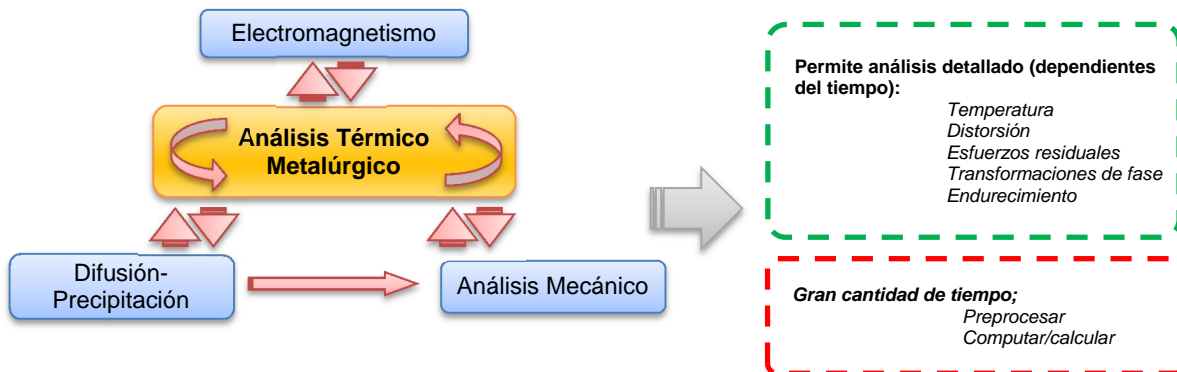


Figura 2.24.- Representación del modelo Termomecánico-Metalúrgico.

Como resultado de este modelo se pueden realizar análisis detallados sobre el comportamiento durante y después de la soldadura, tal como la temperatura, distorsión, esfuerzos residuales, transformaciones de fase y dureza, con cálculos dependientes del tiempo.

Sin embargo, aún existen serias restricciones para usar estos métodos a la industria en general, y es que se requiere de una gran cantidad de datos sobre el material a tratar, como la conductividad térmica, transferencia de calor al ambiente, diagramas CCT, coeficiente de expansión térmica, módulo de Young, resistencia al esfuerzo último, etc. Además de esto, los cálculos mecánicos y termometalúrgicos requieren un preprocesamiento y tiempos de computación muy altos, que lo hacen marginal para su uso en los procesos productivos de la industria en general (15).

2.5.1.2. Modelos Termomecánicos

Este tipo de modelo realiza la simulación de la soldadura enfocándose a modelos termomecánicos ignorando los efectos metalúrgicos. Figura 2.25.

Los cálculos mecánicos y térmicos pueden desarrollarse de forma secuencial paso a paso o por el intervalo de tiempo completo almacenando los valores de las temperaturas intermedias. Estos valores son la base para obtener el comportamiento mecánico (15).

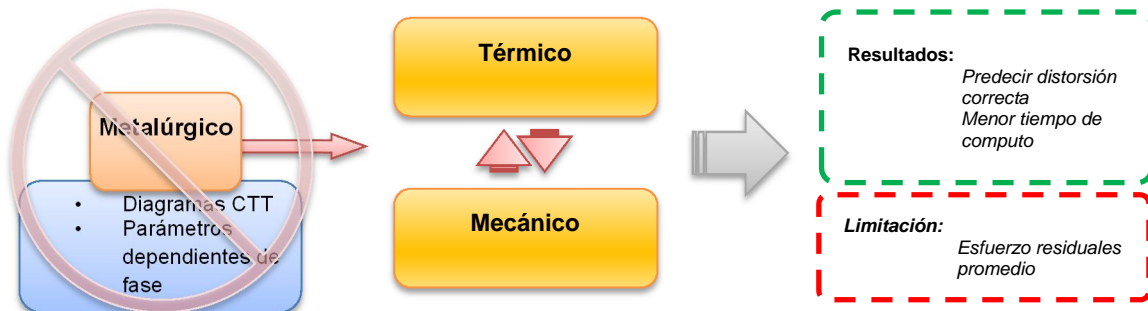


Figura 2.25.- Representación del modelo Termomecánico.

El requerimiento de datos y el tiempo total para los cálculos es más bajo que el de los modelos termomecánicos-metalúrgicos.

Se puede obtener una predicción correcta de la distorsión, aunque en el caso de los esfuerzos residuales sólo se puede evaluar el nivel medio de esfuerzo debido a la pobre información de la física del material.

2.5.1.3. Modelos Mecánicos Simplificados

A diferencia de los modelos mencionados previamente, los modelos simplificados mecánicos ignoran el historial termomecánico durante el proceso. Esto significa que se basan únicamente en cálculos mecánicos, de forma que no se requiere la simulación térmica ni los datos del material dependientes de la temperatura, tal como se representa en la Figura 2.26. Se soporta en el comportamiento elastoplástico del material tomando en cuenta como principal causa de la distorsión después de la soldadura la contracción del material.

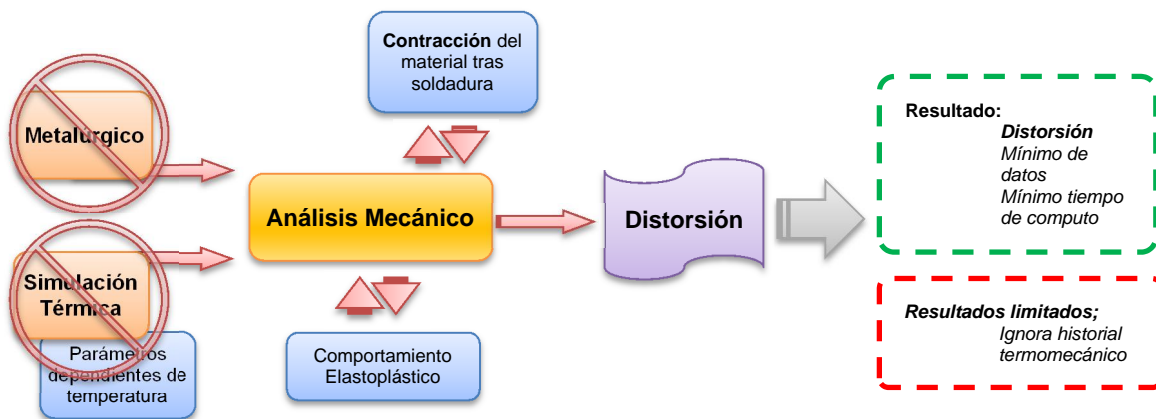


Figura 2.26.- Representación del modelo mecánico simplificado.

Esta simplificación aunque ofrece datos limitados, sí brinda datos útiles sobre la distorsión, teniendo ventaja de tiempos de computación más bajos que los métodos anteriores.

2.5.2. Proceso conceptual de la simulación

En la Figura 2.27 se muestra un diagrama de flujo indicando el proceso de verificación y validación durante el diseño de partes o productos. En éste se refleja la conceptualización del modelo (diseño inicial) y las 2 líneas que corren prácticamente en paralelo, donde la columna izquierda describe el desarrollo de la simulación, y la columna derecha marca las pautas de adquisición de datos experimentales.

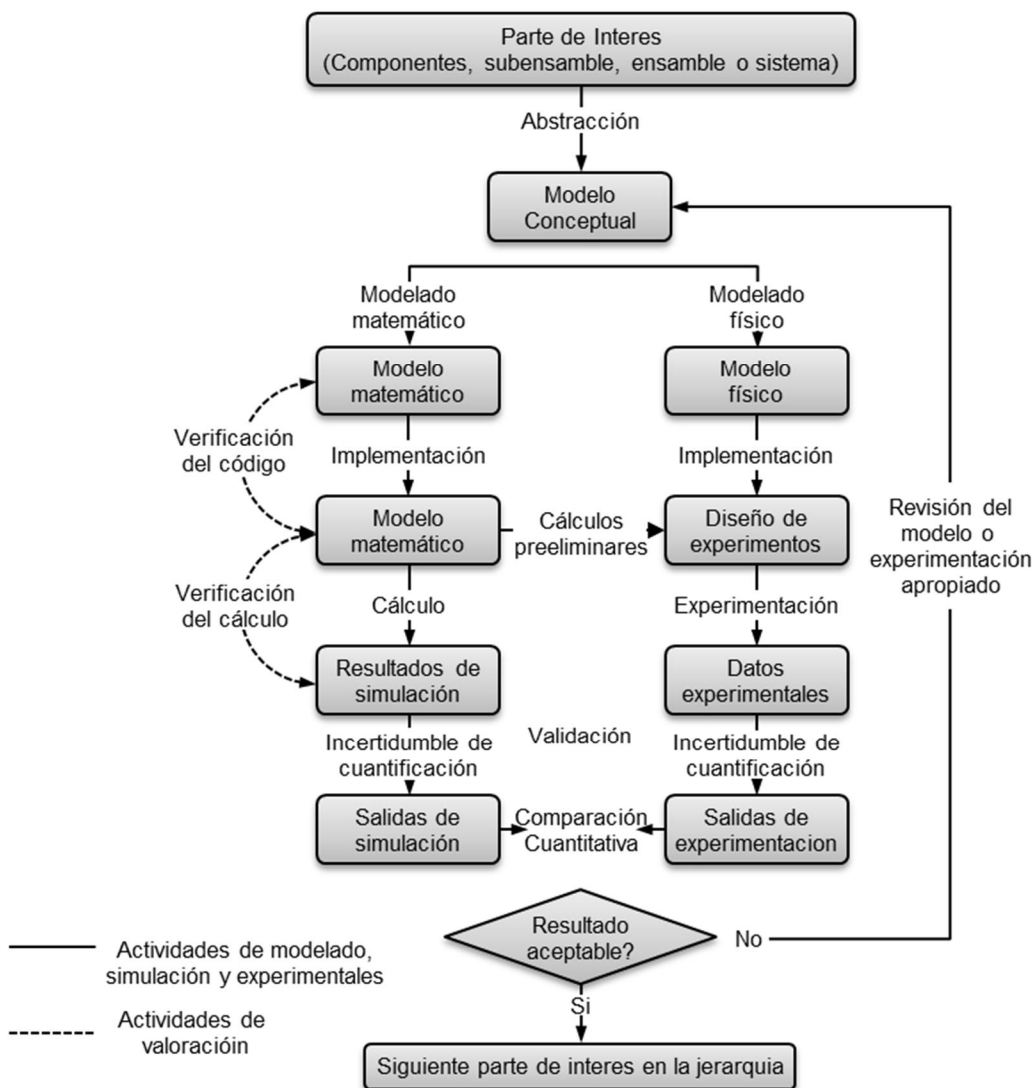


Figura 2.27.- Vista general del proceso de validación y verificación del proceso de simulación (16).

Si bien, el CWM tiene ya un cierto nivel de madurez, es importante tener en cuenta que se requiere un proceso de calibración del mismo con datos experimentales con el fin de asentar la simulación con la realidad. De la misma forma se requiere realizar la validación de los resultados de la simulación para calcular el margen de error que estos tienen confrontados con lecturas de datos experimentales ejecutados bajo las mismas condiciones. Este tipo de validación se puede apreciar en el trabajo de Asadi (16), Tikhomirov (15) y Flint (17).

2.5.3. Modelos de fuentes calor en simulación numérica

El concepto de los modelos de calor de entrada en el CWM no solo está relacionado con el flujo de calor en la parte térmica de la simulación, sino también está implicado en el modelado de la adición del material de aporte, así como en la simplificación del comportamiento térmico y mecánico del material. Con esto se obtiene una sustitución de un proceso físico complejo por uno mucho más simple. Gráficamente se puede distinguir en la Figura 2.28 los diversos campos de estudio (implicando sus ecuaciones) que intervienen en un proceso completo incluyendo el modelo del proceso de soldadura, en comparación con un proceso de CWM en el que es usado un modelo de calor de entrada sin las consideraciones de los fenómenos físicos que generan el calor el proceso ni la mecánica del fluido (12).

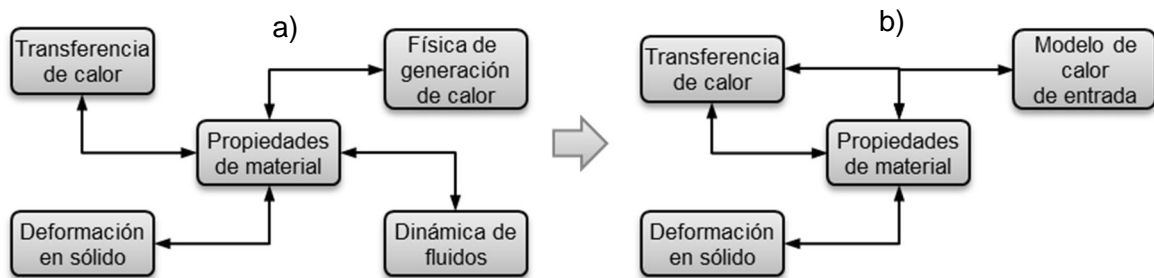


Figura 2.28.- a) Diversos campos de las ecuaciones involucradas en CWM con el modelo del proceso de soldadura; y b) los campos clásicos en el modelado del CWM de soldadura de fusión sin el modelo del proceso de soldadura y sin la mecánica de fluidos (12).

Esto da pauta a comprender porqué el modelo de calor de entrada no es un método completamente predictivo. Entonces, la mejor aproximación es el medir temperaturas, observar los cambios microestructurales, el tamaño del charco de soldadura, entre otros, mediante experimentación, y en base a ello hacer los ajustes en el modelo de calor de entrada hasta que coincidan con lo alcanzado en lo experimental (12).

2.5.4. Doble elipsoide de Goldak

El modelo de la fuente de calor debe generar un patrón en forma similar a la del proceso real para describir apropiadamente los gradientes de temperatura que se dan en él. Para poder generar la forma típica de un charco de soldadura puede ser empleado un elipsoide partido en dos mitades. De las cuales, la mitad frontal del elipsoide es corta para capturar la acción de penetrar del arco y la mitad trasera del elipsoide es largo para reflejar el enfriamiento lento del charco de soldadura por la conducción del calor en el metal base. Esto es conocido al día de hoy como la fuente de calor de soldadura por arco del doble elipsoide, o doble elipsoide de Goldak (por su creador, John Goldak) (14).

Esta es una de las fuentes de calor más empleadas en los análisis de CWM tanto en software comerciales como a nivel experimental. Sin embargo, cabe destacar que este modelo solo es útil cuando la forma del charco de soldadura físico se aproxima a la forma del doble elipsoide. Si se trabaja con otros procesos de soldadura que impliquen distintas formas de charco, entonces debe emplearse una distribución densidad de potencia apropiada (14).

Este modelo prescribe la distribución de densidad de potencia de la forma del charco de soldadura caracterizado por cuatro parámetros: ancho, profundidad, longitud frontal y longitud trasera del doble elipsoide. La Figura 2.29 muestra el modelo de doble elipsoide junto con los parámetros de longitud de los semi-ejes que lo definen, así como su sistema de coordenadas (16) (11) (13) (14) (18).

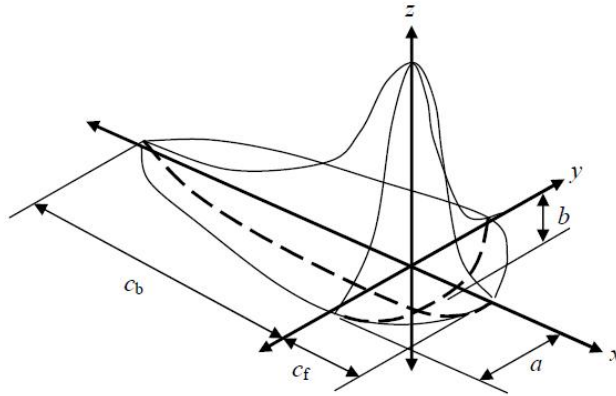


Figura 2.29.- Modelo de doble elipsoide de Goldak, definición del sistema coordenado y coeficientes usados (18).

En las ecuaciones Ec. 1 y Ec. 2 se describe el modelo matemático de la fuente de calor.

$$q_f(\xi, y, z) = \frac{6\sqrt{3}r_f Q}{abc_f \pi \sqrt{\pi}} e^{-3\frac{\xi^2}{c_f^2}} e^{-3\frac{y^2}{b^2}} e^{-3\frac{z^2}{a^2}} \quad \text{Ec. 1}$$

$$q_b(\xi, y, z) = \frac{6\sqrt{3}r_b Q}{abc_b \pi \sqrt{\pi}} e^{-3\frac{\xi^2}{c_b^2}} e^{-3\frac{y^2}{b^2}} e^{-3\frac{z^2}{a^2}} \quad \text{Ec. 2}$$

Entonces se observa que, Q es la tasa de calor de entrada (J/s), definido como:

$$Q = \mu VI \quad \text{Ec. 3}$$

Donde μ es la eficiencia del proceso, V es el voltaje (V) e I es la corriente de soldadura del arco, (a, b, c_b, c_f) son los parámetros de la elipsoide, r_f es la fracción de Q en la parte frontal, y r_b es la fracción de Q en la parte trasera siendo,

$$r_f + r_b = 2 \quad \text{Ec. 4}$$

$$r_f = \frac{2c_f}{c_f + c_b} \quad y \quad r_b = \frac{2c_b}{c_f + c_b} \quad \text{Ec. 5}$$

Los valores que han mostrado tener mejor apego entre lo calculado y lo experimental son $r_f = 0.6$ y $r_b = 1.4$. Una distribución de densidad de potencia de doble elipsoide con coordenadas $(0, 0, 0, 0)$ en el centro del charco de soldadura y los semi-ejes (a, b, c_b, c_f) paralelos a (y, z, x, x) , da la capacidad de ajustar de forma arbitraria los parámetros de la doble elipsoide para hacerla coincidir con una forma ya conocida del charco de soldadura.

En un sistema coordenado en movimiento (ξ, y, z) , en el cual ξ es el movimiento en la dirección x y v es la velocidad de soldadura (m/s), ξ puede ser sustituido en la Ec. 1 y Ec. 2 usando la ecuación Ec. 6 por un elipsoide en movimiento en un sistema de coordenadas fijo (x, y, z) . (16) (11) (13) (14) (18).

$$\xi = x + v\Delta t \quad \text{Ec. 6}$$

Este modelo matemático es usado hoy día en procesadores computacionales mediante métodos numéricos para su aplicación en las simulaciones, sin embargo, se ha intentado hacer soluciones analíticas o aproximaciones, como la propuesta por Nguyen (19), en donde indica que pudiera ser una herramienta conveniente para resolver varios problemas de análisis de esfuerzos térmicos y residuales, así como de modelado de microestructuras de soldaduras multipaso. Por otro lado, Fachinotti (20) sugiere que la disponibilidad de una solución analítica permite la evaluación de una solución numérica libre de las incertidumbres de la experimentación.

2.5.5. Discretización

Los cálculos de la entrada de calor, así como el análisis térmico, de esfuerzos residuales, entre otros, se hacen localizados en puntos específicos nombrados nodos, que generan objetos muy pequeños que conforman el modelo 3D de estudio,

formando una red bidimensional (mediante un armazón) o tridimensional (con bloques) conocida como malla. A este proceso de le llama discretización. Una configuración típica de malla para un proceso de soldadura por arco para su cálculo con el modelo de fuente de calor de doble elipsoide se muestra en la Figura 2.30 (11).

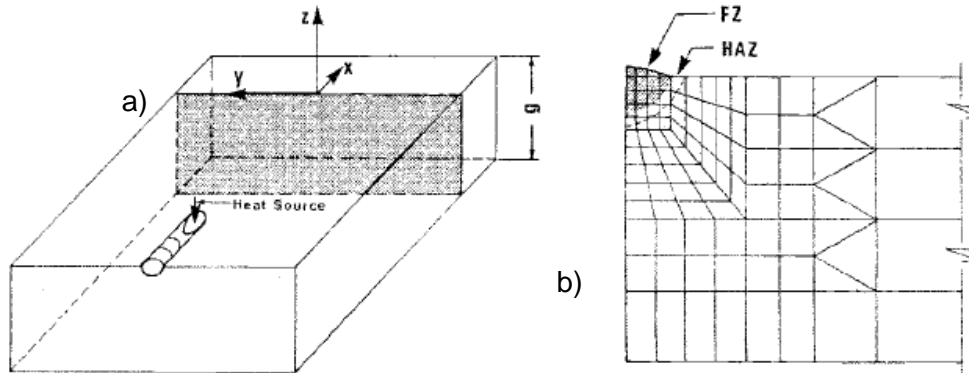


Figura 2.30.- a) Plano de referencia del corte a), y b) configuración típica de malla para una simulación de soldadura con el modelo de fuente de calor de doble elipsoide (11).

Mientras más densos se encuentren los nodos en una malla los resultados son más precisos, sin embargo, el tiempo de cómputo se incrementa. Por ello se emplean diversas técnicas de discretización. La Figura 2.31 presenta algunas de estas técnicas como la subdivisión recursiva o la estrategia de distribución gradual.

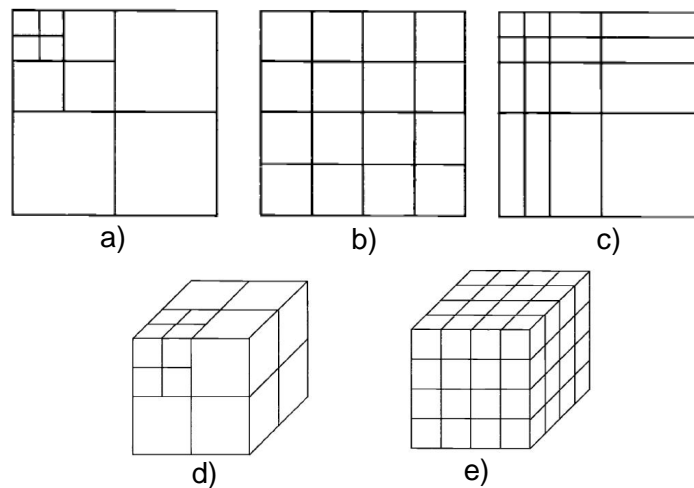


Figura 2.31.- a) Diversas técnicas de generación de malla; a) obtenida por subdivisión recursiva para cargas en una esquina, b) malla regular equidistante, c) estrategia gradual para cargas en una esquina, d) y e) malla 3D representando a y b respectivamente (11).

Por otro lado, la afectación en la calidad de los resultados respecto a la distribución nodal se muestra en el trabajo de Lundäck (21), donde analiza el cambio del perfil térmico únicamente variando la densidad de los nodos en el área de fusión y la afectada por el calor tal como es visible en la Figura 2.32.

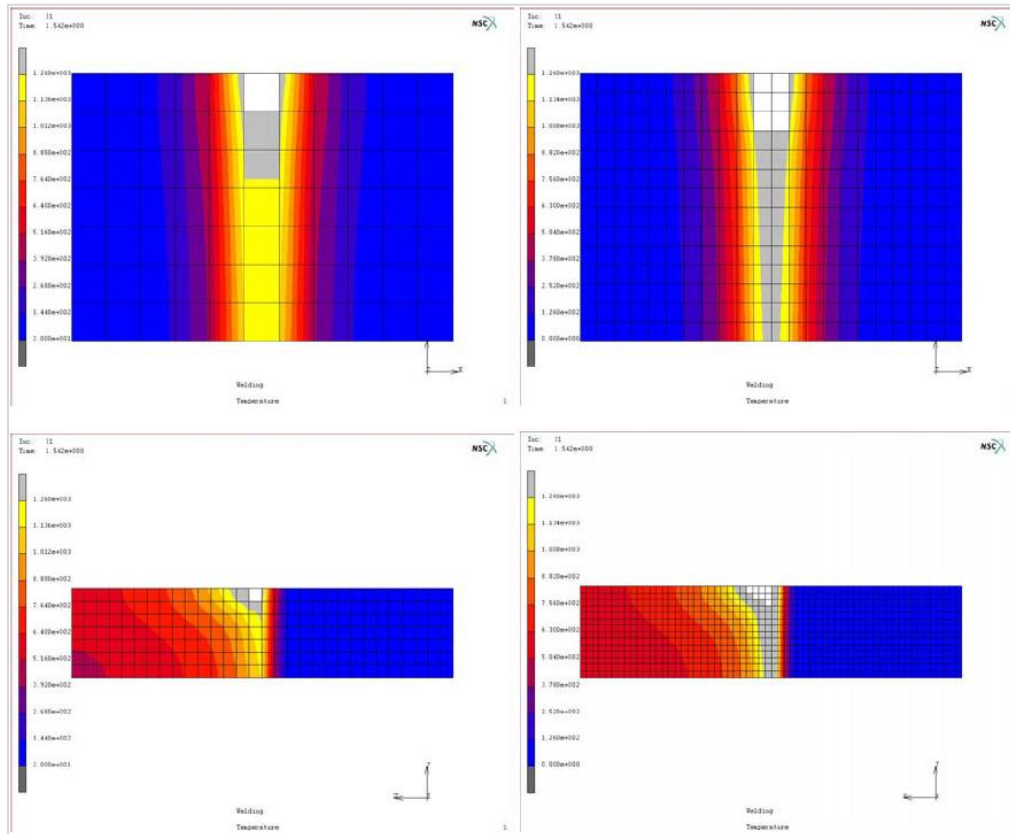


Figura 2.32.- Dos modelos de Elementos finitos con diferente densidad de malla, pero con mismos parámetros de la fuente de calor para la comparación del tamaño de la zona de fusión (21).

Existen también algunos métodos de mallado denominados dinámicos y adaptativos, que concentran los elementos en las regiones donde se dan gradientes de temperatura más grandes. Esto incrementa la eficiencia computacional sin sacrificar precisión. Típicamente la región de malla fina se mueve junto con la fuente de calor, Figura 2.33. Lindgren (12), habla de esto en una forma más amplia.

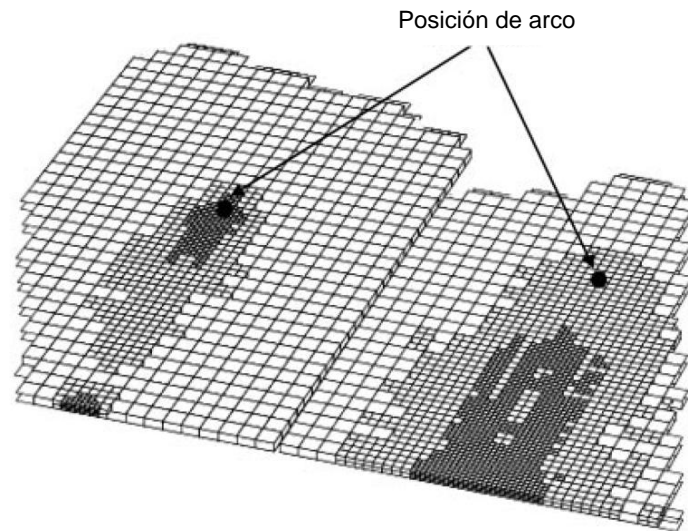


Figura 2.33.- Malla dinámica y adaptativa. Acercamiento a la malla cercana al arco de soldadura (12).

2.5.6. Futuro de la mecánica de soldadura computacional

Se están desarrollando aproximaciones distintas que permitan simplificar la descripción de la fuente de calor de la soldadura con la idea de reducir el tiempo de cómputo que implica la simulación. Tal es el caso de Bhatti y Barsoum (22) quienes proponen el desarrollo de una aproximación nombrada “Vaciado rápido” (Rapid dumping, por su nombre en inglés) que utiliza en un único paso la carga final del enfriamiento para el centro del cordón de soldadura en lugar del empleo de la carga final de enfriamiento en cada paso conforme son activados los bloques en la trayectoria del cordón.

Adicional al cálculo transitorio térmico, el análisis de esfuerzos y el cálculo de la distorsión, existen investigaciones en la dirección de simular la mecánica de fluidos propiamente de la soldadura con el objetivo de predecir del goteo del metal de aporte, la forma libre de la superficie del charco de soldadura y el metal solidificado. Un ejemplo de esto es el trabajo de Hyum (23) en donde simula la formación de la protuberancia en la soldadura. Otro ejemplo es la simulación del

goteo de material de aporte cayendo en el charco de soldadura, parte del trabajo de Goldak, Figura 2.34 (14).

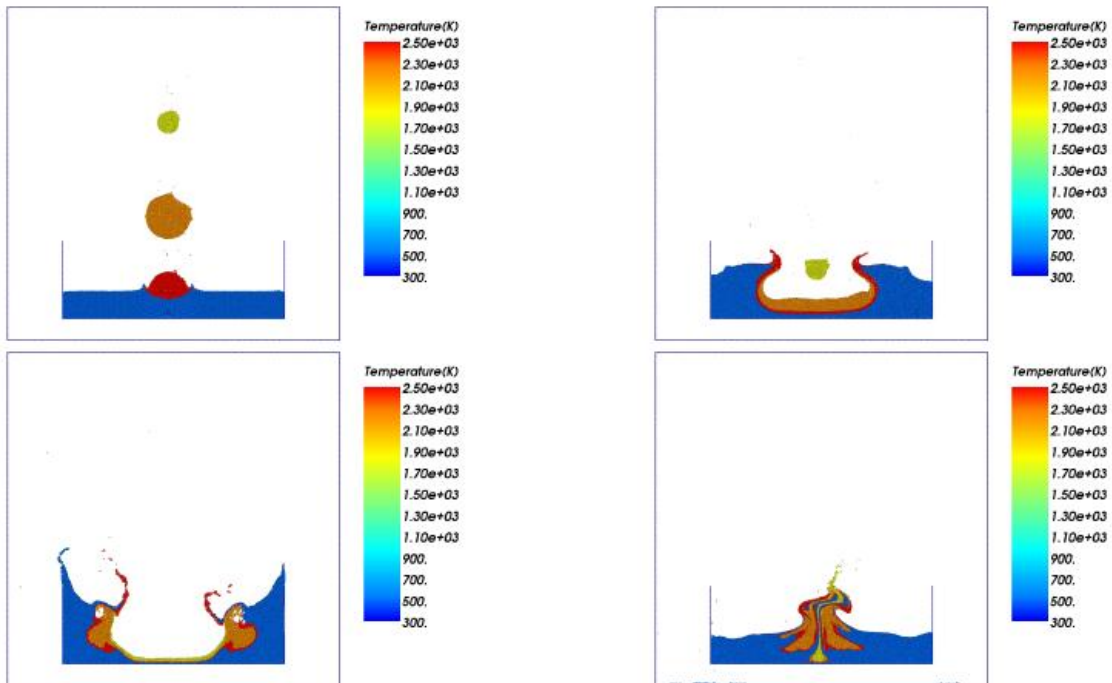


Figura 2.34.- Caída de gotas de material de aporte en el charco de soldadura simulado por con un modelo de hidrodinámica de partículas suavizadas (SPH, por su nombre de origen Smoothed Particle Hydrodynamics).

También han surgido nuevos modelos de negocio respecto al uso de las licencias de uso del software comercial para las empresas. Recientemente, se desarrolló un modelo de negocio nombrado “Software como servicio” (SAS, Software as a Service, por su nombre en inglés) en el que se tiene la habilidad de correr el software en un servidor remoto conocido como nube sin requerir la instalación del software en la computadora local, las implicaciones de tiempo y dinero de parte del departamento de sistemas computacionales para la validación y aprobación del mismo, y sin tener que comprar una licencia anualmente, ya que el usuario paga solo por el recurso usado (14).

Un aspecto interesante con la evolución en general del desarrollo tecnológico del hardware computacional y electrónico, es que ahora se está explorando la

factibilidad de ejecutar el CWM en tiempo real con el fin de poder acercarlo a la industria y convertirlo en una herramienta de uso cotidiano como lo son al día de hoy los modelos computacionales de mecánica de sólidos y de dinámica de fluidos. Lo anterior brindaría la posibilidad, mediante sensores, incluyendo cámaras de visión artificial, de retroalimentar al CWM para interpretar y reportar la calidad de soldadura prácticamente en tiempo real tras su aplicación (14) (24) (25).

2.5.7. Software disponible

En esta sección se exploran las características más destacables del software disponible en el mercado que tratan sobre mecanismos numéricos de simulación, ya sea de geometrías CAD 3D, métodos de cálculo de elemento finito de propósito general o específicos para la aplicación de soldadura. Los tipos de software discutidos en esta sección se engloban en la Figura 2.35. Esto con la intención de tener un horizonte amplio sobre que programas computacionales pueden ser requeridos para el propósito de la simulación de la distorsión por soldadura, ya que es posible que un solo software no ofrezca todas las funcionalidades necesarias o no sea tan eficiente como otros disponibles. De forma que se hará una comparativa sobre las prestaciones y limitaciones del software comercial presentado en la Tabla 2.1 así como una breve explicación de su funcionalidad.

CREO Parametric.- Parte de la empresa PTC, es un programa para diseño y modelado 3D con fines de ingeniería de producto, CAD, CAE y CAM. Permite trabajar con geometrías directas pero especialmente geometrías paramétricas. Puede manejar una amplia variedad de formatos de archivos además del formato nativo. Ofrece paquetes adicionales para la simulación a través del método de elemento finito para análisis estructura y térmico (26).

NX for Design.- Desarrollado desde 2007 por Siemens PLM Software, está destinado al diseño 3D de modelado paramétrico con fines principalmente de CAD / CAE / CAM. Existen disponibles paquetes opcionales para manejar análisis

cinemáticos, dinámica de fluido, análisis térmico así como funciones para análisis de esfuerzos mediante método de elemento finito (27).

Simulia ABAQUS.- Es un software de simulación para ingeniería suministrado por Dassault Systèmes. Su función principal es la solución mediante el método de elemento finito de análisis estáticos, dinámicos y térmicos en usos no lineales. Ofrece una amplia gama de opciones en cuanto a los materiales de trabajo (28).

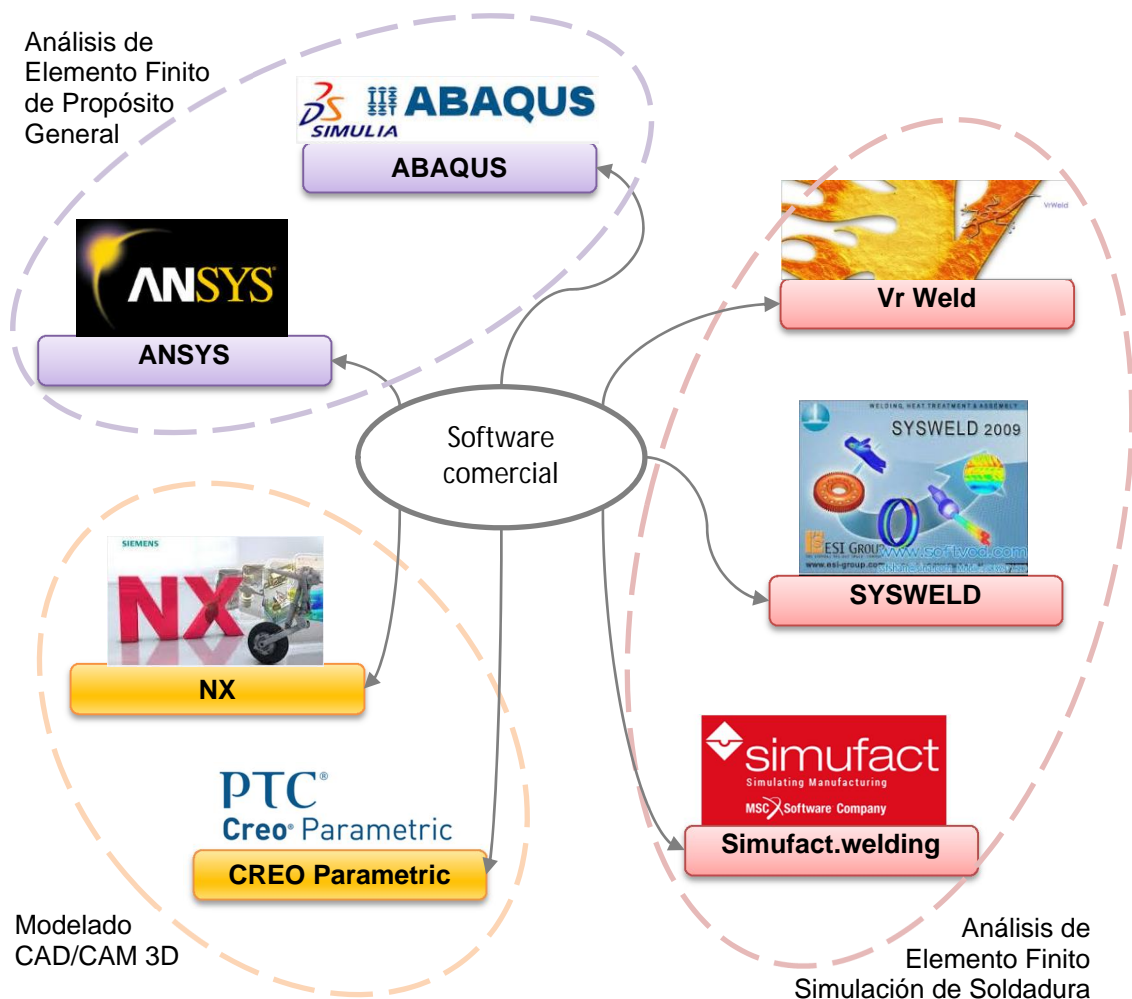


Figura 2.35.- Software comercial considerado en el comparativo. Los logotipos y marcas comerciales pertenecen a las mismas y son presentados en este documento únicamente con fines ilustrativos y para uso educativo (26) (27) (28) (29) (30) (31) (32).

ANSYS Mechanical.- Es una aplicación, por Ansys Inc, como herramienta de análisis de elemento finito para el análisis estructural, lineal y no lineal, y para estudio de dinámicas. También soporta análisis térmico, acústico, termoestructural, así como termoeléctrico (29).

Vr Weld.- Desarrollado por Goldak Technologies Inc. Es un software, a base del método de elemento finito, que permite simular los campos 3D de temperaturas transitorias, la evolución de la microestructura en soldaduras de acero de baja aleación, los desplazamientos en 3D transitorios, distorsión y esfuerzos a lo largo de la soldadura en un marco de tiempo, a partir de una geometría 3D previamente generada por un tercero. Pese a las prestaciones técnicas que ofrece, el interfaz con el usuario es muy poco amigable (32).

Simufact.welding.- Es parte de la suite de marca Simufact que MSC Software Corporation ofrece. Fundamentado en el análisis de elemento finito. Permite predecir distorsión y esfuerzos residuales ocasionados por la soldadura tomando en cuenta los cambios microestructurales. Capaz de calcular a través de las propiedades microestructurales las propiedades del cordón de soldadura como la resistencia mecánica. Soporta la optimización del sistema de sujeción así como de la secuencia de aplicación. Además puede predecir la forma final de las partes soldadas con fines de análisis de calidad dimensional (31).

Sysweld.- Desarrollado y distribuido por ESI. Es un software de simulación de soldadura mediante elemento finito. Se pueden destacar el manejo de geometrías y transferencia de calor no lineales, esfuerzos isotrópicos y cinemáticos por endurecimiento como transformaciones de fase y transformación por plasticidad. Soporta los procesos típicos de soldadura (MIG, TIG, Láser, etc.). Los principales resultados que genera son los gradientes y campos de temperatura, porciones de fase, endurecimiento, distorsión, esfuerzos residuales, esfuerzos plásticos y el esfuerzo de cedencia en base a las fases metalúrgicas. Este software consta de una suite de diversos módulos para procesar las necesidades dentro de la simulación, como el Visual Mesh para gestionar la discretización o mallado de los objetos; el Visual Weld para configurar la simulación incluyendo los parámetros

termo-metalúrgicos-mecánicos, secuencias, tiempos de enfriamiento, restricciones mecánicas, entre otros junto con el procesador para la realización de los cálculos; y el Visual View para visualizar los resultados tanto térmicos como metalúrgicos así como los mecánicos, principalmente la distorsión, por mencionar los que son de interés en este trabajo (30).

Para efectos de uso de este documento este último, ESI SYSWELD, es el software empleado para realizar la predicción de la distorsión.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

3.1. Metodología

Es primordial el tener una metodología clara y específica que dicte los pasos a seguir durante el proceso de solución a la pregunta que motiva este documento para mantener el enfoque. En la Figura 3.1 se puede apreciar de forma esquemática el diagrama de flujo de la metodología con la que se procederá a lo largo de la preparación y la experimentación.

Para poder realizar la comprobación de la hipótesis fue generado un modelo electrónico fundamentado en el método de elemento finito expresado mediante una sesión o configuración del software comercial de análisis disponible que da solución a las necesidades específicas. Durante este proceso es requerido que se haga la comprobación del simulador a través de experimentación preliminar de variables básicas muy localizadas que ponga a prueba los resultados del modelo dando indicación de su proximidad a las condiciones del mundo real. Esto además de dar guía de la necesidad de ajustes al sistema, también arroja información útil para los mismos fines.

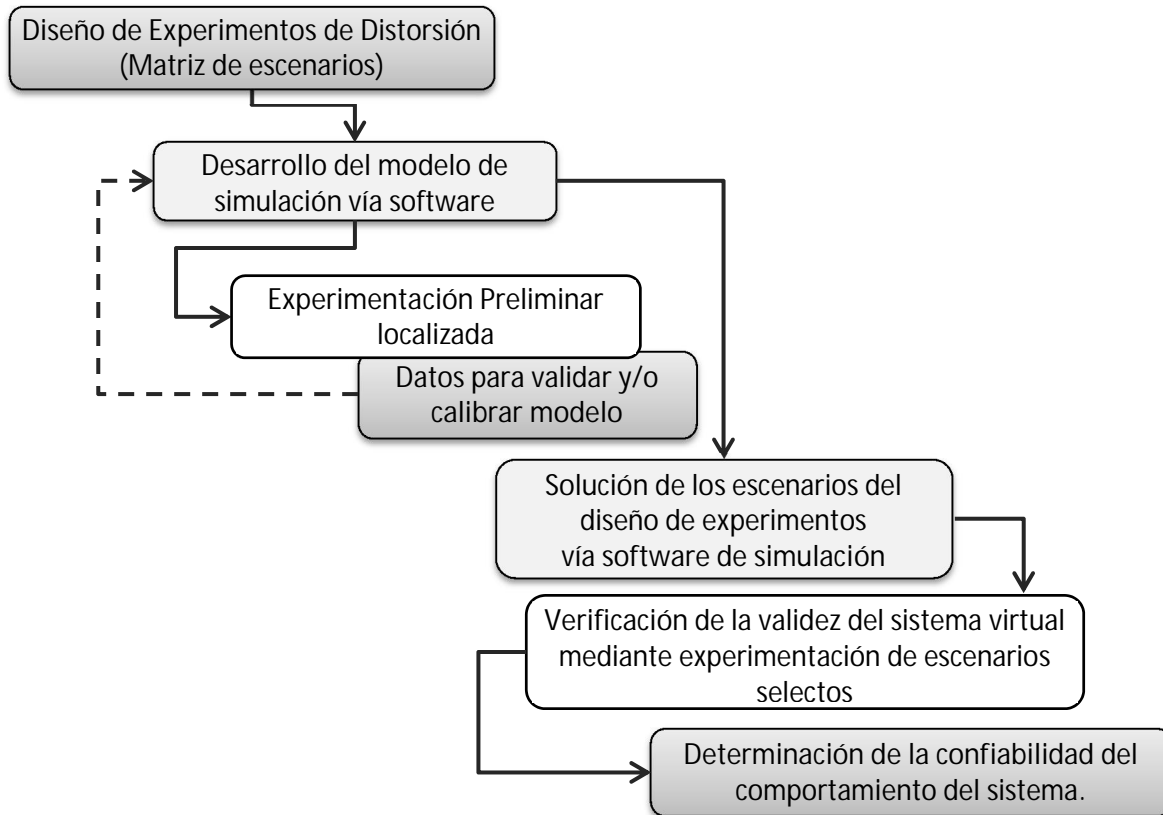


Figura 3.1.- Diagrama de flujo de la metodología a lo largo de la preparación y experimentación para la simulación de distorsión por soldadura.

Lo siguiente describe en orden lógico y cronológico los pasos realizados como metodología para materializar este trabajo. La sección que le precede muestra detalles más específicos sobre los datos destacables. Esta misma metodología se puede distinguir en los trabajos de Asadi (16), Flint (17), Colegrove (18) y Muneel. (33).

3.1.1. Diseño de Experimentos

1. Conceptualización del experimento, y diseño del mismo.
2. Diseño de piezas para las pruebas.
3. Identificación de variables a controlar.

3.1.2. Experimentación Preliminar

4. Elaboración de piezas de trabajo para experimentación preliminar (Corte y Doblez). Ensamble y punteo de partes.
5. Preparación de termopares con aislantes cerámicos y montaje en la pieza de trabajo según el arreglo diseñado.
6. Preparación de computadora portátil y tarjetas de adquisición de datos para captura de lecturas de termopares
7. Gestación e instalación de dispositivo de locación de la pieza de trabajo en la celda de robot de soldadura.
8. Programación de la trayectoria del robot para la soldadura, y parametrización del procedimiento de soldadura en el equipo.
9. Soldadura de piezas según programa y parámetros de soldadura previamente establecidos, junto a la lectura en tiempo real de las temperaturas mediante las tarjetas de adquisición de datos.
10. Pre-procesamiento de datos, procesamiento y análisis de las temperaturas.
11. Pruebas destructivas de macroataque de secciones soldadas. Obtención del perfil de soldadura.
12. Análisis de microdurezas en zonas baja, media y alta del perfil.
13. Micrografías. Análisis y caracterización microestructural. Cuantificación de fases microestructurales.
14. Correlación y análisis de datos obtenidos.

3.1.3. Calibración de la Simulación

15. Elaboración de un modelo simplificado y generación de malla de nodos en el software de simulación de distorsión para efectos de calibración.
16. Establecimiento de parámetros para la simulación. Propiedades termomecánico-metalúrgicas del material, restricciones mecánicas, parámetros del proceso de soldadura, secuencia de aplicación.

17. Ejecución del cálculo de simulación.
18. Análisis y comparación de corte seccional de la soldadura virtual contra la real para calibración de simulación. Perfil de soldadura, conteo de fases.
19. Calibración de la sesión de software de simulación en base a datos obtenidos.

3.1.4. Simulación

20. Elaboración del modelo electrónico de la pieza de trabajo y generación de malla de nodos en el software de simulación de distorsión.
21. Establecimiento de parámetros para la simulación. Propiedades termomecánico-metalúrgicas del material, restricciones mecánicas, parámetros del proceso de soldadura, secuencia de aplicación según calibración previa.
22. Ejecución del cálculo de simulación.

3.1.5. Experimentación Final

23. Elaboración de piezas de trabajo para experimentación (Corte y Doble). Ensamble y punteo de partes según planos de construcción.
24. Medición de piezas mediante escáner 3D para obtención de dimensiones previas al proceso de soldadura. Preparación y procesamiento de nube de puntos para obtención de modelo 3D sólido.
25. Preparación de termopares con aislantes cerámicos y montaje en la pieza de trabajo según el arreglo diseñado.
26. Preparación de computadora portátil y tarjetas de adquisición de datos para captura de lecturas de termopares
27. Gestación e instalación de dispositivo de locación de la pieza de trabajo en la celda de robot de soldadura.
28. Programación de la trayectoria del robot para la soldadura según el diseño de experimentos, y parametrización del procedimiento de soldadura en el equipo.
29. Soldadura de piezas según programa y parámetros de soldadura previamente establecidos, junto a la lectura en tiempo real de las temperaturas mediante las tarjetas de adquisición de datos.

30. Pre-procesamiento de datos, procesamiento y análisis de las temperaturas.
31. Medición piezas mediante escáner 3D para obtención de dimensiones posteriores al proceso de soldadura. Preparación y procesamiento de nube de puntos para obtención de modelo 3D sólido.
32. Comparativa dimensional de las piezas antes y después del proceso de soldadura.
33. Correlación y análisis de datos obtenidos.

3.1.6. Validación de la Simulación

34. Comparación de resultados dimensionales de la simulación contra las mediciones de las piezas reales soldada.
35. Análisis del índice de certidumbre de la simulación.

3.2. Diseño de Experimentos de Distorsión

Previo a la configuración del sistema de simulación para predecir la distorsión y su preparación, se elaboró una matriz de experimentos planteando 6 diferentes escenarios con diversos niveles en las variables esenciales de entrada buscando analizar ciertas variables de salida en relación con la distorsión por soldadura. Uno de los escenarios es resuelto mediante el modelo electrónico de simulación propuesto registrando los resultados.

De este mismo se realizó la experimentación física completa para poder cotejar el resultado de la simulación contra el obtenido en el ensayo y así poder determinar la confiabilidad del sistema.

3.2.1. Variables de entrada

Se consideraron las siguientes variables esenciales de entrada para el diseño de experimentos.

- **Vt** Velocidad de viaje, en cm/min.
- **I** Corriente de soldadura, en amperes.
- **V** Voltaje de soldadura, en volts. Sinérgico respecto a la corriente basada en las tablas de la máquina de soldar
- **Sq** Secuencia de aplicación de los cordones
- **Q** Calor de entrada calculado.
- **esp** Espesor del material de las piezas.

Sin embargo, durante la experimentación de este documento se buscan variaciones solo en la secuencia de aplicación de la soldadura. Siendo recomendable para un trabajo posterior la variación en la cantidad de corriente I , del espesor del material o en la velocidad de avance.

3.2.2. Matriz de escenarios

La experimentación virtual mediante el simulador se realiza en base a la matriz de escenarios mostrada en la Tabla 3.1 en la cual se presentan 6 escenarios considerando 1 nivel de calor de entrada ocasionado por la cantidad de corriente (amperaje) en referencia cruzada con 6 diferentes secuencias de aplicación de soldadura. Esto es, dos escenarios con 2 cordones de soldadura, y otros cuatro escenarios con 4 cordones en distintos órdenes de ejecución. En la Tabla 3.1 también se distingue un escenario resaltado dentro de líneas punteadas el cual es sometido a experimentación física para validar el simulador.

El espesor de las placas se mantiene constante en 6 mm en todos los escenarios, así como la velocidad de avance. El amperaje es considerado como constante así como el voltaje. Siendo este último establecido en relación a la corriente en base a tablas sinérgicas del proveedor de la máquina de soldar. El seccionamiento, dirección y orden de la aplicación de los cordones de soldadura son el foco de variabilidad del ejercicio como ya se mencionó.

Tabla 3.1.- Matriz maestra de escenarios del diseño de experimentos.

Matriz Maestra de Escenarios		1 Nivel de Calor de entrada	Corriente Amperes	WFS m/min	Voltaje Volts	Trim Factor	Vt cm/min
			14.5	57	45		
		Secuencia de aplicación - Variables de orden y dirección					
Número de cordones		a	b	c	d	e	f
2 Cordones	Aplicación secuencial de soldadura						
	Representación visual						
4 Cordones	Aplicación secuencial de soldadura						
	Representación visual						

Voltaje (Trim). Dependiente del amperaje. Basado en la línea sinérgica de la máquina de soldar.
WFS. Velocidad de alimentación de alambre por sus siglas en inglés (wire feed speed).

3.2.3. Geometría de parte de trabajo

La simulación se realiza sobre una pieza de trabajo de características tubulares con barrenos pasados en los extremos. El diseño de la pieza está compuesto de dos canales en forma de perfil "C" con dos dobleces a 90° con concavidad opuesta donde una de las piezas está incrustada en la segunda, asumiendo un ajuste deslizable entre las partes, creando uniones de bisel ensanchado. El ensamble de las partes se muestra en perspectiva del modelo 3D en la Figura 3.2 así como las partes simples se aprecian en la Figura 3.3.



Figura 3.2.- Vista en perspectiva del modelo 3D de la pieza de trabajo.

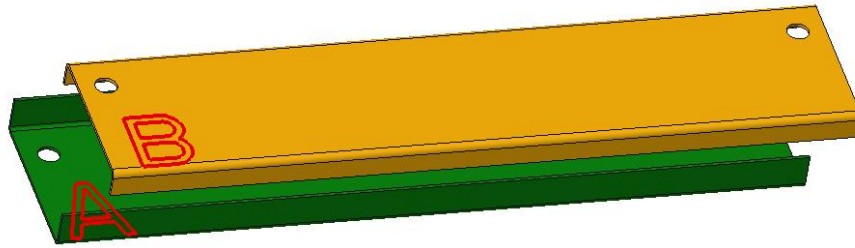


Figura 3.3.- Partes simples desensambladas A y B.

El espesor de ambas partes simples es de 6 mm. Las dimensiones totales de la pieza de trabajo son 1350 mm de longitud, por 312 mm de ancho por 70 mm de profundidad. Los diámetros pasados de la pieza son de 40 mm. Con un radio interno de dobléz de 6 mm en ambas partes. Los dibujos de fabricación de las piezas A y B se distinguen en las Figura 3.4 y Figura 3.5 respectivamente. En la Figura 3.6 se tiene el dibujo de construcción del ensamble. Los diámetros perforados pasados en la estructura tubular son considerados para poder medir dimensionalmente la desalineación de los ejes que forman los mismos como resultado de la distorsión.

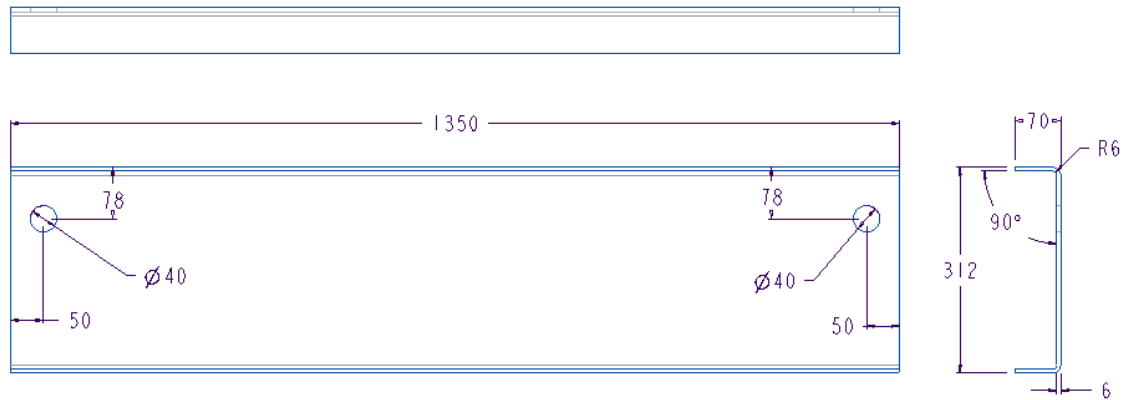


Figura 3.4.- Dibujo dimensional de la parte A. Vistas ortogonales. Cotas en mm.

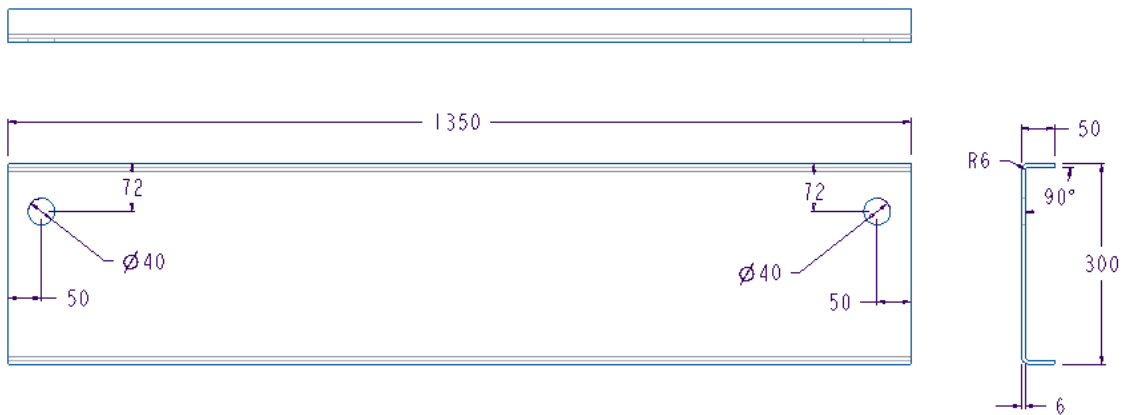


Figura 3.5.- Dibujo dimensional de la parte B. Vistas ortogonales. Cotas en mm.

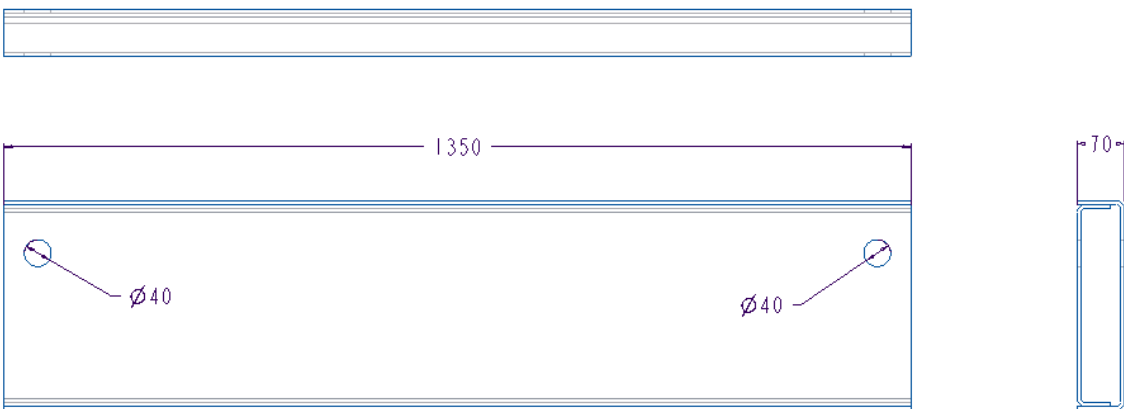


Figura 3.6.- Dibujo dimensional de la pieza de trabajo. Vistas ortográficas. Cotas en mm.

3.2.4. Materiales

El material utilizado en las piezas de prueba es un ANSI / ASTM A572 grado 50, denominado como acero de alta resistencia de baja aleación, HSLA (por su nombre en inglés, High Strength Low-Alloy), cuya composición química se muestra en la Tabla 3.2 (34). Las propiedades mecánicas se presentan en la Tabla 3.3, basados en el estándar ASTM de especificación para aceros de alta resistencia baja aleación Niobio-Vanadio de calidad estructural (Standard Specification for High Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Steels of Structural Quality, por su nombre en inglés) (35). Fue empleado un electrodo consumible de diámetro 1.143 mm (0.045") de clasificación ER70S-6 según la AWS A5.18/A5.18M:2005 Especificación para electrodos y varillas de acero al carbono para soldadura de arco protegido por gas (Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding, en su idioma original) (36). Cabe destacar que fue usado un alambre electrodo de aleación Mn/Si sin recubrimiento de cobre, cuya composición química se aprecia en la Tabla 3.2, además de sus propiedades mecánicas en la Tabla 3.4 siendo comercialmente conocido como ESAB AristoRod (37).

Tabla 3.2.- Requerimientos químicos del acero A572 grado 50 según ASTM (% e. p.) y composición química típica del material de aporte ER70S-6 (% e. p.). (35) (37).

Material	C	S	Mn	P	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	V
A572 grado 50	0.23	0.05	1.35	0.04	0.30	-	-	-	0.20 min	-
ER70S-6	0.08	0.012	1.46	0.013	0.85	0.03	0.04	0.01	0.07	0.005

Tabla 3.3.- Requerimientos mecánicos del acero A572 grado 50. (35).

Limite elástico, mínimo.		Esfuerzo a la tensión, mínimo.		% Elongación	
psi	MPa	psi	MPa	en 200 mm	en 50 mm
50,000	345	65,000	450	18	21

Tabla 3.4.- Propiedades mecánicas del material de aporte ER70S-6. (37).

Limite elástico, mínimo.		Esfuerzo a la tensión, mínimo.		Reducción área	Elongación
psi	MPa	psi	MPa	%	%
66,000	455	82,000	565	56	27

3.2.5. Variables de salida

Mediante la simulación virtual de los escenarios de experimentación se obtuvieron y registraron las siguientes variables de salida en el sistema.

a) Distorsión

- i. Planicidad de la cara superior de la pieza B. Figura 3.7 y Figura 3.8.
- ii. Paralelismo entre los ejes de los cilindros generados por los diámetros, AB_1 y AB_2. Figura 3.7, Figura 3.8 y Figura 3.9.
- iii. Deformación dimensional en coordenadas específicas respecto a un plano.



Figura 3.7.- Cara superior de parte B. Ejes AB_1 y Ejes AB_2 de la pieza de trabajo. Vista en isométrico.



Figura 3.8.- a) Pieza de trabajo acortada, Ejes AB_1 y AB_2 en vista superior; b) Línea representando Planicidad de cara superior de parte B, diámetros A_01 y B_01 junto con eje AB_01, diámetros A_02 y B_02 junto con eje AB_2. Vista lateral.

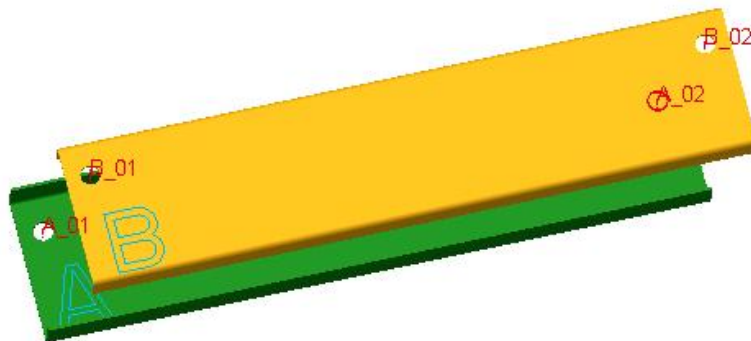


Figura 3.9.- Diámetros A_01, A_02, B_01 y B_02 en partes desensambladas. Vista isométrica.

b) Temperatura

- i. En coordenadas específicas tras un tiempo t específico tras la soldadura.

3.2.6. Aplicación y junta de soldadura

En la Figura 3.10 se muestra el dibujo dando la especificación de soldadura de este prototipo, donde se aclara que las soldaduras son de 8 mm de cara a todo lo largo de las juntas. Nótese que la geometría de la unión de las partes da como resultado juntas de borde con elementos curvos para una soldadura de bisel en medio ($\frac{1}{2}$) "V" ensanchado, como se ve en la Figura 3.11, teniendo la aplicación de ambos cordones de soldadura en la misma cara de pieza.

Resulta destacable notar que no se han encontrado reportes de trabajos de simulación de soldadura sobre biseles ensanchados como los presentados en este documento. Los trabajos de Muneel (33) y Karbalur (38) se concentran en juntas de geometrías rectas como filetes en uniones en T, Deng (39) trabajó con placas soldadas a tope, y la investigación de Lindström (40) se realizó sobre soldaduras de ranura en placas a tope con biseles planos.

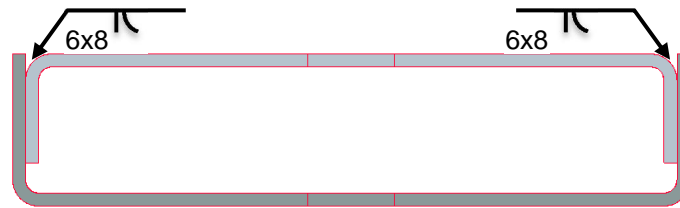


Figura 3.10.- Sección transversal de la pieza.

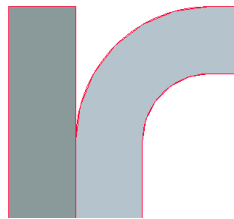


Figura 3.11.- Sección transversal de la pieza. Acercamiento a la junta de soldadura.

3.2.7. Secuencia de aplicación de soldadura

Dadas las características de la pieza es posible soldarla bajo diversas secuencias de orden y sentido, además de que es factible dividir los cordones en segmentos más pequeños de aplicación dando una gama más amplia en estos escenarios de secuencia. Para efectos de este trabajo se exploraron las secuencias y segmentaciones mostradas en la Figura 3.12.

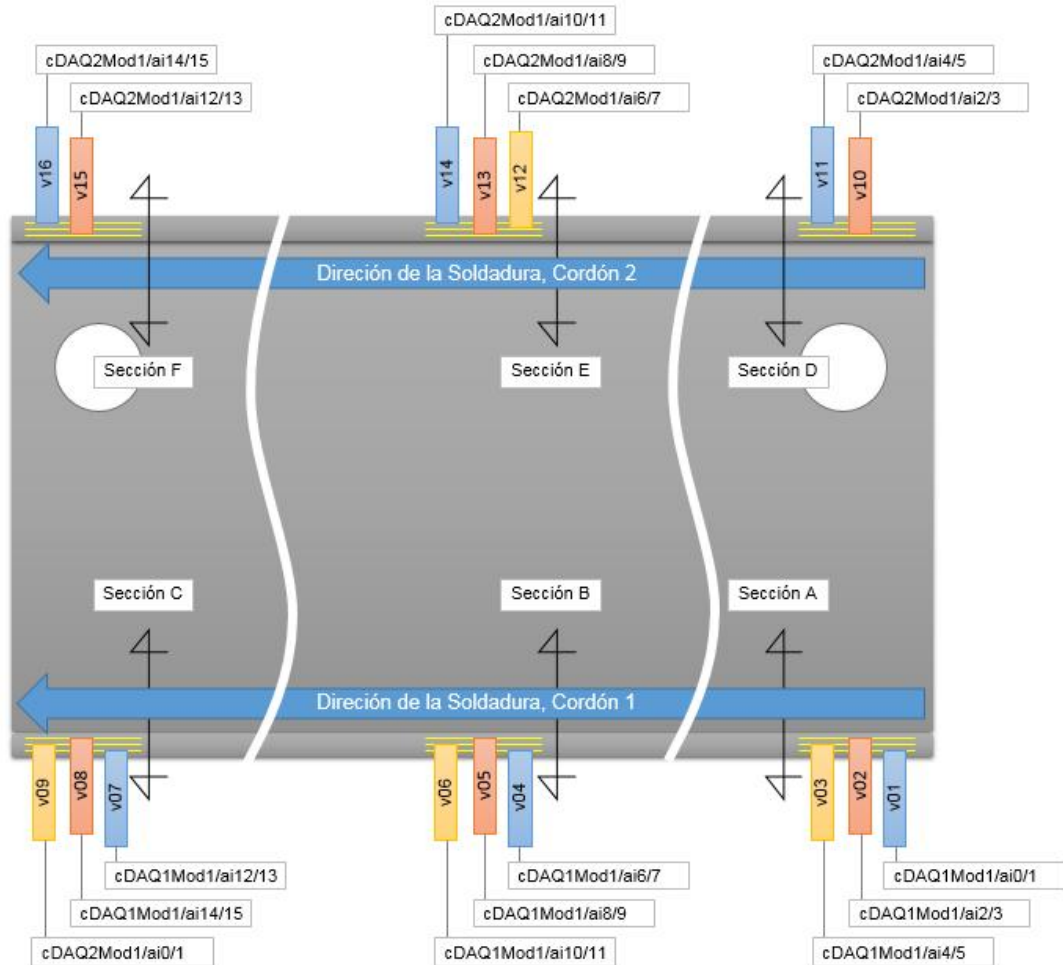


Figura 3.13.- Esquema descriptivo: a) posición y nomenclatura de vainas cerámicas y termopares; b) dirección y secuencia de soldaduras; c) ubicación secciones A, B, C, D, E y F. La dirección de los cordones solo se muestra como referencia, no refleja la experimentación.

En la Figura 3.14 a) se aprecian las tarjetas de adquisición de datos, así como en b) la pieza de trabajo real en su montaje en la mesa de trabajo junto con la instalación de los termopares según el arreglo descrito previamente.

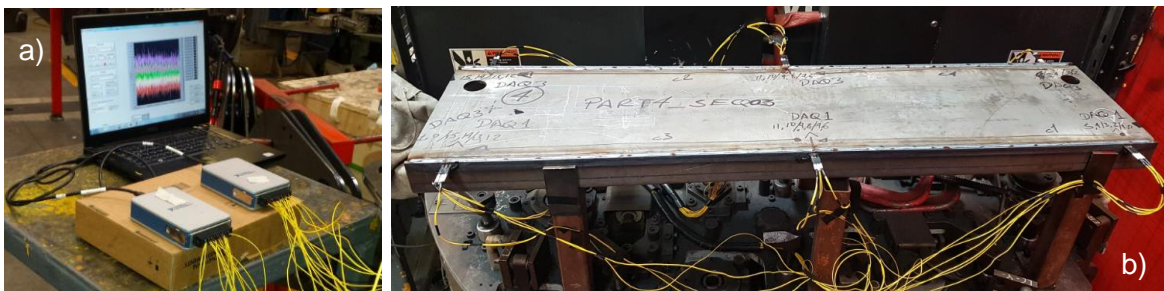


Figura 3.14.- a) Tarjetas de adquisición de datos empleadas; b) Pieza de trabajo real con arneses de termopares instalados.

Los termopares se instalaron en barrenos perforados con una máquina herramienta de control numérico haciendo uso de una broca de 3/8 de pulgada (9.525 mm) en juegos de 3 aisladores cerámicos redondos (vainas) de 3/8" (9.525 mm) a diferentes profundidades del material base en el sentido transversal de la dirección de la soldadura. Las profundidades empleadas respecto a la cara lateral externa de la pieza de trabajo son 2 mm, 3 mm y 4 mm. Esto se presenta en las imágenes de la Figura 3.15.

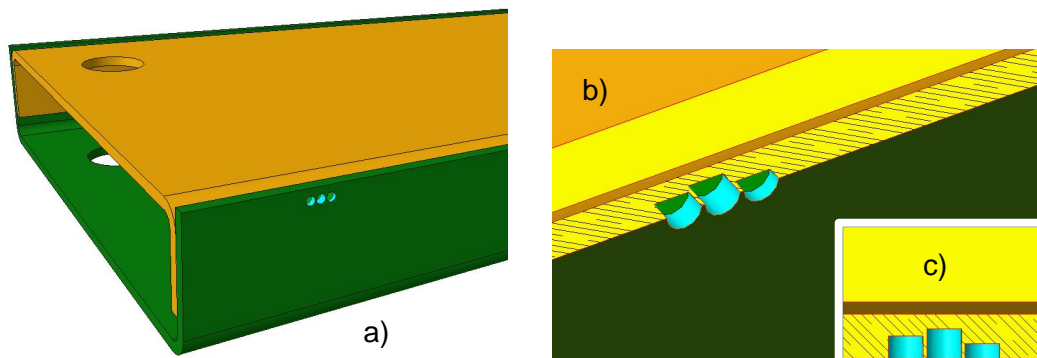


Figura 3.15.- Preparación para instalación de termopares en la pieza de trabajo, a) Vista en perspectiva de perforaciones; b) Corte longitudinal en el plano horizontal en isométrico; c) Corte longitudinal en el plano horizontal vista superior.

Si se considera la profundidad en términos de coordenadas respecto al eje de la misma, y se determina el cero (0) en la cara interna del material, es decir, desde la pared en la raíz de la junta de soldadura, se tienen las profundidades como se ve en la Figura 3.16. En la misma imagen se muestra la distancia desde la cara superior de pieza hasta el centro del diámetro perforado.

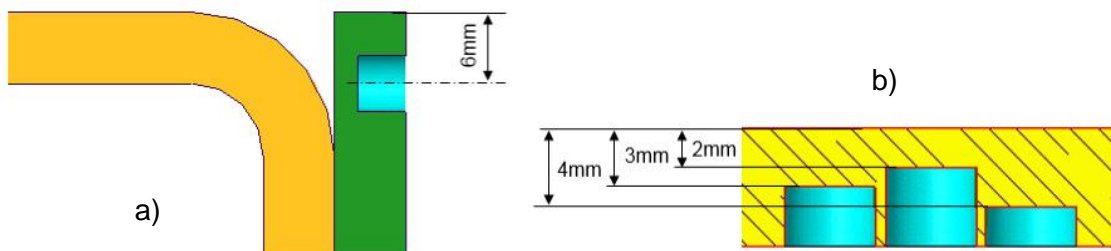


Figura 3.16.- Dimensiones de barrenos para vainas, a) distancia desde la cara superior de la pieza; b) profundidad de perforaciones.

3.2.9. Proceso de soldadura

El proceso de soldadura fue ejecutado a través de un robot de soldadura marca YASKAWA MOTOMAN® MA1900 DX100 equipado con una máquina de soldar MILLER AXCESS® 450, mostrados en la Figura 3.17, mediante el proceso GMAW con el modo de transferencia rociado pulsado modificado por el fabricante conocido como “Accupulse”.

Los parámetros de soldadura se distinguen en la Tabla 3.5. La mezcla de gas de protección usada fue Ar 95% / O₂ 5%, con un flujo de 1.274 m³/h (45 pie³/h).



Figura 3.17.- Equipo usado para la experimentación, a) máquina de soldar, b) robot industrial de soldadura.

Tabla 3.5.- Valores de Variables del proceso GMAW.

Variable	Modo de Transferencia	Velocidad de Avance	Velocidad Alimentación de Alambre		Ajuste de Arco (altura)	Control de Arco (ancho)
Unidad	Rociado Pulsado	cm/min	m/min	ppm	Factor	Factor
Escenario:	AccuPulse	45	14.5	570	57	25

3.3. Desarrollo del modelo de simulación vía software

A continuación se describe de forma breve la secuencia de pasos para proceder en la generación del modelo electrónico de simulación de distorsión en el

software. En este caso el software empleado es SYSWELD de la empresa ESI Group como se mencionó antes.

3.3.1. Originar geometría 3D de pieza

Inicialmente se debe contar con la geometría 3D de pieza de trabajo o generarla en un software de CAD 3D. En este paso particular se empleó PTC CREO Parametric, dado que es la aplicación disponible para este trabajo, además de las prestaciones que tiene sobre el modelado y la habilidad de manejar múltiples formatos de archivos. La geometría CAD 3D original se exportó a formato IGES para su uso en SYSWELD.

3.3.2. Software de simulación de soldadura

Los siguientes pasos describen las operaciones o configuraciones para preparar la aplicación para la simulación:

- a) Importación de objetos 3D CAD.
- b) Generación de malla de nodos. Esto fue realizado en Visual Mesh (parte del paquete de SYSWELD). Los objetos finales incluyendo la parte A, parte B y ambas soldaduras, se forman de 162,842 nodos, creando 220,359 elementos principalmente de 4 aristas en un plano, dado estructuras hexaédricas, y algunas pocas formaciones pentaédricas, con un tamaño mínimo de 0.5 x 0.5 mm y 0.5 x 1 mm. En capas longitudinales de 5 mm en las áreas más densas. Aunque si bien es deseable tener capas de longitudes más cortas, las limitaciones de hardware imposibilitaron más densidad. Esto se aprecia en la Figura 3.18. Adicionalmente se puede observar como la malla es más densa en las áreas donde son afectas directamente por la fuente de calor, permitiendo un cálculo más preciso, buscando economía en los nodos más alejados de él para reducir su cantidad.

Por otro lado, es conveniente mencionar, que son limitados los estudios documentados sobre simulaciones de soldadura con geometrías de bisel ensanchado, presentando solo referencias hacia biseles rectos o juntas en T. La malla resultado del proceso de discretización de este trabajo, requirió alrededor de 15 iteraciones para alcanzar la forma y dimensiones finales.

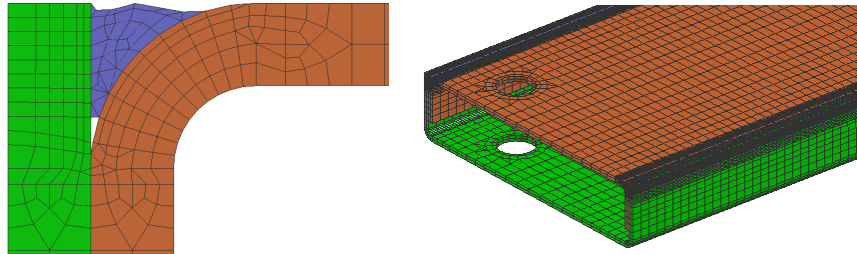


Figura 3.18.- Imágenes de la malla de nodos generada.

- c) Asignación de propiedades de los materiales, tanto Parte A, Parte B como el material de aporte.
 - ii. Químicas.
 - iii. Mecánicas.
 - iv. Térmicas.
 - v. Curvas de flujo.
 - vi. Transformaciones de fase (TTT, etc.).
- d) Establecimiento de límites mecánicos.
 - i. Dispositivo de fijación, mesa de trabajo, puntos de apoyo.
 - ii. Sujeción y puntos de restricción mecánica.
 - iii. Comportamiento de la sujeción tras la soldadura.
- e) Trayectoria de la soldadura.
 - i. Definición de nodos sobre la trayectoria.
 - ii. Posición.
 - iii. Orientación de material de aporte.
 - iv. Dirección de avance.
- f) Establecimiento del Modelo de la fuente de calor.

- i. Tipo de modelo (Doble elipse de Goldak).
 - ii. Parámetros geométricos de la fuente.
- g) Parámetros de soldadura.
 - i. Velocidad de avance.
 - ii. Energía (Corriente eléctrica y Voltaje).
 - iii. Eficiencia del proceso.
- h) Geometría de la soldadura.

Geometría del cordón en base a trayectoria, parámetros y especificaciones.
- i) Secuencia de soldadura.

Especificación de la dirección, orden y los tiempos en los que las trayectorias de las soldaduras son aplicadas.
- j) Método de solución.
 - i. Solución termo-metalúrgica (Transformaciones de fase).
 - ii. Solución mecánica.
 - iii. Marco de tiempo de la solución.
- k) Ejecución de validación.

Verificación de variables de salida principales.
- l) Experimentación Preliminar localizada para calibración.
- m) Retroalimentación con datos para validar y/o calibrar modelo.

3.3.3. Solución de escenarios del diseño de experimentos vía software de simulación

Se dará solución a un escenario de la matriz del diseño de experimentos según la matriz de experimentos mostrada en la sección 3.2.2 Matriz de escenarios

El registro de los datos arrojados por la simulación, así como de la experimentación física para análisis posterior, se hace en base a la matriz de resultados de experimentación mostrada en la sección 3.2.2 Matriz de escenarios.

3.3.4. Equipo de Cómputo

La simulación se realizó en un equipo de cómputo con un procesador Intel Xeon E5-2620 2.9 GHz con 12 núcleos con 16GB de memoria RAM, con un disco duro de 1TB. Sin embargo, por limitaciones de la licencia del software de simulación, las soluciones de software se ejecutaron con 4 núcleos del procesador.

3.4. Verificación de la validez del sistema virtual mediante experimentación de escenarios selectos

Dada la matriz del diseño de experimentos mostrada en la sección 3.2.2 Matriz de escenarios fue ejecutada físicamente la experimentación de un escenario identificado, para obtener las variables de salida consideradas, y se asentaron los resultados producidos bajo el mismo esquema que los obtenidos en las simulaciones para su posterior comparación.

3.5. Determinación de margen de incertidumbre

Dados los datos producidos por la simulación, en confrontación con los datos capturados experimentalmente, mediante porcentajes simples se determinó el margen de confiabilidad del sistema simulado expresado como el porcentaje de incertidumbre.

CAPÍTULO 4

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Resultados y Análisis

Tras la realización de la experimentación física, la generación y calibración de la simulación de una probeta representando la geometría y condiciones de la junta de soldadura, y la simulación completa de la pieza de trabajo, se tiene los resultados presentados en esta sección. En la Figura 4.1 se aprecia la pieza física en contraste con la pieza generada para la simulación.

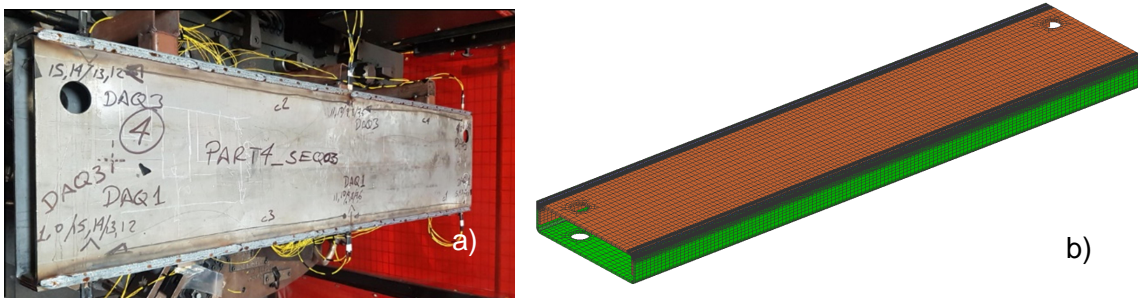


Figura 4.1.- Fotografía de a) pieza de experimentación en contraste con b) pieza generada para la simulación.

La preparación de la simulación tomando en cuenta la discretización de las piezas de trabajo (generación, verificación y corrección de malla), la configuración y condiciones de la simulación (indicación de materiales, especificación de trayectorias y su secuencia de activación, comportamiento del enfriamiento,

restricciones mecánicas, entre otras), y arrancar el proceso de cálculo requirió un consumo de tiempo horas-hombre de alrededor de 8 horas efectivas. Esto sin cuantificar la conceptualización y gestión del diseño de la geometría original, la obtención de los datos de material, ni el tiempo de cálculo del software, y asumiendo un manejo de nivel medio del software empleado.

El tiempo de cómputo para la simulación fue de 31.452 h (113,230 segundos.), dividido entre el cálculo termo-metalúrgico mecánico del cordón 1 (13.981 h), el cordón 2 (14.259 h) y el proceso de enfriamiento (3.211 h). Esto evidencia el uso intensivo del recurso del computador, así como las implicaciones del complejo proceso de cálculo, que se reflejan en tiempos de cálculo muy extensos.

Una consideración a tomar en cuenta en los resultados mostrados aquí, es que no se logró tener una coincidencia exacta entre las propiedades químicas, térmicas y mecánicas del material de la simulación con el empleado en la experimentación. Fue usada una base de datos de un acero de la misma clase, con porcentajes de composición química cercanos, logrando dar resultados representativos para efectos de este trabajo sin interrumpir su propósito. Sin embargo se acota que es idea el contar con una coincidencia más cerrada para asegurar una mayor exactitud en el comportamiento de material en la simulación y consigo una predicción más cercana a la realidad.

En la Figura 4.2 se muestra la apariencia de la fuente de calor basada en la doble elipse de Goldak después del proceso de calibración. En la Figura 4.3 se aprecian los parámetros geométricos empleados. La Tabla 4.1 presenta las lecturas de los parámetros de soldadura durante la experimentación. Cabe destacar que la entrada de calor con base en las lecturas de voltaje y amperaje de la experimentación, y la velocidad de desplazamiento da como resultado $Q=1150.9$ J/mm, si se asume una eficiencia de 0.8 como lo reporta Kou (6), se tiene $Q_{ef} = 920.7$ J/mm. Esto en contraste con la energía establecida en la simulación, $Q_{sim_ef} = 750$ J/mm, tras la calibración de la fuente. Esto ocasionado posiblemente por la

modulación de las ondas pulsadas de voltaje y corriente del modo de transferencia empleado.

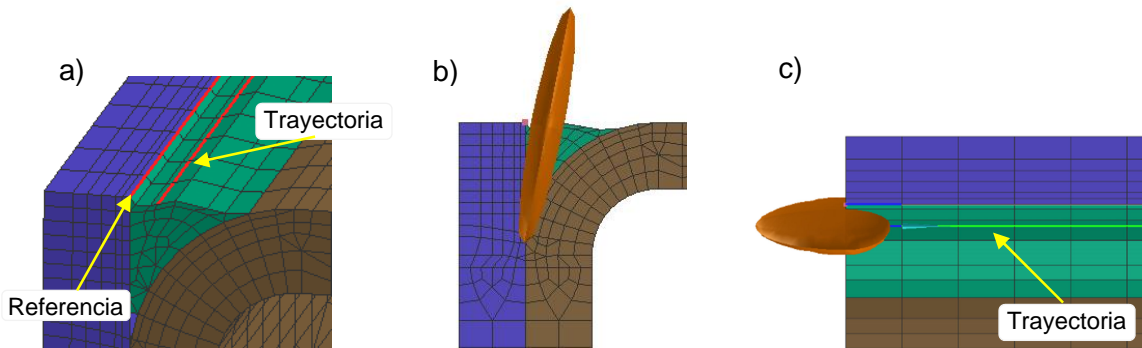


Figura 4.2.- Imágenes de la apariencia de la fuente de calor después del proceso de calibración, a) línea de trayectoria de la fuente de calor y línea de referencia; fuente de calor según la doble elipse de Goldak en b) corte seccional; c) vista superior.

Estimated		Velocity: <input type="text" value="mm/sec"/>	
*Length:	<input type="text" value="12.000"/>	Weld Line	Weld Pool
*Width:	<input type="text" value="3.000"/>	Energy	
*Penetration:	<input type="text" value="11.000"/>	Heat Source:	<input type="text" value="ARC"/>
		*Velocity:	<input type="text" value="7.500"/>

Figura 4.3.- Parámetros de la fuente de calor resultado de la calibración de la simulación.

Tabla 4.1.- Valores de Variables del proceso GMAW en la experimentación.

Variable	Modo de Transferencia	Velocidad de Avance	Corriente	Voltaje
Unidad	Rociado Pulsado	mm/s	A	V
Escenario:	AccuPulse	7.5	322	26.0

4.2. Temperaturas

La Figura 4.4 a) muestra la gráfica temperatura-tiempo de los termopares durante la soldadura del tiempo $t=0$ a 900 segundos de la experimentación física, deteniendo las lecturas al tener todos los canales de datos por debajo de los 80°C , siendo posible apreciar el comportamiento del enfriamiento de los 6 sectores

medidos. En contraste, se tiene la Figura 4.4 b) que presenta la gráfica temperatura-tiempo generada por la simulación producto del proceso de calibración.

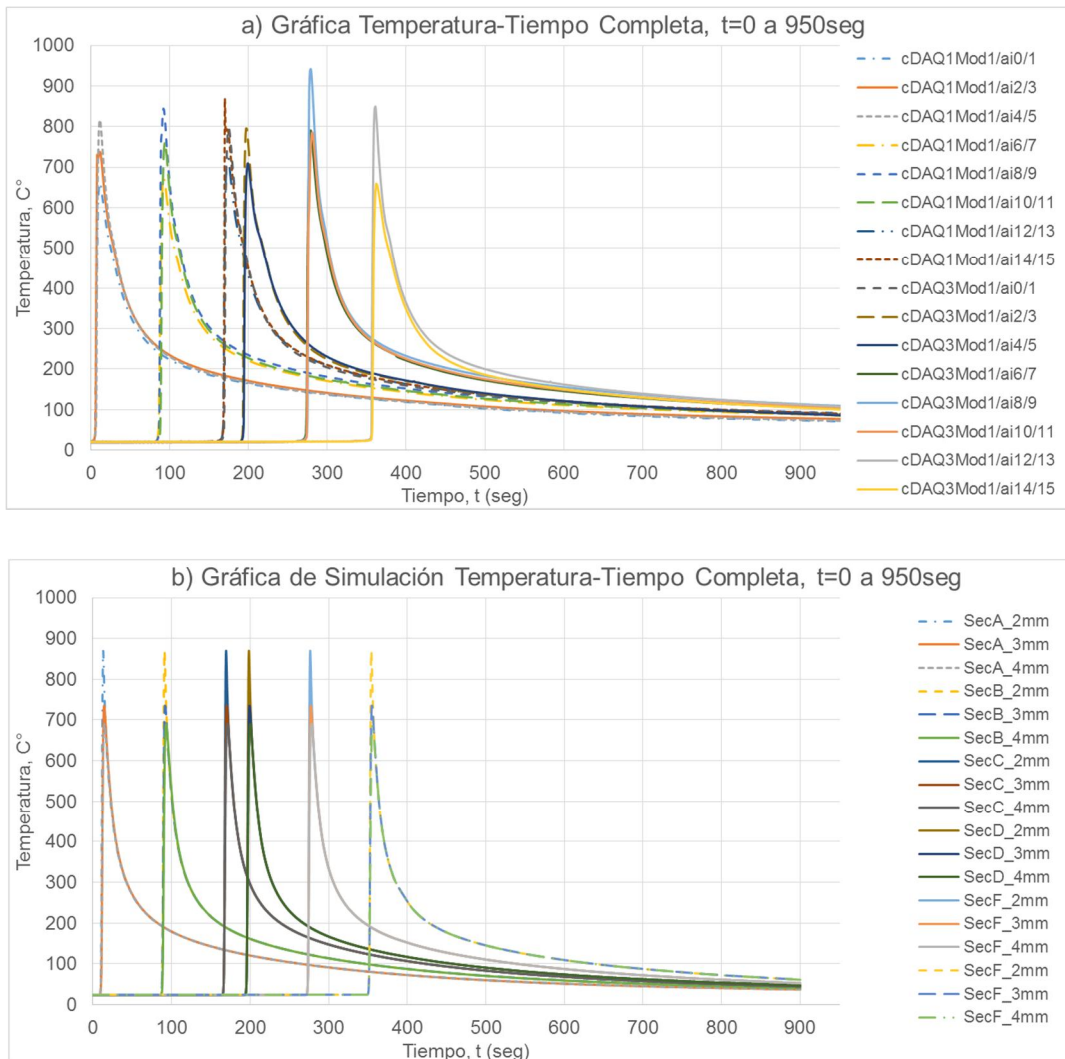


Figura 4.4.- Gráfica Temperatura-Tiempo, cordón 1 y 2, completa, t=0 a 900 seg; a) experimental con lectura de termopares, y b) simulación.

En la Figura 4.5 se tiene un acercamiento de t=0 a 500 segundos, permitiendo apreciar de forma más clara el momento del calentamiento súbito a pasar el charco soldadura por el termopar, así como la relación de temperaturas contra su posición longitudinal en la pieza de trabajo. Cabe hacer mención que la dirección de las soldaduras sugeridas en la imagen son solo de referencia y no deben tomarse como las ejecutadas en la simulación o experimentación, ya que representan el primer

escenario de la matriz de experimentación. Como ya se ha mencionado en la metodología, el desarrollo se ha hecho en base a la secuencia b.

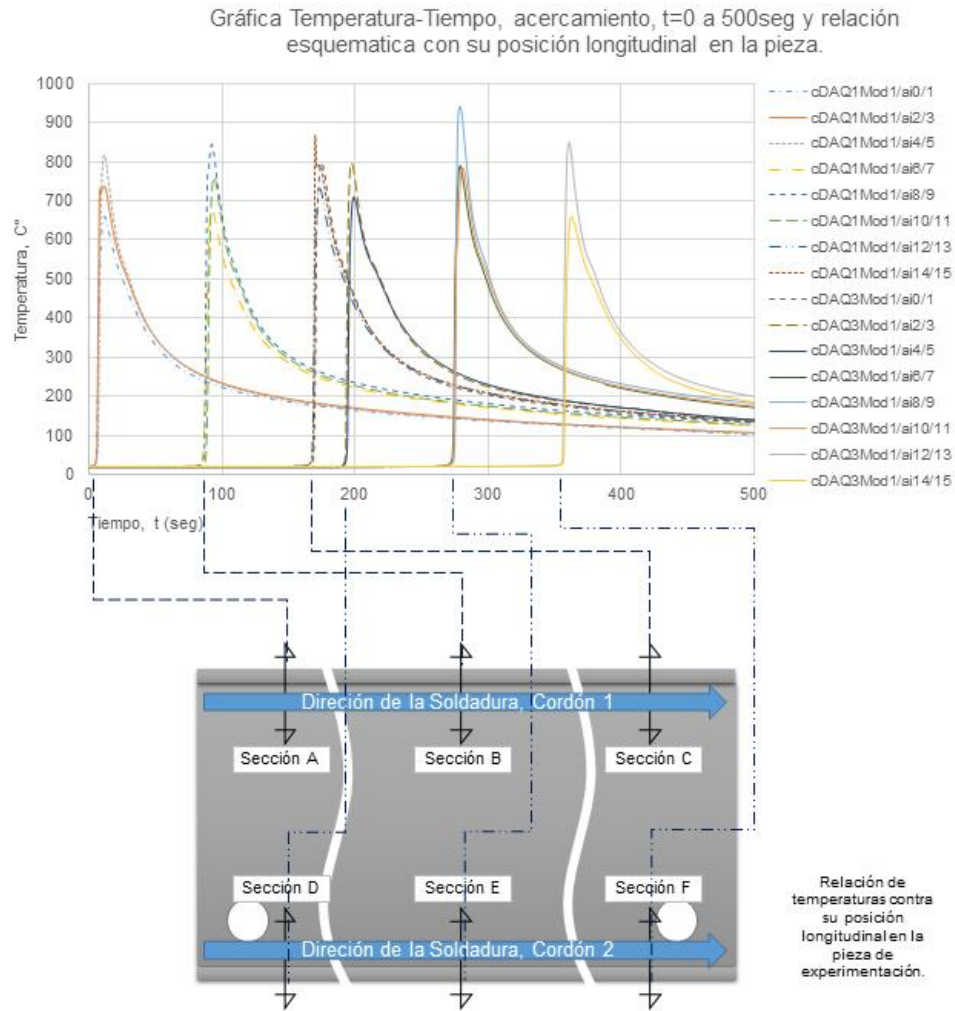


Figura 4.5.- Gráfica Temperatura-Tiempo, termopares cordón 1 y 2, acercamiento $t=0$ a 500 seg; y relación de temperaturas contra su posición longitudinal en la pieza de trabajo.

La superposición de las lecturas de los tres termopares de la sección A, junto con sus contrapartes calculadas por la simulación se observan en la Figura 4.6. En ella también se distingue el cálculo del error entre las curvas de temperaturas correspondientes. Aunque si bien, es apreciable que la simulación presenta temperaturas más altas que en las medidas, también es cierto que comparando contra el promedio de temperaturas con las otras secciones el margen de error es mucho menor. Aun así, se sigue presentando un enfriamiento un poco más rápido

en la simulación, lo cual se puede atribuir a la falta de coincidencia exacta de las propiedades de expansión térmica del material en el software de simulación contra las reales.

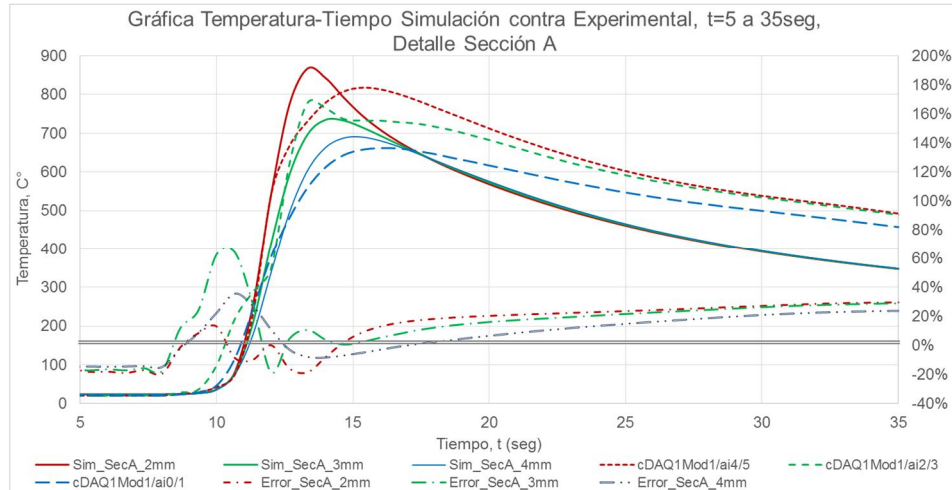


Figura 4.6.- Gráfica Temperatura-Tiempo mostrando la curva de enfriamiento calculada con la simulación contra el experimental, t=5 a 35seg, Detalle Sección A.

La Figura 4.7 presenta el detalle de las temperaturas máximas experimentales a lo largo de la línea transversal a la soldadura a una altura de 6 mm de la parte superior de la probeta a profundidades respecto a la cara vertical interna de la junta de soldadura de 4 mm, 3 mm y 2 mm. Nótese que la temperatura a 0 mm se presenta como referencia de la temperatura de fusión del acero según Kou (6). En la misma figura se distingue el mismo ejercicio superpuesto en la gráfica basado en las temperaturas calculadas por la simulación resultado de la calibración de la misma. También se representa el porcentaje de error entre la simulación y el promedio de las respectivas temperaturas experimentales, teniendo un error de entre 3% y -4.2%.

Se puede distinguir tanto en lo experimental como en la simulación que el gradiente de las temperaturas máximas registradas no es lineal, observado temperatura cada vez más bajas con forme se aleja de la fuente de calor, dando un dimensionamiento de la expansión térmica transversal a la dirección de la soldadura.

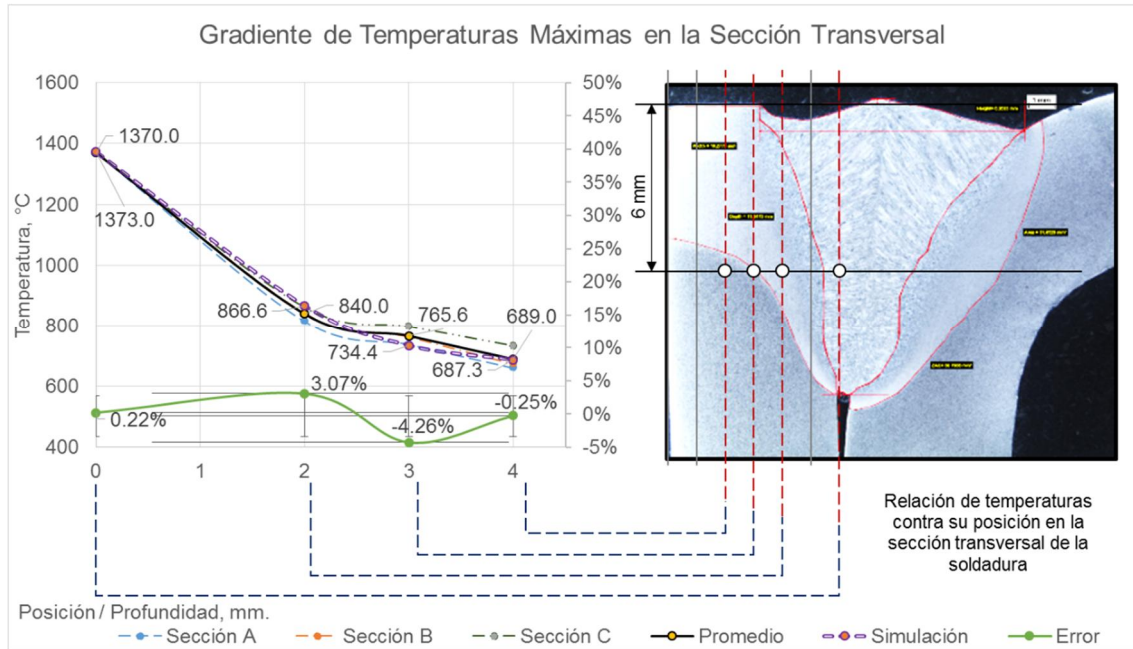


Figura 4.7.- Gráfica de la distribución de temperaturas máximas en la sección trasversal de la pieza física contra la profundidad de medición junto con los resultados de la simulación. Se incluye el error entre ambas. *Temperatura en posición 0 mm estimada basada en los datos de Kou (6).

Finalmente, en la Figura 4.8 se aprecia el perfil térmico resultante de la simulación desde la vista superior. Si bien, durante la experimentación no fue posible realizar una medición de estas características, y presenta una gran similitud con el charco producido con el proceso GMAW con parámetros dentro del orden de los empleados en la experimentación (6).

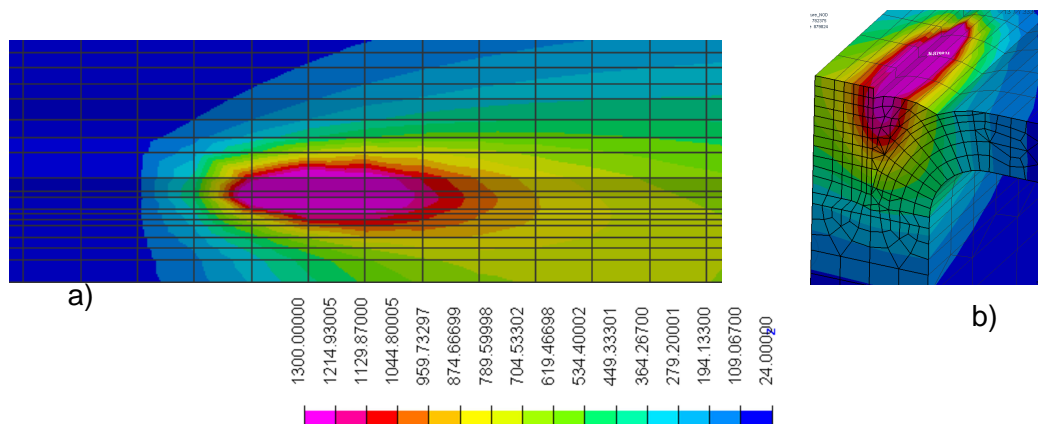


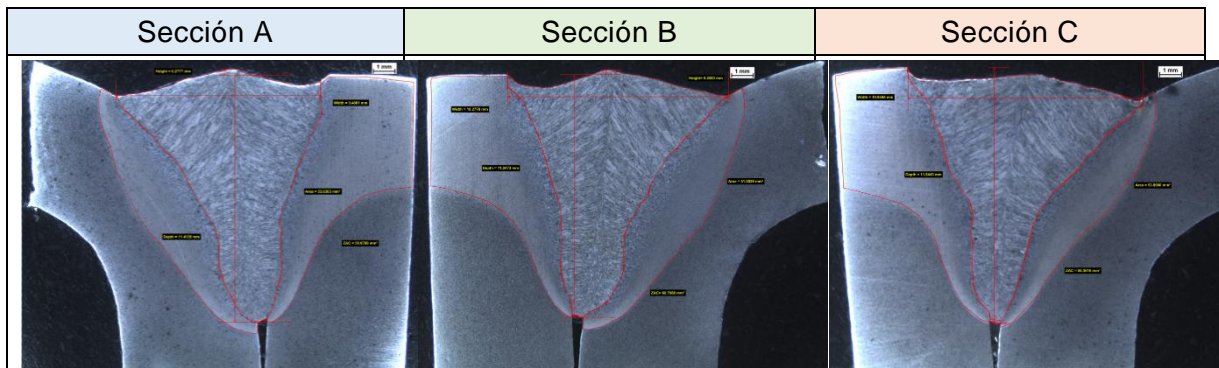
Figura 4.8.- Líneas de temperatura durante el proceso de soldadura simulado; a) vista superior y b) corte en perspectiva, y escala de colores en C°.

4.3. Macroataque

El macroataque químico y la caracterización microestructural se llevó a cabo en 3 secciones a lo largo del cordón 1 identificadas en la Figura 4.5. En la Tabla 4.2 se muestran los cortes seccionales de las soldadura en ataque realizado con el reactivo Nital, siendo 2% HNO_3 (ácido nítrico) y 98% etanol basado en la norma ASTM E407 - 07 Standard Practice for Microetching Metals and Alloys (41).

Se distingue en los cortes una zona afectada por el calor amplia incluso llegando a abarcar la totalidad en la parte superior de material base en el caso de la placa vertical.

Tabla 4.2.- Perfiles de soldadura de muestras, comparativa de secciones A, B y C.



En la Figura 4.9 se muestra el corte seccional generado en la simulación mostrando el perfil térmico resultante del proceso de soldadura al alcanzar temperaturas máximas a las profundidades estudiadas; a) 0 mm, 1373°C; b) 2 mm, 866.6°C; c) 3 mm, 734.4°C; y d) 4 mm, 687.3°C. Con esto es posible apreciar gráficamente la similitud entre la simulación con la distribución y dimensiones de los cortes de la Tabla 4.2.

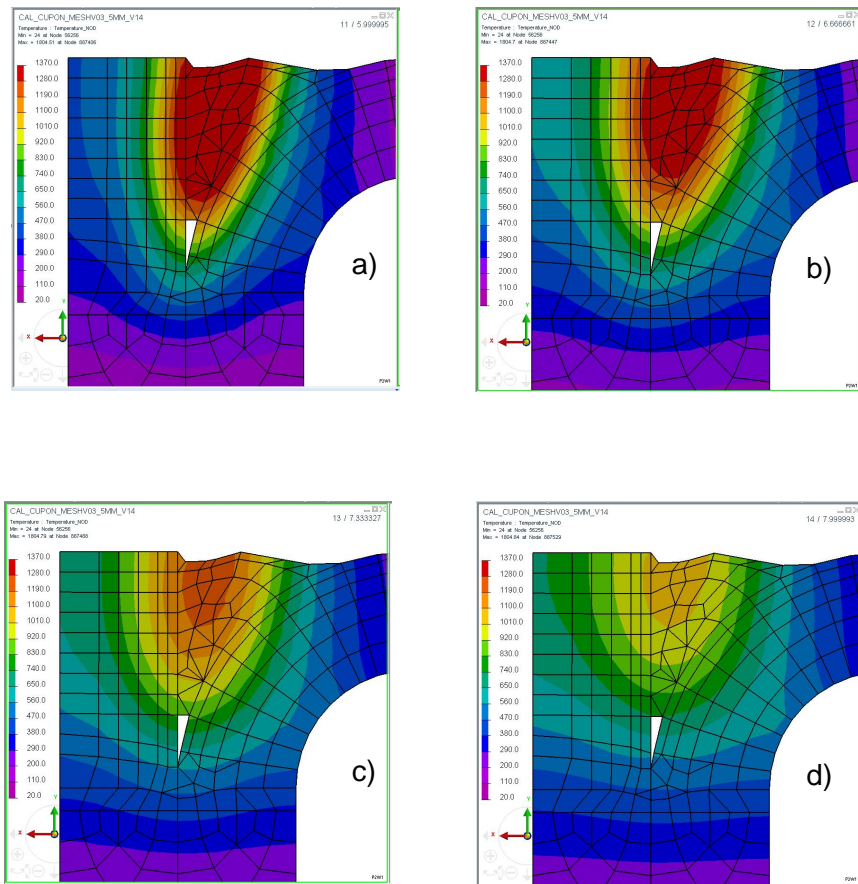
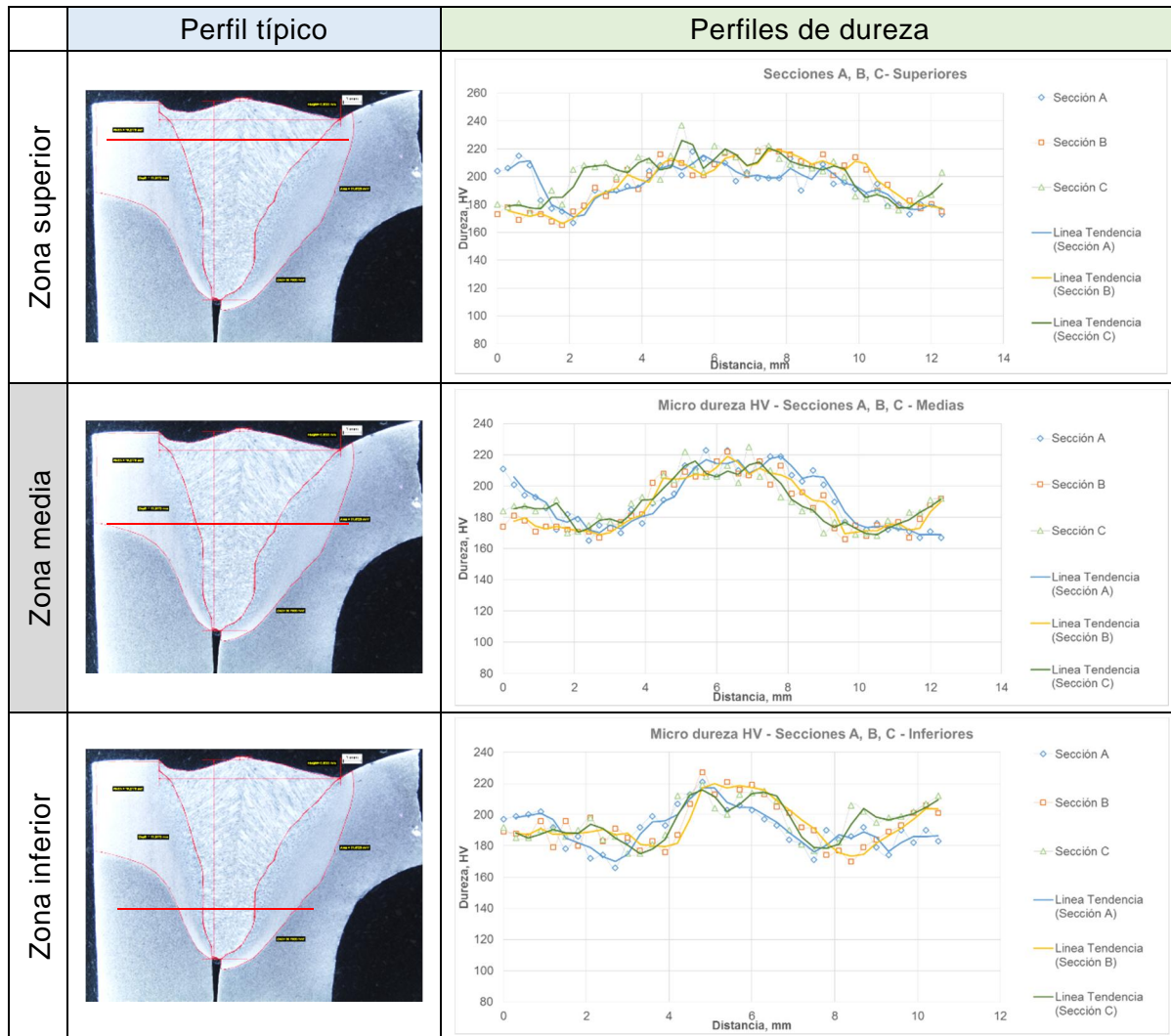


Figura 4.9.- Corte seccional generado en la simulación mostrando el perfil térmico resultante del proceso de soldadura al alcanzar temperaturas máximas a las profundidades estudiadas; a) 0 mm, 1373°C; b) 2 mm, 866.6°C; c) 3 mm, 734.4°C; y d) 4 mm, 687.3°C.

4.4. Microdureza

En la Tabla 4.3 se presentan los perfiles de microdureza Vickers HV de las 3 muestras, graficando los resultados de forma independiente para cada zona examinada, esto es, la comparativa de las secciones A, B y C, en 3 zonas, superior, media e inferior de la soldadura, captando la transición en entre material base, ZAC (zona afectada por el calor) e interfase en ambos lados de la línea vertical de centro de la soldadura. Es claro ver que en estas gráficas el patrón de las durezas describe el perfil físico de la soldadura según el corte de la sección.

Tabla 4.3.- Perfiles de dureza HV, comparativa de secciones A, B y C, en 3 zonas, superior, media e inferior.



También se observa un decremento en la dureza en la zona afectada por el calor de un orden de 20 HV, con el mismo comportamiento en las 3 zonas, sin embargo, cabe destacar que esta disminución en promedio de 190 HV a 170 HV no resulta significativa microestructuralmente.

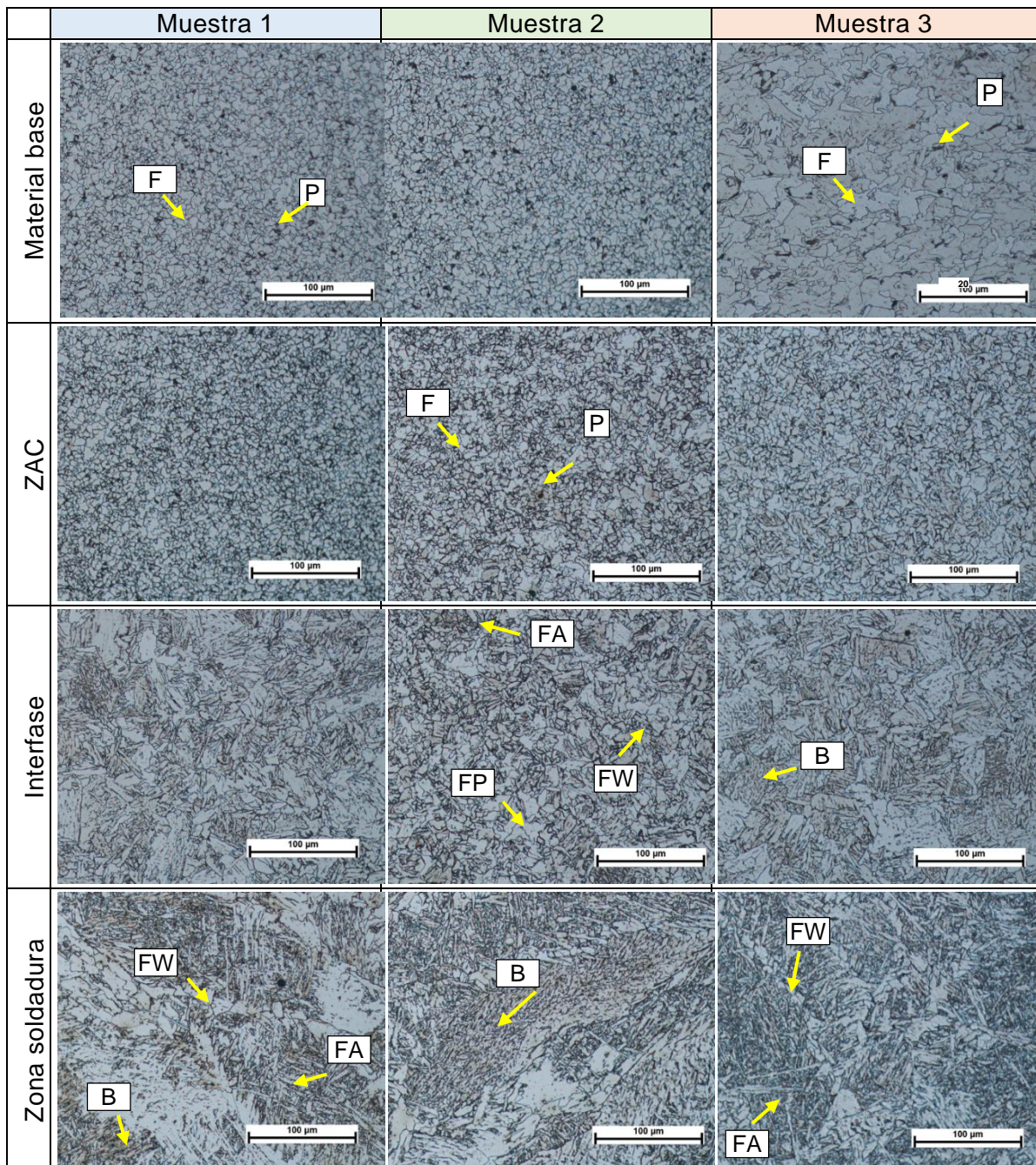
4.5. Microestructura

La Tabla 4.4 muestra una relación cruzada de las microestructuras correspondientes a las muestras 1, 2 y 3 en las zonas: soldadura, interfase, ZAC y material base. El material base presenta de una forma muy regular Ferritas (F) y Perlitas (P) en toda su extensión. Las zonas afectas por el calor denotan estructuras muy similares con un engrosamiento del grano, aunque no resulta significativo. Esto se puede apoyar con las gráficas de dureza de la Tabla 4.3 donde se nota poca afectación a la dureza de estas dos zonas como se discutió antes. En la zona de interfase, o zona de fusión entre la soldadura y el material base se aprecia un cambio importante en la microestructura, teniendo de forma prevaleciente Ferrita Acicular (FA), incluyendo la presencia de zonas de Ferrita Widmanstätten (FW) primaria, la cual creció al límite de grano. La Ferrita Poligonal (FP) también se logró identificar en esta zona. En algunas zonas también se observan pequeñas formaciones de Bainita (B). Estas estructuras denotan el incremento de la dureza del material base promedio de 190 HV a 220 HV. En la zona de la soldadura crecieron primordialmente Ferrita Acicular con formaciones destacables de ferrita Widmanstätten primaria. Con gran similitud a la Ferrita Acicular se hacen notar áreas extensas de Bainita (B). Esto da origen a la dureza en la zona de soldadura con un promedio de 220 HV, con picos de 230 HV. Entendiendo que la tasa de enfriamiento que se aprecia en la Figura 4.4 es suficiente para generar estructuras aciculares y bainitas pero limitada para crear un aumento significativo en su dureza como lo serían las martensitas.

En la Figura 4.10 se presenta un esquema comparativo de las fases microestructurales de la experimentación alineándolas con los resultados termometalúrgicos de la simulación, correlacionando la microdureza experimental. Los porcentajes de las fases están indicados como datos de referencia. En el caso de los porcentajes experimentales se realizó una cuantificación simple mediante el software Image Pro de las micrografías obtenidas en este trabajo, los cuales por ser puntos muy localizados no necesariamente resultan representativos para toda la región en cuestión. Resulta deseable la cuantificación mediante un método más

sofisticado que ofrezca un barrido completo de las áreas, aun que debido a las limitaciones del alcance de este trabajo no es cubierto en el mismo. Es válido destacar la similitud en los resultados entre el experimental y el calculado, sin embargo al no tener una cuantificación de fases extensa es difícil determinar un margen de error confiable.

Tabla 4.4.- Relación microestructuras Muestras 1, 2 y 3 en zona de material base, ZAC, Interfase y zonas de soldadura.



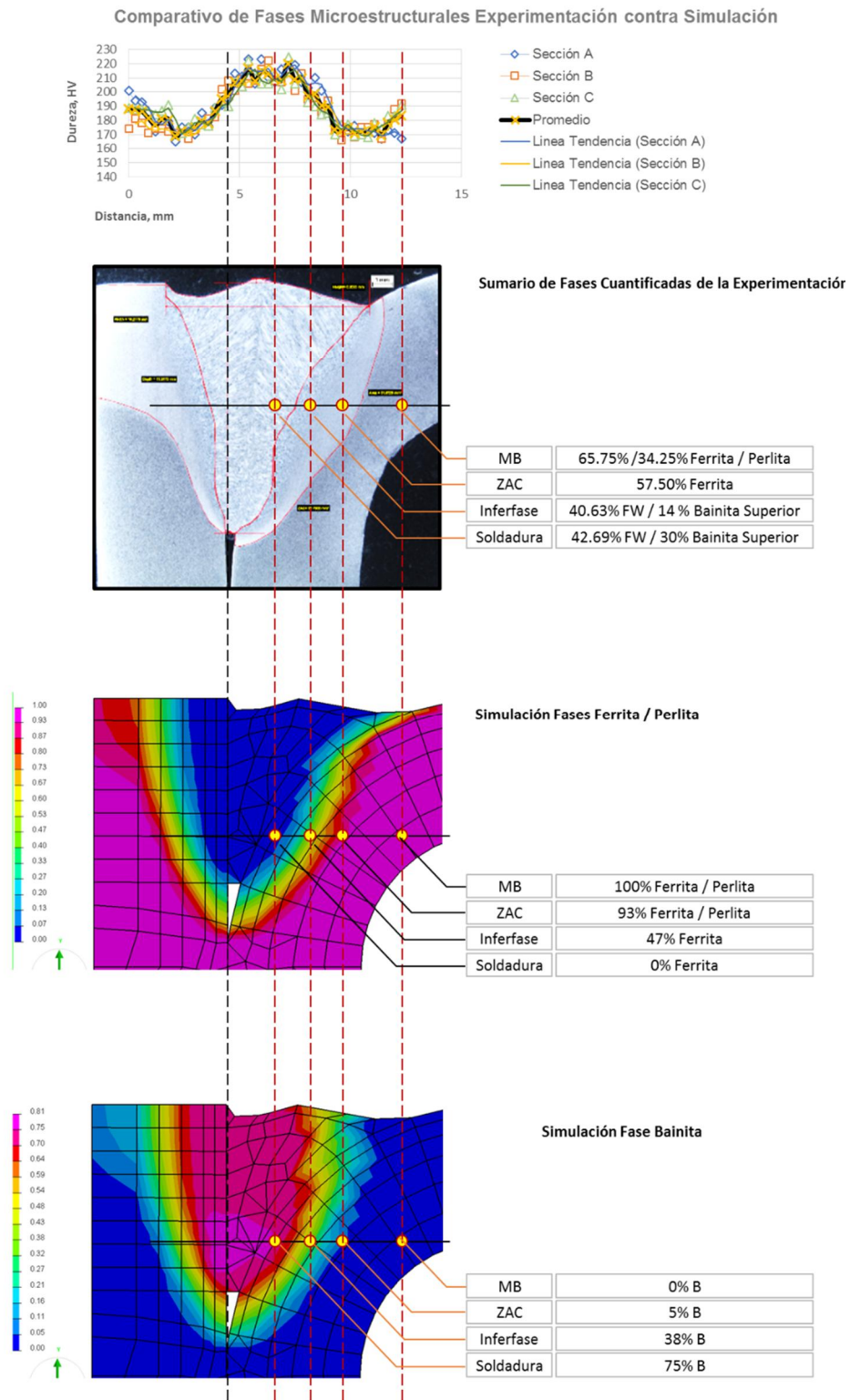


Figura 4.10.- Esquema comparativo de fases microestructurales de la experimentación, del proceso de simulación termo-metalúrgico y la microdureza experimental.

4.6. Dimensional

Una vez calibrada la simulación y verificada mediante los aspectos termo-metalúrgicos, se obtuvieron los siguientes resultados concernientes a la predicción de los defectos dimensionales provocados por el proceso de soldadura.

El análisis de desviación dimensional por patrón de colores se presenta en la Figura 4.11 y en la Figura 4.12, mostrando en los incisos a) los resultados de la distorsión calculada por el software, mientras que los incisos b) muestran la pieza de trabajo experimental medida mediante el escáner 3D capturando una nube de puntos y luego confrontada con la misma parte escaneada antes de que fuera soldada (esto permite eliminar los errores provocados por las variaciones propias de las partes simples que componen la pieza experimental). Aun que si bien las imágenes del análisis de patrones de colores entre la simulación y lo experimental presentan planos de referencia distintos, por lo que no se puede hacer una comparación visual directa, analizando los datos, es posible discernir que la mayor distorsión calculada se concentra en el centro de la pieza haciendo la cara externa de la parte B con una forma cóncava tal y como se presentó en la experimentación. También se observa que la mayor distorsión se tiene en el costado donde se aplicó el primer cordón, tanto en la simulación como en lo medido.

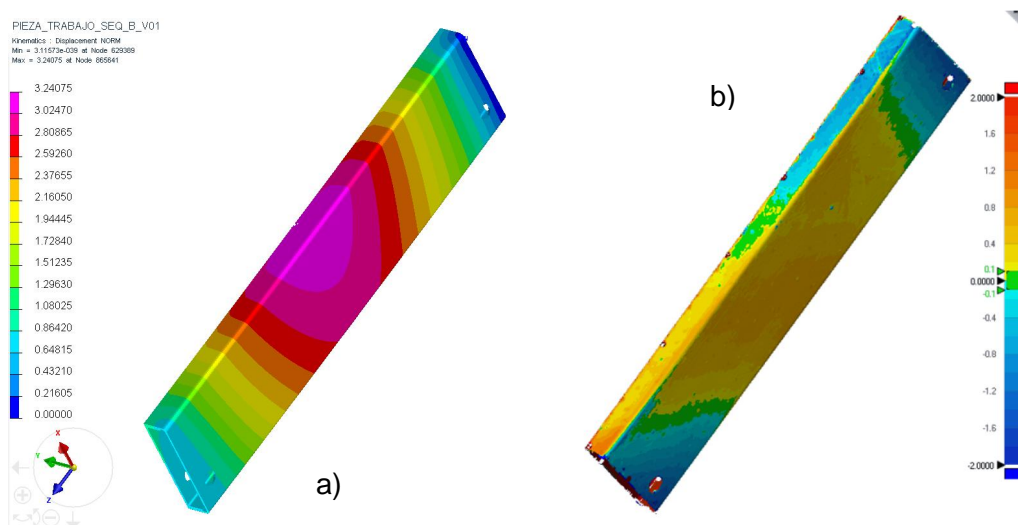


Figura 4.11.- Análisis de desviación dimensional por patrón de colores. Vista isométrica de cara inferior de parte A, a) calculada por la simulación, b) obtenida experimentalmente mediante la nube de puntos de la medición.

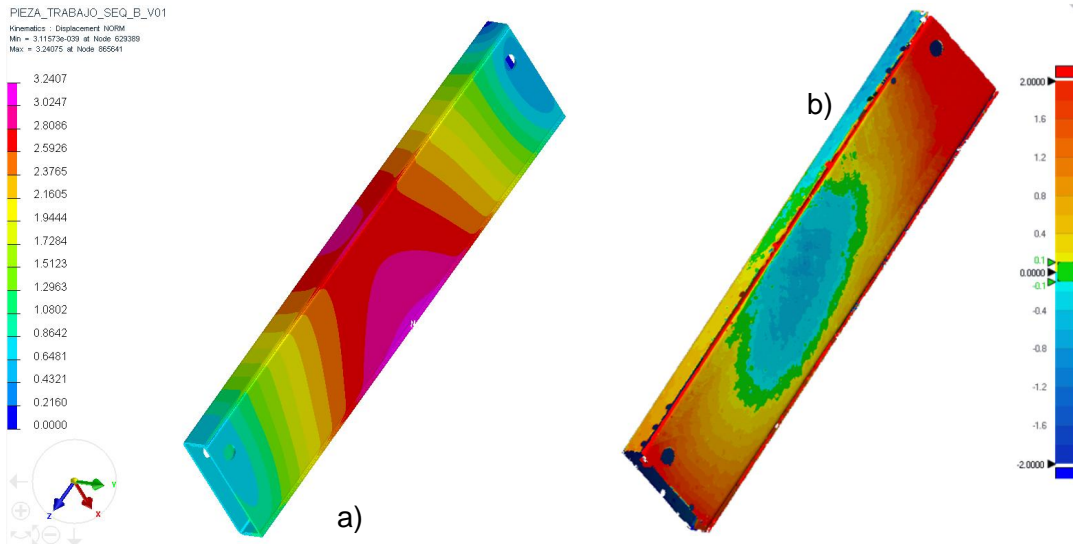


Figura 4.12.- Análisis de desviación dimensional por patrón de colores. Vista isométrica cara superior de parte B, a) calculada por la simulación, b) obtenida experimentalmente.

Si se observa el perfil que refleja la planicidad en la vista lateral de la pieza, como lo refleja la Figura 4.13, en base a los datos del análisis, se logró determinar un error de planicidad de 3.24 mm en la simulación confrontado contra el error experimental de 3.73 mm, dando una incertidumbre de 13.13%.

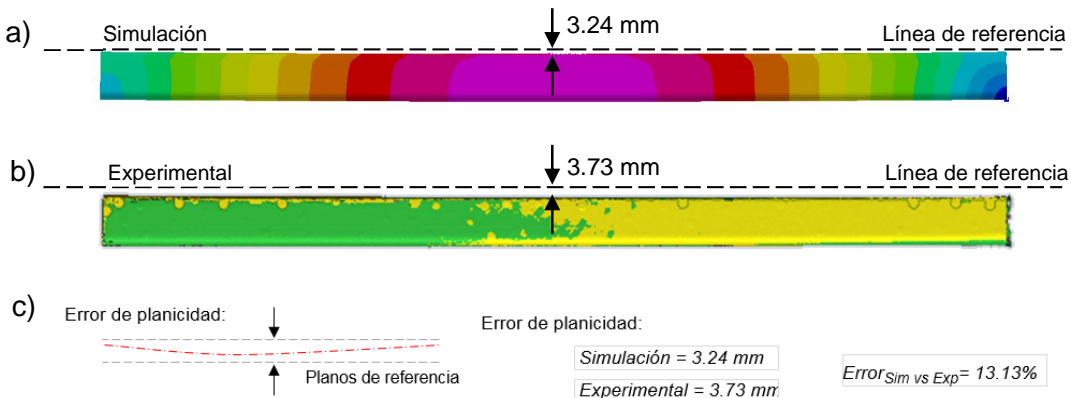


Figura 4.13.- Comparativo entre el perfil de la planicidad de la distorsión para la secuencia b; a) calculada por la simulación y b) experimental; c) Error de planicidad y margen de error de la simulación contra el experimental.

La siguiente característica dimensional a evaluar en la predicción es el paralelismo entre los ejes AB_1 y AB_2. Las distancias en la simulación que proporcionan este dato son mostradas en la Figura 4.14.

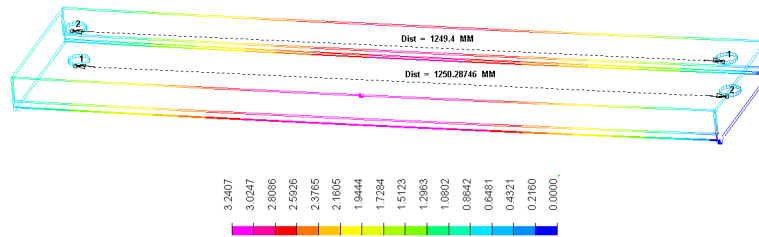


Figura 4.14.- Vista isométrica de la pieza con el error de paralelismo según la simulación.

La Figura 4.15 se describe el análisis comparativo entre a) el perfil lateral del diseño original de la parte con la medida nominal, b) el error de planicidad calculado por la simulación, y c) el error de planicidad provocado por la distorsión experimental. Siendo entonces el error de paralelismo calculado de 0.89 mm, contra el error de paralelismo experimental de 1.09, dando un margen de error de la simulación contra el experimental del 18.68%.

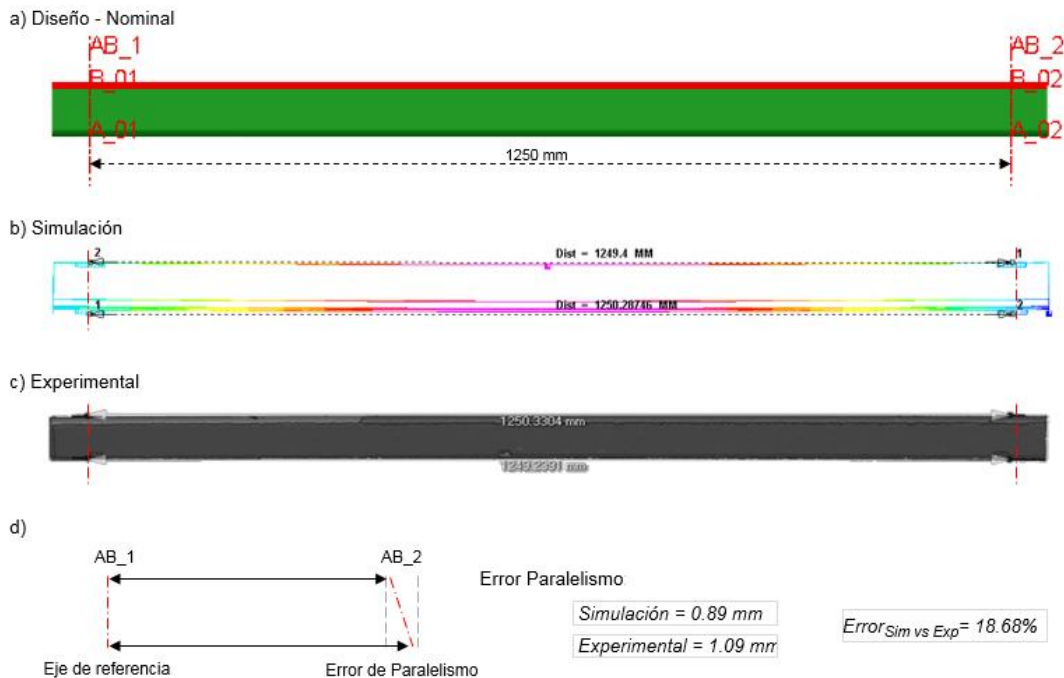


Figura 4.15.- Comparativo entre; a) el perfil nominal lateral de la pieza; b) el error de planicidad calculado por la simulación, y c) el error de planicidad provocado por la distorsión experimental; d) Error de paralelismo y margen de error de la simulación contra el experimental.

CONCLUSIONES

Recapitulando los objetivos específicos de esta tesis, se puede determinar que fueron completados, conociendo ahora los fundamentos del proceso de soldadura GMAW-P, la teoría de la fuente de calor, así como los principios de distorsión tanto físicos como su desarrollo y solución mediante software con métodos de elemento finito. También se realizó la simulación de soldadura de una pieza de trabajo, siendo los datos cotejados con datos experimentales.

Entonces, se puede concluir que la hipótesis definida en este documento es verdadera, ya que el comportamiento de la deformación que sufren las partes tras ser sometidas al proceso de soldadura por arco GMAW-P robotizado sí es posible ser predicho mediante las herramientas de software comercial de simulación basado en el análisis de elemento finito.

De forma más específica sobre los resultados arrojados por la simulación, se puede comentar que la falta de una cuantificación de fases confiable a nivel experimental de la microestructura, así como la falta de una coincidencia exacta de la base de datos de las propiedades de material en el software, no permite concluir claramente el margen de error respecto a la evolución microestructural. Aun así la distribución, forma, y porcentajes de las fases que se observan de la simulación guardan congruencia con los esperados según lo experimental.

Respecto a las dos características dimensionales analizadas, se tuvo un margen de error de planicidad de 13.13%, junto con un margen de error de

paralelismo de 18.68%, comparando los valores de la predicción con los experimentales. Por otro lado, la mencionada falta de coincidencia en las propiedades del material en el software puede afectar el comportamiento térmico y mecánico del resultado dando un aumento en el porcentaje de error de los resultados dimensionales de la distorsión. Si bien, algunos autores referenciados en el documento sugieren que el margen de error debía de ser menor al 10% o 15%, dadas las condiciones descritas anteriormente, se puede concluir que los resultados son útiles para efectos de demostrar la metodología de la simulación, aunque resultan inaceptables para su uso práctico.

Por otro lado, el tiempo de cómputo, como se indica en la sección de resultados, es un tema de consideración por su magnitud. Durante el desarrollo de la simulación se observó que el tiempo de enlace que el software requiere para ejecutar los cálculos correspondientes es altamente sensible a la cantidad de nodos de la malla, por ello su distribución de densidad y técnicas aplicadas para la discretización son sumamente importantes a considerar. Ya que no solo impacta el tiempo de cálculo, sino también a la precisión de los resultados, y aun que si bien, su demostración está fuera de los límites de este estudio, es un factor determinante para el éxito de la simulación.

Es posible también concluir que pese a que se requiere la inversión extensa de tiempo para la preparación de la simulación, éste representa solo una porción respecto al tiempo empleado para llegar a resultados similares haciendo uso en la metodología de prueba y error. Además, la inversión demandada se incrementa mientras se requieren más iteraciones dado el costo del material y su proceso de manufactura (materia prima, corte láser de partes, doblado, preparación de herramientas, medición, por citar los más representativos). Esto último basado en la experiencia del autor en el rubro de manufactura en soldadura y fabricación de equipo pesado, agrícola y de manejo de material. No pasando esto con el proceso virtual, ya que la inversión de tiempo en modificar las condiciones de la simulación para iteraciones son apenas una fracción del tiempo de configuración

inicial. Inconvenientemente el tiempo de cómputo para los cálculos de la simulación se mantienen en cada ciclo.

En un sentido más pragmático, se ha hecho evidente la factibilidad del proceso de predicción de distorsión para su uso en la industria de fabricación de maquinaria pesada. Y aunque si bien el CWM sigue en desarrollo, al día de hoy ha alcanzado ya una madurez suficiente para ofrecer resultados aceptables con un sentido de practicidad que permite ser atractivo para su uso real en la industria, con un potencial de beneficios de reducción de costos y tiempo dirigidos al aseguramiento de las especificaciones de las partes.

RECOMENDACIONES

El autor de este documento recomienda, para futuro trabajos, en base al presente, desarrollar un estudio que correlacione los parámetros de calor de entrada, como voltaje y amperaje incluyendo la variación de la velocidad de viaje de la soldadura, con la simulación de la distorsión en mezcla con las secuencias de los cordones. Esto con la finalidad establecer una guía o sugerir un método para determinar el punto óptimo entre velocidad de aplicación en relación a la afectación dimensional de las piezas. Siendo ambas cuestiones, el tiempo y la calidad dimensional, indicadores clave para cualquier fábrica productiva. Buscando promover y motivar el uso de estas herramientas de análisis mediante CWM en la industria de fabricación de equipo pesado.

BIBLIOGRAFÍA

1. **AWS.** *Welding Handbook*. Miami : American Welding Society, 1997. págs. 110-111. Vol. 2.
2. **Foundation, The James F. Lincoln Arc Welding.** *The Procedure Handbook of Arc Welding*. Cleveland, OH : The James F. Lincoln Arc Welding Foundation, 2000.
3. **AWS.** *AWS A3.0M/A3.0:2010 Standard Welding Terms and Definitions*. Miami, FL : American Welding Society, 2009. 978-0-87171-763-4.
4. **AWS.** *AWS D14.3/D14.3M:2010 Specification for Welding Earthmoving, Construction, and Agricultural Equipment*. Miami, FL : American Welding Society, 2010.
5. **AWS.** *AWS Desing for Welding*. US : American Welding Society, 2008.
6. **Kou, Sindo.** *Welding Metallurgy Second Edition*. New Jersey : Wiley-Interscience, 2003. ISBN 0-471-43491-4.
7. **Hughes, D.** *Taking the strees out of engineering*. Grenoble, France : Science In School, 2005.
8. **Xu, Jun.** *Dynamic Thermal Tensioning for Welding Induced Distortion Control*. Washington : UMI, 2006.
9. **Rodriguez, A. L.** *Estudio de las Discontinuidades Generadas en Uniones Soldadas Placa-Tubo en Aceros al carbono*. Saltillo : COMIMSA, 2009.
10. **Zhili, F.** *Processes And Mechanisms Of Welding Residual Stress And Distortion*. Cambridge, Inglaterra. : Woodhead Publishing Limited, 2005.

11. **Goldak, J. A.** *Computational Welding Mechanics*. New York, US : Springer US, 2005. pág. 16.
12. **Lindgren, L.** *Computational Welding Mechanics*. Cambridge, England : Woodhead Publishing, 2007. pág. 99.
13. **Lundbäck, A.** *Finite Element Modeling and Simulation of Welding of Aerospace Components*. Lulea, Suecia : Lulea University of Technology, 2003.
14. **Goldak, J. A.** *Web Based Simulation of Welding and Welded Structures*. New York, US : Springer US, 2013.
15. **Tikhomirova, D, Rietmanb, B y Kosec, K. and Makkinkd M.** *Computing Welding Distortion: Comparison of Different Industrially Applicable Methods*. Berlin, Germany : INPRO GmbH, 2005.
16. **Asadi, Mahyar.** *Computational Weld Mechanics (CWM) Framework for Exploring Parametric Design Space to Manage Weld Optimization*. Ontario, Canada : Carleton University, 2011.
17. **Flint, F. T.** *Extension of the double-ellipsoidal heat source model to narrow-groove and keyhole weld configurations*. Manchester, Reino Unido. : s.n., 2017.
18. **Colegrove, P.** *The welding process impact on residual stress and distortion*. Bedfordshire, U.K. : Science and Technology of Weld and Joining, 2009.
19. **Nguyen, N.** *Analytical Approximate Solution for Double Ellipsoidal Heat Source in Finite Thick Plate*. Australia : Welding Journal, 2004.
20. **Fachinotti, V.** *Semi-Analytical Solution Of The Thermal Field Induced By A Moving Double-Ellipsoidal Welding Heat Source In A Semi-Infinite Body*. San Luis, Argentina : Asociación Argentina de Mecánica Computacional, 2008.
21. **Lundbäck, A.** *Validation Of A Three Dimensional Finite Element Model In Electron Beam Welding Of Inconel 718*. Lulea, Sueacia : Lulea University od Technology, 2003.
22. **Bhatti, A y Barsoum, Z.** *Computational Weld Mechanics - Towards A Simplified And Cost Effective Approach For Large Welded Structures*. Estocolmo, Suecia. : KTH Royal Institute of Technology, 2016.
23. **Hyum, M.** *Numerical Simulation Of Arc Welding Process And Its Application*. Columbus, Ohio : The Ohio State University, 2006.

24. **Suresh, S.** *How Can Computational Weld Mechanics Help Industry?* Columbus, Ohio : Welding Journal, 2010.
25. **Goldak, J.** *Computational Weld Mechanics: Is Real-Time CWM Feasible? Recent Progress in CWM.* Graz-Seggau, Austria : International Seminar Numerical Analysis of Weldability, 1999.
26. **Creo Parametric.** PTC. [En línea] 2017.
<https://www.ptc.com/en/products/cad/creo/parametric>.
27. **NX for Design.** Siemens. [En línea] 2017.
<https://www.plm.automation.siemens.com/en/products/nx/for-design/>.
28. **SIMULIA Abaqus.** Dassault Systemes. [En línea] 2017.
<https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/>.
29. **ANSYS Mechanical.** ANSYS. [En línea] 2017.
<http://www.ansys.com/products/structures/ansys-mechanical-enterprise>.
30. **SYSWELD.** ESI. [En línea] 2017. <https://www.esi-group.com/software-solutions/virtual-manufacturing/welding-assembly/esi-sysweld>.
31. **Simufact Welding.** MSC. [En línea] 2017.
<https://www.simufact.com/simufactwelding-welding-simulation.html>.
32. **Vr Weld.** Goldak Technologies Inc. [En línea] <http://www.goldaktec.com/>.
33. **Muneel, H.** *Modeling Of Residual Stresses And Distortion Due To Welding In Fillet Welds.* Lappeenranta, Finlandia : Lappeenranta University of Technology, 2013.
34. **ASM.** *ASM Handbook Vol. 1. Properties and Selection: Irons, Steel and High-Performance Alloys.* Ohio : American Society for Metal ASM handbook comitée, 1990. págs. 211, 233, 397, 657, 682. Vol. 1.
35. **ASTM.** *ANSI / ASTM A 572 Standard Specification for High Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Steels of Structural Quality.* US : ASTM, 1979.
36. **AWS.** *AWS A5.18/A5.18M:2005, Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding.* Miami, FL : American Welding Society, 2005.
37. **ESAB.** MIG/MAG WIRES (GMAW) MILD STEEL WIRES OK AristoRod 12.50 Specifications. <http://www.esabna.com>. [En línea] 21 de 03 de 2017.
<http://mam.esab.com/assets/1/BDBA5CC688D14EBE822C00D265DF8E7D/doc/6>

B55CBB6E11740D586EDFE2AEC3CA6D7/410843-en_US-FactSheet_Main-01.pdf.

38. **Kambalur, N.** *Prediction Of Longitudinal Distortion In A Tsection Using SYSWELD Simulation Software.* Karnataka, India : PES Institute of Technology, 2009.
39. **Deng, D. y Murakawa, H.** *Prediction Of Welding Distortion And Residual Stress In A Thin Plate Butt-Welded Joint.* Tokio, Japón : Elsevier, 2008.
40. **Lindström, R.** *DNV Platform of Computational Welding Mechanics.* Essen, Germany : International Institute of Welding, 2013.
41. **ASTM International.** *ASTM E407 - 07 Standard Practice for Microetching Metals and Alloys.* West Conshohocken, PA : ASTM International, 2015.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.- Comparativo de software comercial (26) (27) (28) (29) (30) (31) (32).	43
Tabla 3.1.- Matriz maestra de escenarios del diseño de experimentos.....	52
Tabla 3.2.- Requerimientos químicos del acero A572 grado 50 según ASTM (% e. p.) y composición química típica del material de aporte ER70S-6 (% e. p.). (35) (37).....	55
Tabla 3.3.- Requerimientos mecánicos del acero A572 grado 50. (35).....	55
Tabla 3.4.- Propiedades mecánicas del material de aporte ER70S-6. (37).....	56
Tabla 3.5.- Valores de Variables del proceso GMAW.	62
Tabla 4.1.- Valores de Variables del proceso GMAW en la experimentación.	69
Tabla 4.2.- Perfiles de soldadura de muestras, comparativa de secciones A, B y C.	74
Tabla 4.3.- Perfiles de dureza HV, comparativa de secciones A, B y C, en 3 zonas, superior, media e inferior.....	76
Tabla 4.4.- Relación microestructuras Muestras 1, 2 y 3 en zona de material base, ZAC, Interfase y zonas de soldadura.....	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.- Esquema del proceso de soldadura GMAW (1).....	9
Figura 2.2.- Componentes de un sistema completo de soldadura GMAW. (2)	10
Figura 2.3.- Modo de transferencia globular.....	12
Figura 2.4.- Modo de transferencia por rociado.....	13
Figura 2.5.- Tipos básicos de uniones de soldadura. a) A tope; b) Esquina; c) Tipo "T"; d) Traslape, (3).....	14
Figura 2.6.- Tipos básicos de uniones de soldadura; e) Borde, (3).....	15
Figura 2.7.- Junta en "T" a 90° (4).....	15
Figura 2.8.- Junta en ángulo agudo y obtuso (4).....	16
Figura 2.9.- Juntas en borde con componentes curvos para una soldadura de bisel de ½ V ensanchado.	16
Figura 2.10.- a) Esfuerzo residual ocasionado por soldadura. b) Esfuerzo residual ocasionado por esmerilado. Imágenes redibujadas de (6).....	17
Figura 2.11.- Principio de tres barras. (6).....	18
Figura 2.12.- Un cordón de soldadura se comporta bajo el mismo principio de las tres barras. El área soldada se comporta como la columna central. Las áreas al rededor funcionan con las columnas exteriores (6).	19
Figura 2.13.- Cambio de temperatura y de esfuerzos durante la soldadura. Imágenes redibujadas de (6).	20
Figura 2.14.- Grafica tridimensional de esfuerzos residuales en la unión de dos placas soldaduras contra la distancia (7).	21
Figura 2.15.- Distribución típica de esfuerzos residuales longitudinal (σ_{xx}) y transversal (σ_{yy}) en soldadura a tope; a) sección transversal; y b) sección longitudinal. Adaptación de (6).....	21
Figura 2.16.- Distorsión en estructuras soldadas (6).....	23
Figura 2.17.- Distorsión en soldadura a tope en aluminio 5083 con espesores de 6.4 a 38 mm (6).....	23

Figura 2.18.- Reducción de distorsión angular disminuyendo el volumen de metal soldado un solo paso con penetración profunda (6).	24
Figura 2.19.- Reducción de distorsión angular usando doble junta en V alternando las soldaduras (6).....	25
Figura 2.20.- Reducción de distorsión soldando sobre el eje neutral de la parte (6).	25
Figura 2.21.- Metodos de control para distorsión. a) fuera de posición o preposicionamiento, b) predeformando (6).	26
Figura 2.22.- Evolución de la funcionalidad de CWM del año 1970 al 2020. La curva superior indica su desarrollo en el ámbito de investigación, y la curva inferior marca su uso en la industria (14).	28
Figura 2.23.- Modelos para simulación de distorsión por soldadura (15).	29
Figura 2.24.- Representación del modelo Termomecánico-Metalúrgico.	29
Figura 2.25.- Representación del modelo Termomecánico.....	30
Figura 2.26.- Representación del modelo mecánico simplificado.....	31
Figura 2.27.- Vista general del proceso de validación y verificación del proceso de simulación (16).....	32
Figura 2.28.- a) Diversos campos de las ecuaciones involucradas en CWM con el modelo del proceso de soldadura; y b) los campos clásicos en el modelado del CWM de soldadura de fusión sin el modelo del proceso de soldadura y sin la mecánica de fluidos (12).	33
Figura 2.29.- Modelo de doble elipsoide de Goldak, definición del sistema coordinado y coeficientes usados (18).....	35
Figura 2.30.- a) Plano de referencia del corte a), y b) configuración típica de malla para una simulación de soldadura con el modelo de fuente de calor de doble elipsoide (11).....	37
Figura 2.31.- a) Diversas técnicas de generación de malla; a) obtenida por subdivisión recursiva para cargas en una equina, b) malla regular equidistante, c) estrategia gradual para cargas en una equina, d) y e) malla 3D representando a y b respectivamente (11).	37
Figura 2.32.- Dos modelos de Elementos finitos con diferente densidad de malla, pero con mismos parámetros de la fuente de calor para la comparación del tamaño de la zona de fusión (21).....	38
Figura 2.33.- Malla dinámica y adaptativa. Acercamiento a la malla cercana al arco de soldadura (12).....	39
Figura 2.34.- Caída de gotas de material de aporte en el charco de soldadura simulado por con un modelo de hidrodinámica de partículas suavizadas (SPH, por su nombre de origen Smoothed Particle Hydrodynamics).	40
Figura 2.35.- Software comercial considerado en el comparativo. Los logotipos y marcas comerciales perteneces a las mismas y son presentados en	

este documento únicamente con fines ilustrativos y para uso educativo (26) (27) (28) (29) (30) (31) (32).....	42
Figura 3.1.- Diagrama de flujo de la metodología a lo largo de la preparación y experimentación para la simulación de distorsión por soldadura.....	47
Figura 3.2.- Vista en perspectiva del modelo 3D de la pieza de trabajo.....	53
Figura 3.3.- Partes simples desensambladas A y B.	53
Figura 3.4.- Dibujo dimensional de la parte A. Vistas ortogonales. Cotas en mm.	54
Figura 3.5.- Dibujo dimensional de la parte B. Vistas ortogonales. Cotas en mm.	54
Figura 3.6.- Dibujo dimensional de la pieza de trabajo. Vistas ortográficas. Cotas en mm.	54
Figura 3.7.- Cara superior de parte B. Ejes AB_1 y Ejes AB_2 de la pieza de trabajo. Vista en isométrico.	56
Figura 3.8.- a) Pieza de trabajo acortada, Ejes AB_1 y AB_2 en vista superior; b) Línea representando Planicidad de cara superior de parte B, diámetros A_01 y B_01 junto con eje AB_01, diámetros A_02 y B_02 junto con eje AB_2. Vista lateral.	57
Figura 3.9.- Diámetros A_01, A_02, B_01 y B_02 en partes desensambladas. Vista isométrica.....	57
Figura 3.10.- Sección transversal de la pieza.....	58
Figura 3.11.- Sección transversal de la pieza. Acercamiento a la junta de soldadura.	58
Figura 3.12.- Secuencias de soldadura consideradas en el diseño de experimentos.	59
Figura 3.13.- Esquema descriptivo: a) posición y nomenclatura de vainas cerámicas y termopares; b) dirección y secuencia de soldaduras; c) ubicación secciones A, B, C, D, E y F. La dirección de los cordones solo se muestra como referencia, no refleja la experimentación.	60
Figura 3.14.- a) Tarjetas de adquisición de datos empleadas; b) Pieza de trabajo real con arneses de termopares instalados.	60
Figura 3.15.- Preparación para instalación de termopares en la pieza de trabajo, a) Vista en perspectiva de perforaciones; b) Corte longitudinal en el plano horizontal en isométrico; c) Corte longitudinal en el plano horizontal vista superior.....	61
Figura 3.16.- Dimensiones de barrenos para vainas, a) distancia desde la cara superior de la pieza; b) profundidad de perforaciones.	61
Figura 3.17.- Equipo usado para la experimentación, a) máquina de soldar, b) robot industrial de soldadura.....	62
Figura 3.18.- Imágenes de la malla de nodos generada.	64
Figura 4.1.- Fotografía de a) pieza de experimentación en contraste con b) pieza generada para la simulación.	67

- Figura 4.2.- Imágenes de la apariencia de la fuente de calor después del proceso de calibración, a) línea de trayectoria de la fuente de calor y línea de referencia; fuente de calor según la doble elipse de Goldak en b) corte seccional; c) vista superior. 69
- Figura 4.3.- Parámetros de la fuente de calor resultado de la calibración de la simulación. 69
- Figura 4.4.- Gráfica Temperatura-Tiempo, cordón 1 y 2, completa, t=0 a 900 seg; a) experimental con lectura de termopares, y b) simulación. . 70
- Figura 4.5.- Gráfica Temperatura-Tiempo, termopares cordón 1 y 2, acercamiento t=0 a 500 seg; y relación de temperaturas contra su posición longitudinal en la pieza de trabajo. 71
- Figura 4.6.- Gráfica Temperatura-Tiempo mostrando la curva de enfriamiento calculada con la simulación contra el experimental, t=5 a 35seg, Detalle Sección A. 72
- Figura 4.7.- Grafica de la distribución de temperaturas máximas en la sección transversal de la pieza física contra la profundidad de medición junto con los resultados de la simulación. Se incluye el error entre ambas. *Temperatura en posición 0 mm estimada basada en los datos de Kou (6). 73
- Figura 4.8.- Líneas de temperatura durante el proceso de soldadura simulado; a) vista superior y b) corte en perspectiva, y escala de colores en C°. ... 73
- Figura 4.9.- Corte seccional generado en la simulación mostrando el perfil térmico resultante del proceso de soldadura al alcanzar temperaturas máximas a las profundidades estudiadas; a) 0 mm, 1373°C; b) 2 mm, 866.6°C; c) 3 mm, 734.4°C; y d) 4 mm, 687.3°C. 75
- Figura 4.10.- Esquema comparativo de fases microestructurales de la experimentación, del proceso de simulación termo-metalúrgico y la microdureza experimental. 79
- Figura 4.11.- Análisis de desviación dimensional por patrón de colores. Vista isométrica de cara inferior de parte A, a) calculada por la simulación, b) obtenida experimentalmente mediante la nube de puntos de la medición. 80
- Figura 4.12.- Análisis de desviación dimensional por patrón de colores. Vista isométrica cara superior de parte B, a) calculada por la simulación, b) obtenida experimentalmente. 81
- Figura 4.13.- Comparativo entre el perfil de la planicidad de la distorsión para la secuencia b; a) calculada por la simulación y b) experimental; c) Error de planicidad y margen de error de la simulación contra el experimental. 81
- Figura 4.14.- Vista isométrica de la pieza con el error de paralelismo según la simulación. 82

Figura 4.15.- Comparativo entre; a) el perfil nominal lateral de la pieza; b) el error de planicidad calculado por la simulación, y c) el error de planicidad provocado por la distorsión experimental; d) Error de paralelismo y margen de error de la simulación contra el experimental. 82