

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**ESTUDIO DE LAS HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN PARA ANÁLISIS
TÉRMICOS EN SOLDADURAS DE ACEROS INOXIDABLES Y AHSS
EMPLEADOS EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ**

POR

MARTHA EVANGELINA PÉREZ MAURICIO

MONOGRAFÍA

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

SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO A 21 DE ABRIL DE 2015

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**ESTUDIO DE LAS HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN PARA ANÁLISIS
TÉRMICOS EN SOLDADURAS DE ACEROS INOXIDABLES Y AHSS
EMPLEADOS EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ**

POR

MARTHA EVANGELINA PÉREZ MAURICIO

MONOGRAFÍA

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

SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO A 21 DE ABRIL DE 2015

**Corporación Mexicana de Investigación en Materiales
Gerencia de Desarrollo Humano
División de Estudios de Posgrado**

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la Monografía **ESTUDIO DE LAS HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN PARA ANÁLISIS TÉRMICOS EN SOLDADURAS DE ACEROS INOXIDABLES Y AHSS EMPLEADOS EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ** realizada por el alumno (a) **MARTHA EVANGELINA PÉREZ MAURICIO**, con número de matrícula **14ES-176** sea aceptada para su defensa como Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial.

El Comité Tutorial

Dra. Gladys Yerania Pérez Medina

Tutor Académico

Dr. Eduardo Hurtado Delgado

Tutor en Planta

Dra. Argelia F. Miranda Pérez

Asesor

Vo.Bo.

Dr. Felipe Arturo Reyes Valdés

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 especialización del alumno **MARTHA EVANGELINA PÉREZ MAURICIO**, una vez leída y revisada la Monografía titulada **ESTUDIO DE LAS HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN PARA ANÁLISIS TÉRMICOS EN SODLADURAS DE ACEROS INOXIDABLES Y AHSS EMPLEADOS EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ**, aceptamos que la referida monografía revisada y corregida, sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial durante la defensa de la monografía correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los [días] del [mes] del [año].

[Nombre del Presidente]
Presidente

[Nombre del Secretario]
Secretario

Dra. Gladys Yerania Pérez
Medina
Vocal

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

ÍNDICE

SÍNTESIS	1
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN	3
1.1 Antecedentes	3
1.2 Objetivo general	4
1.2.1 Objetivos específicos	4
1.3 Justificación	4
1.4 Planteamiento del problema	5
1.5 Aportación	5
1.6 Alcance	6
CAPÍTULO II ESTADO DEL ARTE	7
2.1 Aceros inoxidables	7
2.1.1 Clasificación de los aceros inoxidables	8
2.1.2 Aplicación de los aceros inoxidables	9
2.1.3 Soldabilidad de los aceros inoxidables	10
2.2 Aceros avanzados de alta resistencia	12
2.2.1 Clasificación de los AHSS	13
2.2.2 Aplicaciones de los AHSS en la industria automotriz	14
2.2.3 Soldabilidad de los AHSS	16

2.3	Proceso de soldadura GMAW	16
2.3.1	Equipo del proceso GMAW	17
2.3.2	Variables del Proceso GMAW	18
2.3.3	Ventajas y limitaciones del proceso GMAW	19
2.4	Análisis de flujo de calor en la soldadura	19
2.4.1	Transferencia de calor	20
2.4.1.1	Transferencia de calor por convección	21
2.4.1.2	Transferencia de calor por radiación	21
2.4.2	Ecuaciones de Rosenthal	22
2.4.2.1	Ecuación de dos dimensiones de flujo de calor	22
2.4.2.2	Ecuación tridimensional de flujo de calor	23
2.4.3	Ciclos térmicos y distribución de temperatura	24
2.5	Simulación computacional del proceso GMAW	26
2.5.1	Modelación	26
2.5.2	Método numérico	28
2.5.3	Método de elementos finitos	29
2.5.4	Ventajas y desventajas de la simulación	31
2.5.5	Programas de cómputo para la simulación del proceso GMAW	32
2.5.5.1	SOLIDWORKS	32
2.5.5.2	ANSYS	34
2.5.5.3	SimuFact Welding	35
2.6	Aplicación de la simulación del proceso GMAW	37
2.6.1	Condiciones preliminares	39
2.6.2	Modelo experimental	40
2.6.3	Ciclo térmico del cordón de soldadura	41
2.6.4	Resultados de la simulación en GMAW	43
CAPÍTULO III ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LA BIBLIOGRAFÍA		50
CONCLUSIONES		54

BIBLIOGRAFÍA	55
ÍNDICE DE FIGURAS	59
ÍNDICE DE TABLAS	61
RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO	62

SÍNTESIS

El presente trabajo es una recopilación de información sobre las herramientas computacionales y metodologías de simulación (softwares) de simulación empleada para el proceso GMAW para uniones disímiles.

Actualmente los aceros inoxidable y los aceros avanzados de alta resistencia (AHSS por sus siglas en inglés) son usados en una amplia gama de productos automotrices debido a las cualidades que estos presentan, como son: resistencia a la corrosión, resistencia al choque, mayor ductilidad y excelentes propiedades mecánicas por mencionar algunas, es por eso que surgió la necesidad de observar el comportamiento de estos materiales al ser efectos que se podrían obtener al ser soldados por el proceso de soldadura por arco protegido con gas (GMAW por sus siglas en inglés) siendo una parte fundamental el estudio térmico en el cordón de soldadura mediante el apoyo de la simulación, ya que esto ayuda a calcular y predecir las propiedades del material soldado, los cambios microestructurales, entre otros.

Debido a que el GMAW es un proceso convencional se tuvo la necesidad de estudiar los efectos que este proceso ocasiona en el metal base por medio de

simulación, y además encontrar y experimentar con diversos parámetros adecuados para soldar satisfactoriamente diferentes uniones.

Dentro del campo de la simulación existe una diversa variedad de paquetes computacionales que ofrecen ciertas características, y ventajas de unos sobre otros de acuerdo el trabajo que se requiere desarrollar, facilitando al operador la experimentación y ahorro de costos en las empresas de manera muy significativa. Estos programas de simulación suelen trabajar por medio del método de elementos finitos con el cual realiza los cálculos necesarios, y resuelve el problema entregando un resultado con una aproximación al resultado real.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Actualmente los aceros inoxidable y aceros avanzados de alta resistencia (AHSS, por sus siglas en inglés) son empleados en una amplia gama de productos automotrices debido a las cualidades que éstos presentan tales como, su resistencia a la corrosión y/o a las altas temperaturas sin comprometer sus propiedades mecánicas.

Es por eso que en el presente trabajo, tiene el propósito de reunir información y estudiar las técnicas de simulación que hoy en día existentes para un análisis más detallado de las soldadura de las uniones disímiles de aceros inoxidable y aceros avanzados de alta resistencia empleando el proceso de soldadura por arco protegido por gas (GMAW, por sus siglas en inglés).

En los últimos años se han realizado complejas y múltiples investigaciones enfocadas a la simulación durante el proceso de soldadura, que hoy en día la industria automotriz está interesada en estos programas debido a que contribuye a obtener un mejor diseño, planeación de producción y optimización en el proceso de soldadura.

La soldadura involucra diversos procesos físicos, por este motivo, se han desarrollado paquetes computacionales que por medio de análisis de elementos finitos es posible simular un proceso tan complejo como lo es el de soldadura, en dónde con los diferentes programas se puede experimentar y analizar adecuadamente, para así predecir y evitar errores en la unión soldada.

1.2 Objetivo general

Recopilar y analizar información específica relacionada con la aplicación de herramientas de simulación de la soldadura GMAW en las uniones disímiles entre aceros inoxidable y aceros avanzados de alta resistencia (AHSS), con el fin de determinar el efecto de dicho proceso en las propiedades mecánicas de los materiales y así como también en los cambios microestructurales.

1.2.1 Objetivos específicos

- Determinar los tipos de softwares apropiados para un estudio térmico en soldaduras por arco para uniones disímiles.
- Analizar los resultados de un estudio térmico por computadora con diferentes parámetros proporcionado por las diferentes fuentes bibliográficas.
- Seleccionar la herramienta de simulación adecuada para llevar a cabo el análisis térmico y mecánico de las uniones disímiles entre aceros AHSS e inoxidable.

1.3 Justificación

Actualmente el sector automotriz esta en busca de la optimización de sus procesos y materiales, con el objetivo de incrementar su competitividad en el mercado, minimizando costos de operación y maximizando el rendimiento del equipo, la calidad de los materiales y la producción.

La industria automotriz además de que requiere de materiales de alta resistencia en caso de impacto, lo que hace de los aceros inoxidable y los AHSS, materiales con ventajas de seguridad para los pasajeros en aplicaciones estructurales automotrices, es por eso que se requiere el uso de programas computacionales de simulación que le permitan diseñar y modelar todo un proceso de soldadura para ahorrar costos y tiempo, además de determinar qué parámetros son los adecuados para su proceso y los efectos que éstos pudiesen tener en la realidad.

1.4 Planteamiento del problema

El sector automotriz utiliza en las líneas de ensamble de sus productos, procesos de soldadura o alguna tecnología de unión, aunado a lo anterior y las exigencias de reducción de costos y tiempos de entrega para no perder competitividad en el mercado de la industria automotriz, se abre un área de oportunidad para optimizar procesos ya probados, así como lograr la introducción AHSS y aceros inoxidable soldados mediante el proceso GMAW. Para obtener una aceptación satisfactoria es importante establecer la información adecuada que permita determinar de manera precisa los parámetros de unión de dichos aceros anteriormente estudiados en softwares. Por lo tanto, se plantea llevar a cabo una investigación científica que dé como resultado un entendimiento preciso en el área de simulación numérica mediante MEF del proceso de soldadura en uniones disímiles y así determinar el efecto de la soldabilidad, propiedades y efectos que pudiese tener una unión.

1.5 Aportación

En el presente trabajo se busca realizar una recopilación e investigación de las herramientas y softwares de simulación para soldadura, y en el cual se tenga un entendimiento preciso y detallado en el área de simulación numérica mediante el MEF de las uniones disímiles y así fortalecer la línea de investigación en soldadura aplicada a estos materiales, determinando el efecto de la soldabilidad de estas uniones.

1.6 Alcance

Con la realización del presente estudio, se pretende abarcar y recabar información referente a las uniones disimiles por el proceso GMAW, así como de las herramientas existentes adecuadas para simular el efecto térmico en el cordón de soldadura de las uniones en un proceso y así determinar los parámetros de operación que contribuyan a una óptima unión disímil aplicados a la industria automotriz.

CAPÍTULO II

ESTADO DEL ARTE

2.1 Aceros inoxidables

Los aceros inoxidables son básicamente aleaciones de hierro (Fe), carbono (C) y con un contenido de al menos 11% de cromo (Cr), con adiciones de otros elementos, en proporciones distintas, como lo es el manganeso (Mn), níquel (Ni), molibdeno (Mo) y silicio (Si), y la presencia de impurezas como azufre (S), oxígeno (O) y fósforo (P) [1].

El cromo es el elemento principal, que imparte la resistencia a la corrosión, que en cierta parte es una característica fundamental de estas aleaciones, y por tal efecto, forma una película superficial de óxido rico en cromo adherente e invisible.

La selección de los aceros inoxidables puede basarse en su elevada resistencia a la corrosión, las características de fabricación, disponibilidad, propiedades mecánicas en rangos específicos de temperatura y de costos del producto. Sin embargo, la resistencia a la corrosión y propiedades mecánicas son usualmente los factores más importantes en la selección de un grado para una aplicación

específica, estableciéndose como aleaciones indispensables en diversos ramos de la industria principalmente en la industria petrolera, petroquímica, nuclear, naval, automotriz, hogar, medicina y la industria alimenticia entre otras [1].

2.1.1 Clasificación de los aceros inoxidable

Los aceros inoxidable pueden clasificarse según su contenido de elementos aleantes (composición química) o microestructura. La microestructura depende de la composición química del acero (particularmente el cromo y el níquel) y del tratamiento térmico al cual es sometido el acero. Los aceros inoxidable se clasifican en 5 familias diferentes [2]:

- Austeníticos,
- Ferríticos,
- Martensíticos,
- Dúplex
- Endurecidos por precipitación.

Aceros inoxidable austeníticos

Los aceros inoxidable austeníticos son aleaciones de hierro, carbono, cromo y níquel. En donde el contenido de carbono está comprendido entre el 0.02% - 0.2% C, el cromo entre el 16 al 26%, el níquel hasta aproximadamente 35% y el manganeso hasta el 15% [1].

En la familia de los aceros inoxidable austeníticos, se pueden distinguir dos grupos generales:

- Serie 200 AISI.- Aleaciones cromo-níquel-manganeso
- Serie 300 AISI.- Aleaciones cromo-níquel

La serie 200 de los inoxidable contiene de 0.08 a 0.1% de nitrógeno, del 4 al 15.5%Mn y aproximadamente un 7%Ni. Mientras que, los de la serie 300 son los más importantes, dado que pertenecen la mayor parte de los aceros

inoxidables comúnmente utilizados. Se caracterizan por tener en su composición grandes cantidades de níquel y aproximadamente 2% de manganeso. Así como el Mo, Cu, Si, Al, Ti y Nb pueden ser adicionados para conferir ciertas características como resistencia de haluros por picaduras o resistencia a la oxidación. El azufre o selenio se pueden añadir a ciertos grados para mejorar la maquinabilidad [1].

Aceros inoxidables ferríticos

Los aceros inoxidables ferríticos contienen principalmente cromo. El contenido de cromo es usualmente de 10.5 a 30%. Los aceros inoxidables ferríticos son ferromagnéticos. Estos pueden tener una buena ductilidad y maleabilidad. Los aceros comprendidos en este grupo se endurecen en pequeño grado, y en la condición de recocido desarrolla su máxima plasticidad, resistencia a la corrosión y a la oxidación.

Los aceros inoxidables ferríticos generalmente se dividen en tres grupos en función del contenido de cromo: bajo (10.5 a 12.0%), medio (16 a 19%) y alto (mayor que 25%). Ejemplos de éstos son los aceros de la serie 400, por mencionar algunos: AISI 405, 430, 442 y 446 [1].

2.1.2 Aplicación de los aceros inoxidables

Las propiedades únicas del acero inoxidable lo convierten en la mejor elección para la fabricación de componentes de vital importancia en los automóviles, es por eso que hoy en día se les llaman vehículos ligeros.

Los aceros inoxidables se utilizan en aplicaciones tales como limpiaparabrisas, soportes, tubos, resortes, abrazaderas, sujetadores, sensores, juntas, ensambles, rines, tanques de combustible, sistema de escape y entre otros. La mayoría de las piezas se fabrican con aceros inoxidables austeníticos, que contienen níquel o con aceros inoxidables ferríticos [3].

La mayor aplicación del acero inoxidable en el sector automotriz, es principalmente en el tubo de escape del automóvil (Figura 0.1). Éste sistema requiere de un acero inoxidable resistente a altas temperaturas tal como puede ser el austenítico 309 ó 310, o en la parte fría del escape, requiere un tipo 304 o del tipo ferrítico 409 [3].

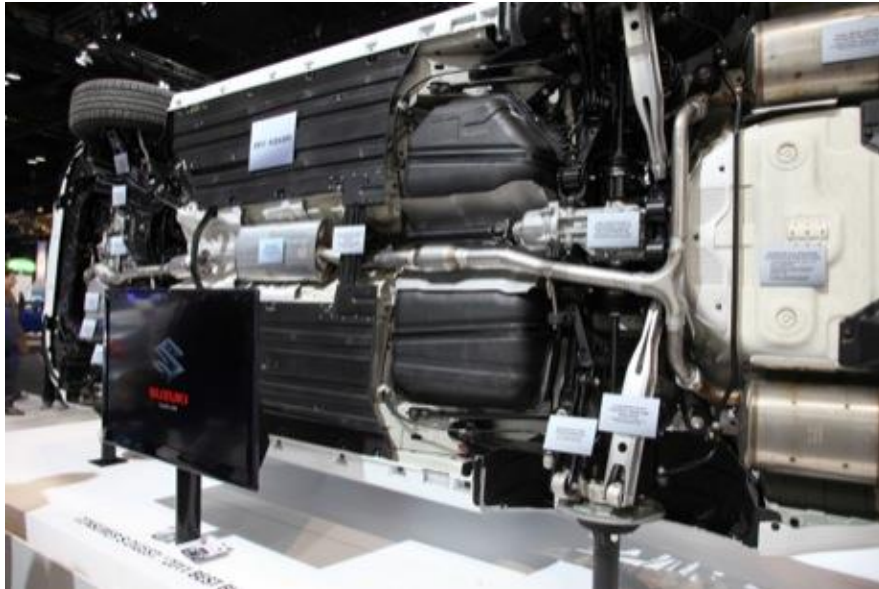


Figura 0.1 Aplicación del acero inoxidable austenítico en el sistema de escape de un automóvil [3].

2.1.3 Soldabilidad de los aceros inoxidables

Durante la soldadura de los aceros inoxidables es importante tomar en cuenta los cambios que se presentan en la estructura del metal, la temperatura del metal base adyacente a la soldadura. El grado de estos cambios afecta las propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión. Por lo que es de suma importancia elegir el tipo de acero inoxidable adecuado para soldar [3].

Es por esto que, dentro de la clasificación de los aceros inoxidables existen los que son más soldables por los procesos más comunes de soldadura como lo son los de cromo-níquel y los de cromo, en la Tabla 0.1 se muestran los aceros inoxidables más soldables [2].

Tabla 0.1 Soldabilidad de los aceros inoxidables [4].

SOLDABILIDAD					
Arco Gas					
Austeníticos	301	1	2	1	Acero inoxidable de uso general que se trabaja con facilidad, y es resistente a la corrosión.
	302	1	3	1	
	304 304LC	1	3	1	Acero inoxidable para servicio general y se trabaja con facilidad.
	308	1	3	1	Se usa cuando se requiere mejor resistencia a la corrosión.
	309	1	3	1	Buena resistencia a altas temperaturas
	316, 316LC	1	2	1	Excelente resistencia a la corrosión química
	317	1	2	1	Mayor contenido de aleación que la 316, para una mejor resistencia a la corrosión
	321	1	2	1	Estabilizado con titanio para impedir la precipitación del carburo
	347	1	2	1	Estabilizado al niobio para impedir la precipitación del carburo
Martensíticos	403	2	2	2	Se utiliza para álabes de turbina
	410	2	3	2	Uso general, bajo costo, tratable térmicamente
	414	2	3	2	Se agrega níquel para mejor resistencia
	416	4	3	4	De maquinado libre
	420	2	3	2	De más alto contenido de carbono para cuchillería e instrumentos de cirugía
	431	2	2	2	Propiedades mecánicas altas
	440A	5	3	4	Para instrumentos, cuchillería, válvulas
	440B	5	3	4	Con mayor contenido de carbono que el 440A
	501, 502	2	3	2	Adición de boro para alta dureza, Menor resistencia a la corrosión que los tipos al cromo-níquel
Ferríticos	405	2	3	2	No templable cuando se enfría al aire desde temperaturas elevadas
	406	2	3	2	Para resistencias eléctricas
	430	2	3	2	Aleación de fácil conformado, para molduras automotrices
	430F	2	3	2	Variedad de maquinado libre
	446	2	3	2	Alta resistencia a la corrosión

1-Fácilmente soldable. 2-Soldable bajo condiciones favorables. 3-Soldable por proceso a gas en calibres delgados. 4-No se dispone de información sobre su comportamiento en soldadura. 5-Soldable con pre y poscalentamiento.

Todos los aceros anteriormente descritos son fácilmente soldables por los procesos normales de soldadura, pero algunos de ellos difieren sus tratamientos térmicos de pre-soldadura y post-soldadura. Los aceros inoxidables austeníticos (serie 300) son más soldables que los ferríticos y martensíticos [4]

2.2 Aceros avanzados de alta resistencia

Los aceros avanzados de alta resistencia (AHSS), son aceros con límites elásticos de al menos 500 MPa y con esfuerzo último a la tensión mayor de 700 MPa. Son aceros multifásicos que pueden contener ferrita, martensita, bainita y/o austenita retenida en cantidades suficientes para producir propiedades mecánicas excepcionales. Algunos tipos de AHSS tienen una mayor capacidad de endurecimiento dando como resultado unas propiedades de resistencia y ductilidad mayor a los aceros convencionales. Estos aceros son especialmente utilizados en la fabricación de carrocerías para automóvil resistentes al choque, donde se requiere de rigidez, resistencia y absorción de energía en cada una de las partes que la conforman [5].

Los AHSS y los aceros de alta resistencia (HSS por sus siglas en inglés) cubren una amplia gama de propiedades y niveles de resistencia, por lo que se han desarrollado una serie de definiciones arbitrarias de estos materiales. El Instituto Americano del Hierro y Acero (AISI: American Iron and Steel Institute) designa a los AHSS y HSS como se muestra en la Tabla 0.2

Tabla 0.2 Clasificación de los aceros según la AISI [5].

Tipo de acero	Límite elástico	
	MPa	Ksi
Acero de alta resistencia (HSS)	255-550	37-80
Acero Avanzado de Alta Resistencia (AHSS)	>550	>80

2.2.1 Clasificación de los AHSS

La fabricación de los AHSS es algo más compleja que los aceros convencionales. El control en la fabricación debe ser mayor ya que se basa en los porcentajes de las diferentes fases presentes. Dentro de estos aceros de reciente desarrollo se pueden mencionar a en la Tabla 0.3 las familias de los AHSS.

Tabla 0.3 Clasificación de los AHSS [5].

Designación	Tipo
DP	Doble fase
TRIP	Transformación inducida por deformación
MS	Martensítico
CP	Multifásicos o fases complejas
TWIP	Maclado inducido por deformación

Aceros de plasticidad inducida por transformación (TRIP)

Los aceros de plasticidad inducida por transformación (TRIP), consisten en 3 fases: una matriz de ferrita/bainita y de un 5 a 20% en fracción de volumen de austenita retenida, que transforma progresivamente en martensita durante la deformación plástica. En la Figura 0.2 se muestra un esquema de la microestructura de los aceros TRIP. Los aceros TRIP contienen mayores cantidades de carbono que los aceros dúplex o doble fase, característica que facilita la estabilización de la fase austenita retenida a temperatura inferior a la ambiente [5].

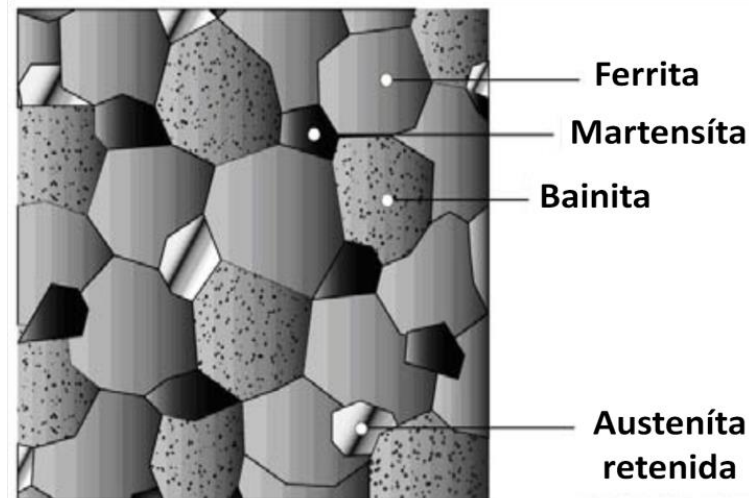


Figura 0.2 Esquema de una microestructura de un acero TRIP [5].

Aceros martensíticos

Para crear aceros martensíticos (MS), la austenita que existe durante el laminado en caliente o recocido se transforma casi en su totalidad en martensita durante el enfriamiento rápido. Los aceros MS se caracterizan por una matriz martensítica que contiene pequeñas cantidades de ferrita y/o bainita. Dentro del grupo de aceros multifase, los aceros MS muestran el nivel de resistencia a la tracción más alta de hasta 1700 MPa. Los aceros MS suelen ser objeto de un posterior revenido para mejorar la ductilidad, y pueden proporcionar la capacidad de conformado adecuada incluso a muy altas resistencias.

A los aceros MS se les agrega carbono para aumentar su resistencia mecánica y fortalecer la martensita. Así como también se le puede adicionar elementos como el manganeso, silicio, cromo, molibdeno, boro, vanadio, níquel y en diversas combinaciones para aumentar la templabilidad [5].

2.2.2 Aplicaciones de los AHSS en la industria automotriz

Hoy en día los aceros convencionales han sido reemplazados debido a que tenían limitado su uso cuando se trataba de fabricar partes con formas complejas que pudiesen reemplazar conjuntos soldados y que permitieran simplificar el proceso de fabricación y aliviar los automóviles. Y los AHSS

llegaron para superar estas limitaciones y crearon nuevas oportunidades para el diseño y la fabricación de componentes críticos, logrando que puedan soportar altas cargas.

El uso de los AHSS se concentra en el diseño de carrocería basado en la seguridad frente a accidentes para soportar la carga dinámica que tiene lugar en colisiones [6]

En la Figura 0.3 se muestran las partes en las que se utilizan los aceros avanzados en la carrocería del automóvil. A continuación se clasifican las diferentes aplicaciones de los aceros AHSS en los vehículos [7]:

- Compartimiento de pasajeros: Asientos
- Techo de automóvil
- Componentes estructurales: chasis, parachoques, barras de protección lateral.

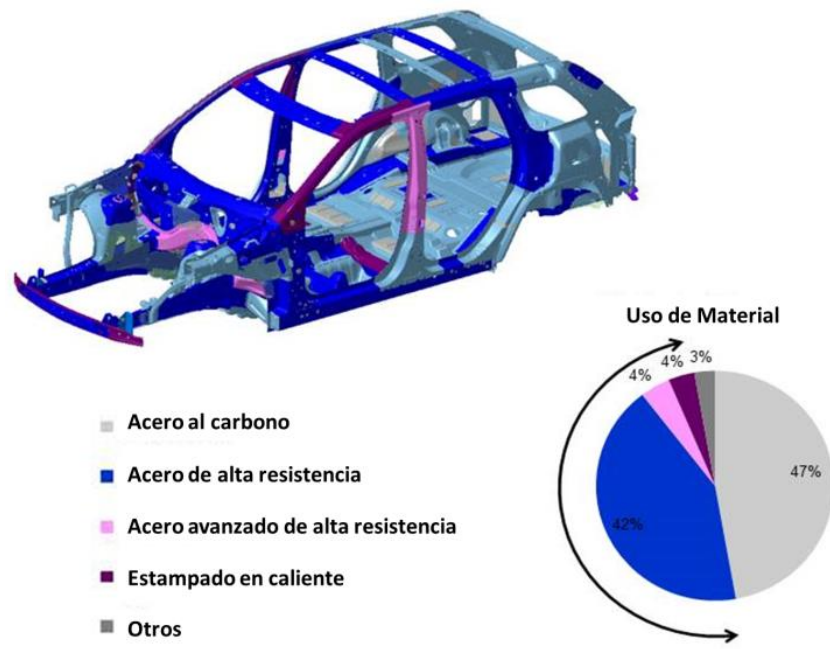


Figura 0.3 Representación de la aplicación de los AHSS en la carrocería de un automóvil [7].

2.2.3 Soldabilidad de los AHSS

En un estudio realizado por Pérez Medina (2010) en la soldadura de un acero TRIP800 soldado mediante GMAW comparándolo con el proceso de soldadura láser CO₂, se determinó que el proceso GMAW en los aceros AHSS cuando son sometidos a pruebas de tensión, todas sus fracturas ocurren en el metal base asegurando el proceso GMAW como un buen método de unión en estos aceros en comparación con las muestras soldadas utilizando láser la mayoría de las muestras fallan a causa de fragilidad en la región adyacente a la zona afectada por el calor (ZAC), esto debido a que se tiene una muy alta dureza en la zona de fusión (ZF), presentando martensita, y ferrita y bainita en la ZAC, aunque se encontró la misma mezcla de fases en la ZAC y ZF en las muestras unidas por GMAW, pero en este caso no hubo degradación mecánica de las muestras. Lo que determina que en la soldadura láser que se realizó en el acero TRIP800 conduce a una reducción de ductilidad del acero comparándola con el proceso GMAW [8].

2.3 Proceso de soldadura GMAW

La soldadura por arco metálico bajo gas protector cuya simbología es GMAW, fue aceptada por la Sociedad Americana de Soldadura (AWS por sus siglas en inglés) para este proceso. Sin embargo, en los sectores de la carrocería, cerrajería y estructuras ligeras se utiliza el proceso de soldadura de metal y gas inerte (MIG, por sus siglas en inglés). Es un proceso de soldadura que utiliza un hilo (alambre) para soldar que se alimenta automáticamente, a una velocidad constante, como un electrodo. Se genera un arco entre el metal base y el hilo, el calentamiento resultante funde éste proporcionando la unión de las placas base.

Durante el proceso, un gas protector protege la soldadura de la atmósfera y evita la oxidación del metal base. Y el tipo de gas protector utilizado depende del material base que se va a soldar. La Figura 0.4 muestra esquemáticamente el proceso GMAW [9].

Dentro de las principales ventajas del proceso, es que es el único proceso de electrodo consumible que puede servir para soldar todos los metales y aleaciones comerciales, que es un método fácil de usar ya que se puede soldar en todas las posiciones, las velocidades de soldadura son más altas gracias a la alimentación continua del electrodo y a las mayores tasas de deposición del metal de aporte.

Estas ventajas hacen el proceso ideal para aplicaciones de soldadura en alto volumen de producción y automatizadas. Esto se ha hecho cada vez más obvio con la llegada de la robótica, donde GMAW ha sido el proceso predominante [10].

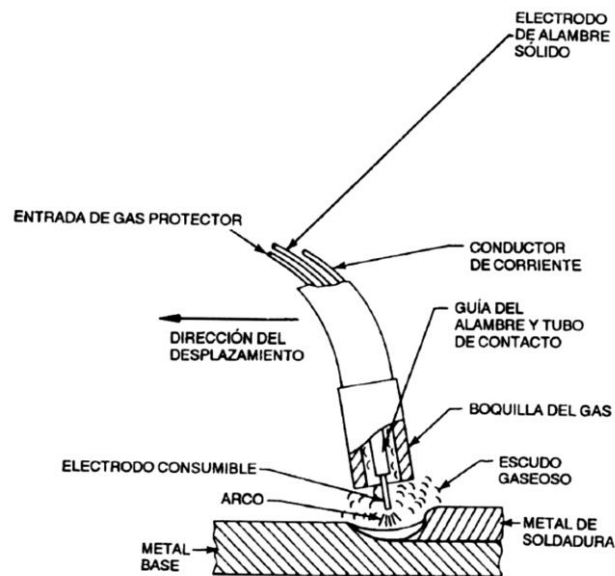


Figura 0.4 Esquema del proceso de soldadura GMAW [10].

2.3.1 Equipo del proceso GMAW

El proceso GMAW se puede usar en forma semiautomática o automática. El equipo básico para cualquier instalación de GMAW consiste en lo siguiente:

1. Pistola soldadora
2. Unidad de alimentación del electrodo

3. Control de soldadura
4. Fuente de potencia para soldadura
5. Suministro regulado de gas protector
6. Suministro de electrodo
7. Cables y mangueras para interconexión [10]

2.3.2 Variables del Proceso GMAW

En el proceso GMAW influyen algunas variables que es de suma importancia tomar en cuenta el efecto que estas puedan tener sobre la unión, ya que estas variables pueden afectar la calidad de la unión soldada. A continuación se menciona los parámetros a cuidar en una soldadura:

1. Corriente de soldadura (velocidad de alimentación del electrodo).
2. Polaridad.
3. Voltaje del arco.
4. Velocidad de recorrido en la soldadura.
5. Extensión y tipo de electrodo.
6. Orientación del electrodo.
7. Posición de la unión a soldar
8. Diámetro del electrodo
9. Composición y tasa de flujo del gas protector.

Las variables antes mencionadas no son del todo independiente, debido a que cuando una de estas se modifica es necesario modificar alguna otra para obtener los resultados deseados. Se requiere de habilidad y experiencia para seleccionar los parámetros óptimos en cada aplicación. Más sin embargo, estas variables son afectadas por; el tipo de metal base a soldar, la composición del electrodo, la posición en que se soldará y los requisitos de calidad de cada unión [10].

2.3.3 Ventajas y limitaciones del proceso GMAW

El proceso GMAW cuenta con grandes ventajas frente a otros procesos de soldeo, entre las que destacan:

- Es el proceso de soldadura más limpia en la industria.
- La velocidad de soldadura es controlable, ya que se realiza mediante una alimentación de alambre continuo.
- Soldadura con bordes más cerrados y acceso a puntos difíciles en diferentes posiciones.
- Capacidad para soldar la mayor parte de los metales industriales como aluminio, magnesio, aceros al carbono, aceros inoxidable, cobre, níquel, titanio y otros.
- Proceso robótico.

Más sin embargo es importante conocer que también este proceso tiene algunas limitaciones como son:

- Este proceso requiere de más inversión que otros procesos.
- No es recomendable tenerlo al aire libre.
- Consumibles que se requieren son costosos [9].

2.4 Análisis de flujo de calor en la soldadura

Durante una soldadura se generan picos altos y gradientes localizados de temperatura, por lo que esto hace necesario conocer los ciclos térmicos asociados a cada punto o región para determinar sus efectos sobre la microestructura. En la zona afectada por el calor (ZAC) la transferencia de calor se da principalmente por conducción y se tiene las siguientes consideraciones para el desarrollo de modelos:

- Fuente de calor móvil a velocidad constante sobre una línea recta aportando energía uniformemente.
- Al despreocupar el inicio y el fin del cordón, considerando un estado cuasi-estacionario al desplazar el origen de coordenadas con la fuente.

Para realizar un análisis del flujo de calor que se genera durante la soldadura, Rosenthal, empleó las consideraciones anteriores para describir mediante una ecuación matemática el análisis de flujo de calor durante la soldadura el cual influye una serie de parámetros que son establecidos durante el proceso [11].

2.4.1 Transferencia de calor

La transferencia de calor en la soldadura es gobernada principalmente por el transporte de calor dependiente del tiempo, por conducción y convección, que es expresada por la Ecuación 2.1 [11].

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} [CT] + \rho v_x \frac{\partial}{\partial x} [CT] + \rho v_y \frac{\partial}{\partial y} [CT] + \rho v_z \frac{\partial}{\partial z} [CT] = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{k \partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{k \partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{k \partial T}{\partial z} \right] + S$$

Ecuación 2.1 Ecuación para transferencia de calor en la soldadura [11].

Donde:

K: Conductividad térmica [0.028 J/mm s°C]

T: Temperatura en la soldadura [°C]

ρ : Densidad del metal [g/mm³]

C: Calor específico del material [J/g°C]

t: Tiempo [seg]

V_x : Componente de la velocidad en la dirección de x [mm/seg]

X: Coordenada en la dirección de la soldadura [mm]

V_y : Componente de la velocidad en la dirección de y [mm/seg]

Y: Coordenada en la dirección transversal de la soldadura [mm]

V_z : Componente de la velocidad en la dirección de z [mm/seg]

Z: coordenada en la dirección normal a la superficie de la soldadura [mm]

S: velocidad de generación de calor interno volumétrico [J/mm³ seg]

El primer término del lado izquierdo de la ecuación 2.1 es transitorio y tiene en cuenta el cambio en el contenido de calor en la pieza. Los términos restantes del lado izquierdo representan la transferencia de calor por convección. Los primeros tres términos del lado derecho representan la transferencia de calor

por conducción, mientras que S representa la velocidad de generación de calor interno volumétrico [12].

Se considera que la transmisión de calor en el material soldado es por conducción, en tanto que el flujo térmico desde las caras exteriores del material al medio ambiente es por convección libre y radiación.

El flujo de calor por convección en el charco de soldadura no se toma en cuenta, ya que como se menciona líneas arriba, el periodo de tiempo en el que el metal permanece en estado líquido es muy corto, por lo que esta omisión no conduce a un error significativo en los resultados [11].

2.4.1.1 Transferencia de calor por convección

La ley de enfriamiento de Newton establece que la tasa de transferencia de calor que abandona una superficie a una temperatura T_A para pasar a un fluido del entorno a una temperatura T se establece por la ecuación 2.2 [12].

$$H = h A(T_A - T)$$

Ecuación 2.2 Transferencia de calor por convección [12].

Donde h se llama coeficiente de convección, en $W/(m^2K)$, A es la superficie que entrega calor con una temperatura T_A al fluido adyacente [12].

2.4.1.2 Transferencia de calor por radiación

La ley de transferencia de calor por radiación (Ecuación 2.3) viene dada por la ley de Stefan-Boltzman modificada:

$$H = \varepsilon \sigma A(T^4 - T_0^4)$$

Ecuación 2.3 Transferencia de calor por radiación [12].

Donde ε es la emisividad de la superficie radiante que se define como la razón entre la potencia de emisión de la superficie y la potencia de emisión de un cuerpo negro a la misma temperatura. La emisividad es una propiedad del

material que depende de la temperatura y del acabado de la superficie. El valor de la constante de Stefan-Boltzman (σ) es $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$, T es la temperatura absoluta del cuerpo y T_0 es la temperatura absoluta del medio circundante (temperatura ambiente) [12].

2.4.2 Ecuaciones de Rosenthal

En la ecuación de Rosenthal [11] se utilizan los siguientes supuestos simplificadores para derivar las ecuaciones para el flujo de calor que se genera durante la soldadura:

1. Flujo de calor en estado estacionario
2. Fuente de calor
3. Calor insuficiente en la fusión
4. Propiedades térmicas
5. No existe pérdida de calor en la superficie de la pieza
6. No hay convección en el charco de soldadura

2.4.2.1 Ecuación de dos dimensiones de flujo de calor

Para determinar el flujo de calor que se genera en la soldadura, Rosenthal definió que durante la soldadura en chapas delgadas, que debido al espesor de la pieza de trabajo, las variaciones de temperatura en la dirección del espesor y el flujo de calor se supone en dos dimensiones como se muestra en la Figura 0.5, Rosenthal derivó una ecuación (Ecuación 2.4) para determinar el flujo de calor en la soldadura en dirección (x, y) de la pieza soldada [11].

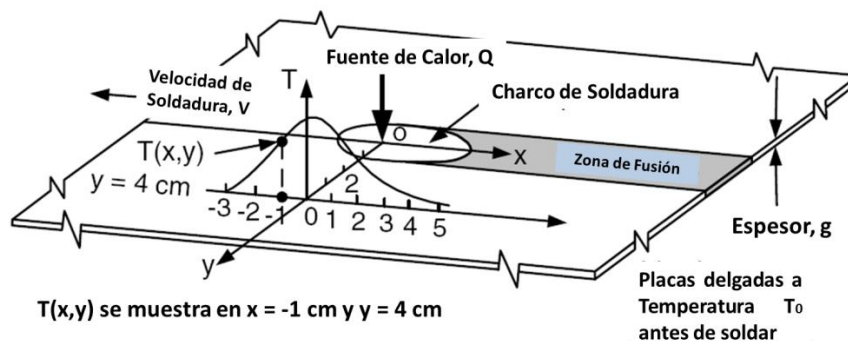


Figura 0.5 Flujo de calor en dos dimensiones en chapas delgadas [11].

$$\frac{2\pi(T - T_0)kg}{Q} = \exp\left(\frac{V_x}{2\alpha}\right) K_0\left(\frac{V_r}{2\alpha}\right)$$

Ecuación 2.4. Ecuación de dos dimensiones de Rosenthal [11].

2.4.2.2 Ecuación tridimensional de flujo de calor

Rosenthal también obtuvo una solución analítica para el flujo tridimensional de calor en una pieza de trabajo de chapas gruesas durante la soldadura, como se muestra en la Figura 0.6, la cual los valores son definidos en la Ecuación 2.5, la cual permite calcular la distribución de temperatura en la pieza de trabajo durante la soldadura para determinar los ciclos térmicos que se presentan durante el pase de soldadura sobre la pieza a diferentes distancias en dirección (x,y,z) [11].

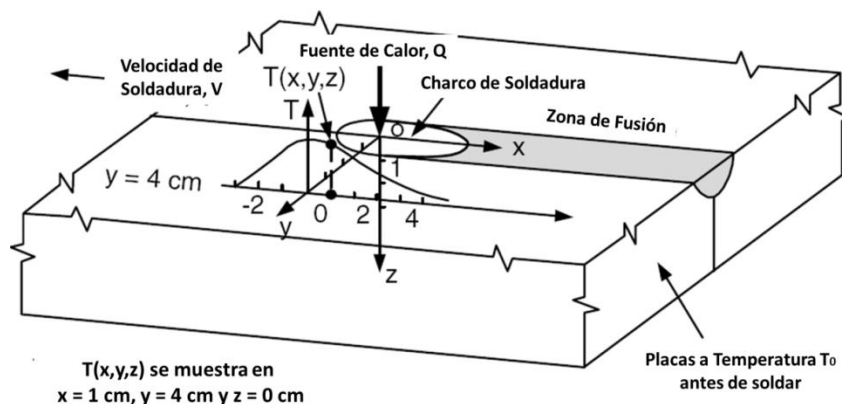


Figura 0.6 Flujo de calor en tres dimensiones en chapas gruesas [11].

$$\frac{2\pi(T - T_0)kR}{Q} = \exp\left[\frac{-V(R - x)}{2\alpha}\right]$$

Ecuación 2.5 Ecuación tridimensional de Rosenthal [11].

2.4.3 Ciclos térmicos y distribución de temperatura

Las gráficas obtenidas por la variación de la temperatura respecto al tiempo en una región específica permiten obtener datos como los que se especifican a continuación y se muestran en la Figura 0.7 [13].

- Temperatura máxima alcanzada
- Tiempo de permanencia arriba de una temperatura específica ($t_s(T_s)$)
- Tiempo de enfriamiento entre dos temperaturas
- Velocidad de enfriamiento (V_R)

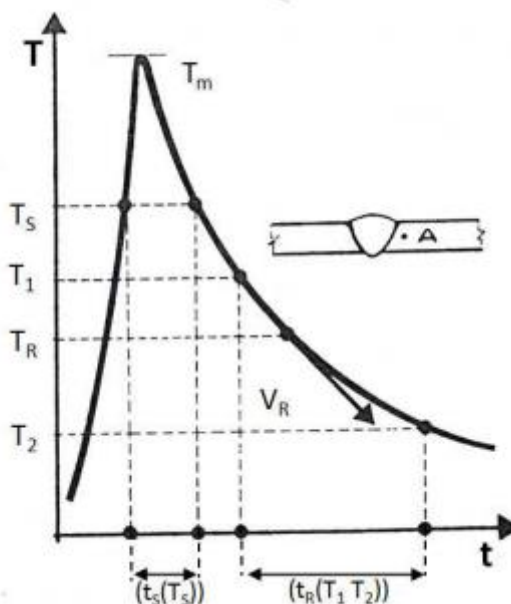


Figura 0.7 Curva de temperatura en función del tiempo en un punto específico de la ZAC en la soldadura [13].

Existen dos caminos para obtener la información sobre los ciclos térmicos, la primera se trata de una aproximación matemática, y también es posible medir directamente, esto es con termopares.

Los ciclos térmicos permiten predecir los fenómenos metalúrgicos que ocurrirán en la región de interés, como es en la ZAC, que permite determinar y anticipar las fases que estarán presentes durante el calentamiento como el enfriamiento [13].

El ciclo térmico también proporciona información sobre la penetración de soldadura y geometría de la zona afectada por el calor. Por lo tanto, el control

del ciclo térmico es fundamental para una buena calidad de la soldadura. Simular modelos de soldadura ayuda a predecir los resultados del proceso sin la necesidad de costosas pruebas de pre-producción [14].

Wahab M.A et al (2000), ponen como antecedente en su trabajo que el desarrollo de estos modelos que intentan predecir los resultados del proceso se inició en la década de 1940 con las soluciones analíticas de Rosenthal pero creció rápidamente durante la década de 1980 con la aparición de potentes ordenadores [14].

Wahab M.A et al (2000) describe que en su obra Goldak indicó que los ingenieros de soldadura quieren una forma sencilla de predecir la información baño de fusión. Goldak representa la fuente de calor con una doble elipsoidal, en el que la energía del arco se distribuye en volumen semi-elipsoidal, como se muestra en la Figura 0.8 [14].

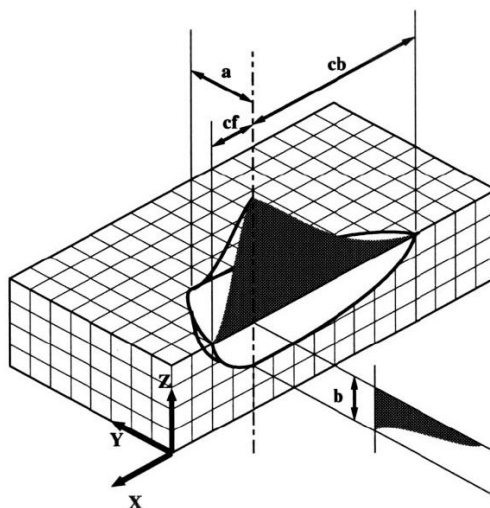


Figura 0.8 Representación de doble elipsoidal de la distribución de calor de soldadura por arco [14].

2.5 Simulación computacional del proceso GMAW

Hoy en día el realizar simulaciones matemáticas de procesos ha provocado un gran avance en la industria, especialmente en las diferentes ramas de la ingeniería, ya que se ha desarrollado en la mayoría de los procesos industriales con el fin de reducir costos y tiempos, pero principalmente obtener un producto de calidad.

De acuerdo a Llican (2007), la simulación es una técnica numérica que permite realizar experimentos en softwares de computadora. Estos experimentos comprenden relaciones matemáticas y lógicas, que son necesarias para describir el comportamiento y la estructura de sistemas muy complejos aplicados al mundo real [15].

Además algunas de las razones para simular procesos de soldadura por el método de elementos finitos, es que es una herramienta global usada en mecánica computacional de soldadura, además de que es un método el cual permite desarrollar un proceso de modelación y poder tomar en cuenta las variables de entrada, de salida y el entorno en el cual se desarrollará el proceso. Que sin embargo, las simulaciones no reemplazan a los experimentos, las simulaciones ofrecen muchas ventajas como algunas desventajas [16].

En lo que se refiere al proceso GMAW se ha empleado la simulación para comprender las diferentes mecanismos que dan lugar en la manifestación de los fenómenos tales como transformaciones de fase y su morfología, el flujo de calor presente en el cordón durante la soldadura [16].

2.5.1 Modelación

Un modelo representa la parte de un proceso a simular, mediante una serie de ecuaciones, las cuales se basan en los fenómenos físicos y químicos que rigen el proceso [16].

Un modelo es llamado matemático cuando se reúne un conjunto de ecuaciones (normalmente son ecuaciones diferenciales) que representan las leyes de la naturaleza que actúan sobre el sistema y posteriormente se busca resolverlas mediante diversos métodos considerando las condiciones iniciales y de frontera

disponibles para el modelo. Una combinación “virtual” de la modelación física y matemática es la modelación computacional. En este tipo de modelación se utilizan herramientas de diseño y manufactura ayudados por computadora (CAD/CAM, por sus siglas en inglés) junto con algoritmos de programación para resolver las ecuaciones gobernantes y así poder “simular” el comportamiento del sistema en cuestión [17].

La modelación es de gran ayuda para estudiar sistemas complejos que son imposibles de estudiar por medio de la experimentación directa [18], por lo que es posible estudiar el flujo de calor en el cordón de soldadura durante el proceso GMAW desarrollando gran variedad de modelos bajo distintas condiciones del proceso para predecir diferentes fenómenos que se pudieran presentar.

Según Bermón [19] “Un modelo es una representación de un objeto, sistema o idea, de forma diferente al de la entidad misma. El propósito de los modelos es ayudar a explicar, entender o mejorar un sistema. Un modelo puede ser una réplica exacta de éste o una abstracción de las propiedades dominantes del objeto”, haciendo posible estudiar el comportamiento del sistema original. En la Figura 0.9 se muestra el concepto de un modelo de simulación.

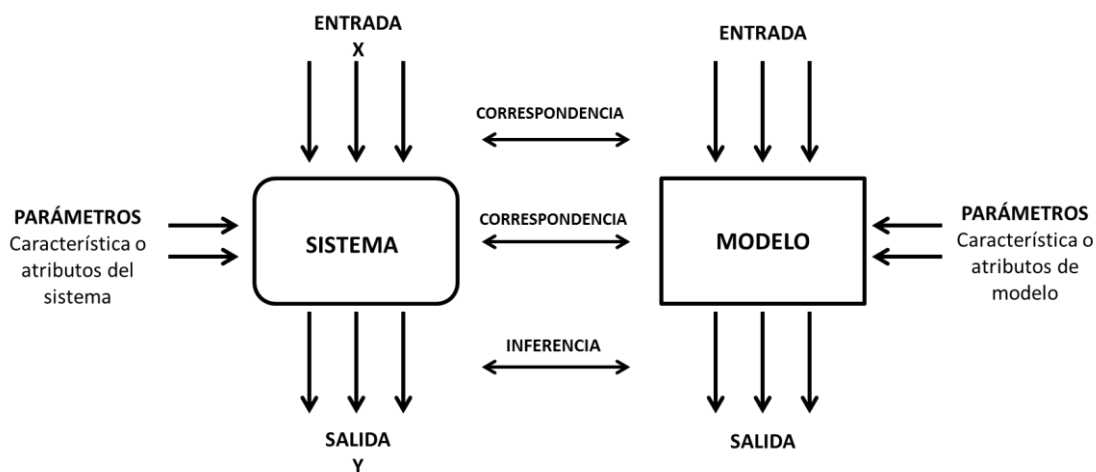


Figura 0.9 Concepto gráfico de un modelo de simulación [19].

Existen diversos tipos de modelos que se clasifican según su aplicación [18]:

- **Mentales:** son representaciones que se utilizan para explicar cómo funciona el mundo real.
- **Semánticos:** formalización lingüística de un modelo mental.
- **Físicos:** son modelos tangibles a pequeña escala.
- **Analógicos:** modelos que se plantean utilizando sistemas afines.
- **Numéricos:** su representación está basado en las matemáticas.

Esta clasificación ha ido avanzando según las investigaciones y la complejidad de los sistemas, teniendo en cuenta que las conclusiones arrojadas por los modelos dependen en gran medida de la validez del modelo empleado [18].

2.5.2 Método numérico

Los métodos numéricos son técnicos para proporcionar soluciones con cálculos aritméticos y lógicos. Una modelización por métodos numéricos es usada para representar ciertos aspectos del comportamiento de un sistema [19]. En diversos casos, numerosos autores han llevado a cabo estudios sobre la precisión de diferentes métodos numéricos en una gran variedad de problemas de transferencia de calor.

En este trabajo la justificación para realizar el análisis del proceso de soldadura por medio de elemento finito es resolver el sistema, compuesto por el problema físico del calor aportado por la misma.

Durante la simulación del proceso de soldadura existen dos dificultades las cuales son: los modelos usados para describir el comportamiento del material, y el modelo que define el ciclo térmico que genera la soldadura en el sólido. Para la solución numérica se utiliza un software adecuado, generalmente es un software de lenguaje propiamente matemático. Este procedimiento es la base de los métodos numéricos de diferencias finitas, elementos finitos y volúmenes finitos [20].

2.5.3 Método de elementos finitos

El análisis por el método de elemento finito (MEF) ó (FEM, por sus siglas en inglés) ha adquirido una gran importancia en la solución de diversos problemas ingenieriles, físicos, etc. es un modelo aproximado, que permite realizar modificaciones en el prototipo ahorrando costos y tiempo [21].

El método de elementos finitos permite realizar un modelo matemático de cálculo del sistema real, más fácil y económico del prototipo empleando una gran cantidad de programas que permiten realizar cálculos con elementos finitos [21].

El FEM consiste en una división de un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos, que son los puntos en los cuales se determinan los valores de las variables del modelo. Para emplear el FEM se deben tomar en cuenta los puntos siguientes [21]:

- **Dominio:** Espacio geométrico limitado por las fronteras del sistema.
- **Condiciones de contorno:** Conocidas como condiciones de frontera. Estas condiciones designan los valores de la variable o variables que condicionan el cambio del sistema.
- **Incógnitas:** Variables del sistema que se desean conocer después de que las condiciones de contorno han actuado sobre el sistema.

En los nodos se observan las incógnitas del problema. Los nodos se dividen en grados de libertad y estas son las variables que determinan el estado de los nodos en el objeto, como por ejemplo, desplazamiento en dirección y, desplazamiento en dirección x y giro según z. Una vez conociendo los valores de los grados de libertad, se pueden predecir las incógnitas de salida en el sistema [21].

Un modelo de elementos finitos se aproxima a la solución real del problema a medida que se incrementa la densidad de elementos, lo cual conduce a la realización de un análisis de la solución.

La solución de cualquier problema utilizando el método de los elementos finitos contempla los pasos siguientes [22]:

1. Especificar la geometría: Esto se puede hacer dibujando la geometría en un paquete CAD.
2. Definir el tipo de elemento y las propiedades del material.
3. Enmallar el objeto
4. Aplicar las condiciones de frontera (restricciones) y cargas externas en caso de existir.
5. Generar una solución.
6. Realizar un post-procesamiento, es decir, visualizar los datos obtenido a través de gráficas o dibujos.
7. Interpretación de resultados, este paso es de suma importancia, debido a que se requieren de conocimientos para entender e interpretar los resultados arrojados por el programa.

En la Figura 0.10 se muestran los pasos seguidos para realizar la ejecución de un análisis por elementos finitos. Donde se observa que mediante un proceso de discretización se pasa de un sistema físico a un modelo discreto, que al ser solucionado permite obtener una solución. El resultado total del modelo se debe verificar contrastando los resultados con soluciones obtenidas por métodos experimentales o teóricos, lo cual constituye el proceso de validación del modelo analizado [22].

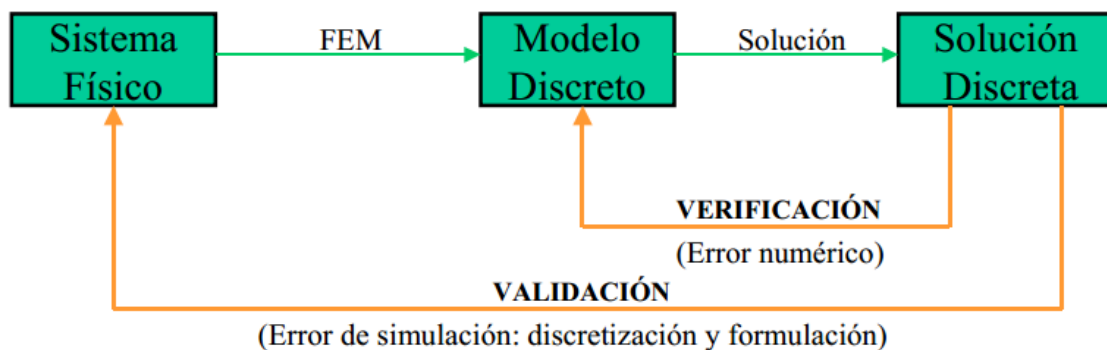


Figura 0.10 Uso del método de los elementos finitos [22].

La implementación computacional del método de los elementos finitos se compone básicamente de tres partes:

- Preprocesador, que funciona esencialmente como un paquete CAD, que permite construir el modelo y añadir las cargas y restricciones deseadas.
- Solucionador, permite ensamblar y resolver el sistema de ecuaciones que representa el sistema físico.
- Post-procesador, facilita la manipulación de los resultados numéricos en forma de listas, tablas o gráficas [22].

Un análisis de la soldadura mediante MEF, requiere que el proceso se analice de forma no lineal, ya que el mismo depende del tiempo y de la variación de las propiedades del material respecto a la temperatura. El carácter transitorio, requiere tener en cuenta curvas de tiempo, parámetros de soldadura y tipo de proceso empleado [20].

2.5.4 Ventajas y desventajas de la simulación

Ventajas [15]

- Se puede estudiar el efecto de cambios internos y externos del sistema a analizar.
- Obtener un mejor entendimiento del comportamiento del sistema.
- Se puede utilizar como un método de enseñanza del producto.
- Se puede experimentar nuevas situaciones en el objeto simulado.
- El modelo de simulación es menos costoso que aplicado realmente.

Desventajas [15]

- Se requiere de un equipo computacional costoso y recurso humano capacitado.
- Se requiere alto costo de tiempo computacional para desarrollar y perfeccionar un modelo de simulación.

2.5.5 Programas de cómputo para la simulación del proceso GMAW

Los programas de cómputo o las herramientas software permiten realizar una simulación de forma eficiente y cómoda, y se denominan herramientas de análisis por elementos finitos (HEF). Las HEF suelen tener una herramienta de diseño ayudados por computadora CAD, que es lo que definen la geometría del objeto de estudio mediante la obtención de un dibujo 2D o 3D [23].

Sin embargo existen ciertas dificultades propias de la simulación numérica, las cuales pueden ser: la imprecisión de los modelos usados para describir el comportamiento del material y los fuertes gradientes del modelo térmico que genera la soldadura en el sólido [20].

Es de suma importancia recalcar que para emplear algún programa de cómputo que trabaje con FEM se debe de plantear con precisión lo que se pretende obtener del análisis, además de establecer las variables más importantes que influyen en el sistema. En diferentes estudios los resultados pueden variar tomando en cuenta las variables necesarias según lo que se esté analizando [21].

2.5.5.1 SOLIDWORKS

El SOLIDWORKS Simulation es un programa que utiliza el método de formulación de desplazamiento de elementos finitos para calcular desplazamientos, deformaciones y tensiones de los componentes con cargas internas y externas. El análisis por elementos finitos optimiza y valida de forma eficaz cada paso del diseño con SOLIDWORKS Simulation integrado en CAD, que permite una rápida resolución para garantizar la calidad, rendimiento y seguridad del producto analizado. Además, las soluciones de SOLIDWORKS Simulation y sus funciones son un elemento habitual en el proceso del diseño, lo que reduce costosos prototipos, ahorra tiempo y costos en el desarrollo [24].

El análisis por elementos finitos con SOLIDWORKS Simulation permite conocer la geometría exacta durante el proceso de mallado, y se integra con el software

de CAD en 3D de SOLIDWORKS. Además, cuanto más precisión exista entre el mallado y la geometría del producto, más precisos serán los resultados del análisis [24].

SOLIDWORKS Simulation utiliza métodos de análisis por elementos finitos para calcular los desplazamientos y las tensiones de su producto debido a cargas operativas como las siguientes [24]:

- Fuerzas
- Presiones
- Aceleraciones
- Temperaturas
- Contacto entre componentes

Las cargas pueden importarse desde estudios de simulación térmica, de flujo y de movimiento para realizar análisis multifísicos.

El SOLIDWORKS Simulation permite a cada uno de los diseñadores e ingenieros realizar un análisis térmico en cualquier fase del diseño para garantizar que todos los componentes funcionen correctamente en los intervalos de temperatura previstos, y detectar problemas de seguridad o efectos que se pudiesen tener antes de que surjan [25]. El análisis térmico calcula en el diseño y su entorno la temperatura y la transferencia de calor del interior de los componentes y su alrededor. Es por esto que, el SOLIDWORKS Simulation permite calcular los campos de temperatura en estado estable o transitorio debido a [26]:

- Transferencia de calor en los sólidos (conducción)
- Temperaturas iniciales o fijas aplicadas
- Convección libre, forzada y mixta
- Radiación
- Resistencia al contacto térmico entre los componentes
- Fuentes de calor (tasa de generación de calor, potencia térmica, temperatura)

2.5.5.2 ANSYS

ANSYS es un ecosistema de programas para diseño, análisis y simulación de partes por elementos finitos. Es un software de ingeniería avanzada para la simulación del comportamiento de los productos manufacturados y de procesos industriales en el mundo real [27].

Este software aporta claridad y conocimientos para los problemas de diseño más complejos a través de una simulación de ingeniería rápida, exacta y fiable [28].

Ansys tiene las siguientes características que determinan el análisis de los modelos que en él se analizan [28]:

- **Integrado:** Se asocia a otro software de diseño asistido por computadora.
- **Modular:** El programa permite que el usuario pueda solucionar el problema por partes.
- **Extensible:** Se tiene adaptaciones más específicas según se requiera.

Pozo J y García J (2009) describen que la modelación mediante ANSYS del análisis térmico y estructural consta de tres etapas fundamentales que se mencionan a continuación [29]:

- **Etapas de preprocesamiento:** Durante esta etapa se define el modelo, y a la vez el tipo de elemento y sus características, así como también la geometría del modelo a analizar y el material. También se genera el mallado que se requiere.
- **Etapas de solución:** Se asignan cargas puntuales y restricciones del modelo.
- **Etapas de post-procesamiento:** Se visualizan los resultados en forma de listas de desplazamiento de nodos, diagramas, fuerzas, temperaturas, etc.

En la Figura 0.11 se muestra la modelación y simulación del proceso GMAW sobre una aleación de aluminio realizado por Pozo J. y García J (2009), donde se aplicaron las etapas de análisis del software ANSYS: a) Geometría de la

unión soldada, b) Mallado del modelo, c) aplicación de restricciones al modelo y d) análisis térmico de la soldadura [29].

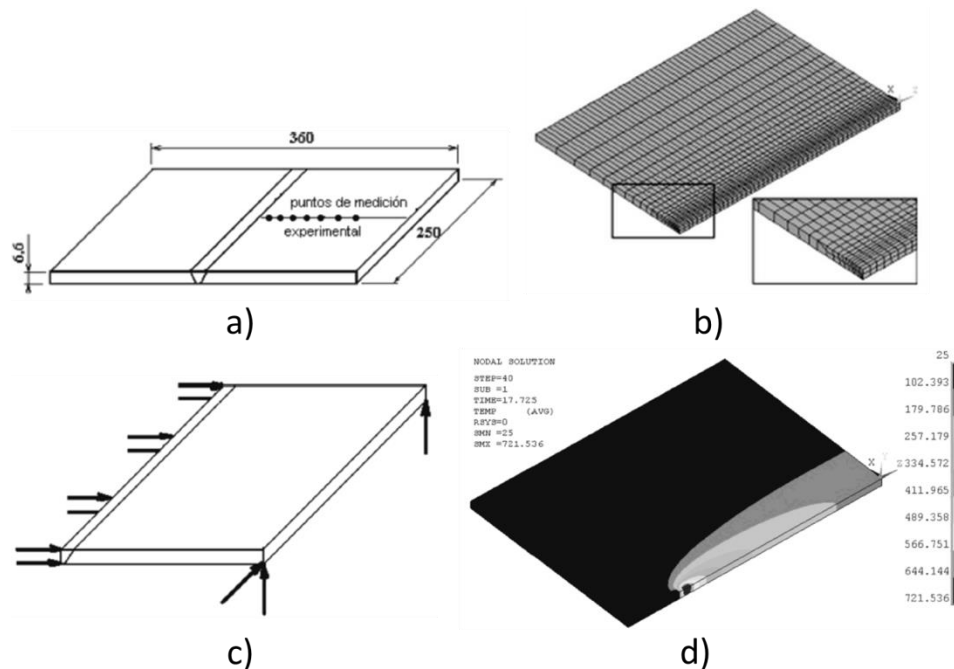


Figura 0.11 Procedimiento de modelación y simulación de la soldadura en ANSYS, a) Geometría de la unión soldada, b) Mallado intermedio del modelo, c) aplicación de restricciones en el modelo y d) análisis térmico de la unión en modelo con malla intermedia [29].

2.5.5.3 SimuFact Welding

SimuFact Welding es un programa de cómputo empleado para la simulación por medio de MEF. El objetivo del SimuFact es simular todo un proceso de fabricación desde corte de material, hasta la operación de unión, soldadura y análisis estructural. Con esta herramienta computacional se obtienen los siguientes beneficios del proceso y modelo a analizar, como lo son; reducción de costos y tiempos en pruebas físicas, así como una mayor estabilidad en el proceso de soldadura para obtener una mayor calidad de producto [30].

Además, el SimuFact Welding es capaz de simular una gran variedad de tipos de soldadura, que con una interfaz amigable permite el cálculo efectivo de la secuencia de soldadura y una predicción realista del componente en la

influencia de calor de la ZAC que permite concluir con las propiedades del cordón de soldadura, tomando también en cuenta la transformación de la microestructura [31].

El programa computacional de simulación SimuFact Welding ofrece [32]:

- Control de precisión cronometrado en la simulación.
- Evaluación rápida de variantes cambiando los parámetros del proceso.
- Fácil modificación de secuencia de la soldadura, velocidad de soldadura, la entrada de calor y tiempo de soldadura.
- Optimización precisa de la zona de fusión, las zonas afectadas por el calor, tensiones y distorsiones durante la soldadura.

En la Figura 0.12 se puede observar el procedimiento de la simulación del proceso GMAW para realizar en el software SimuFact Welding en el artículo “Study on the Structure Deformation in the Process of Gas Metal Arc Welding (GMAW)” por Son Minh P. y Viet Phu T. [33]

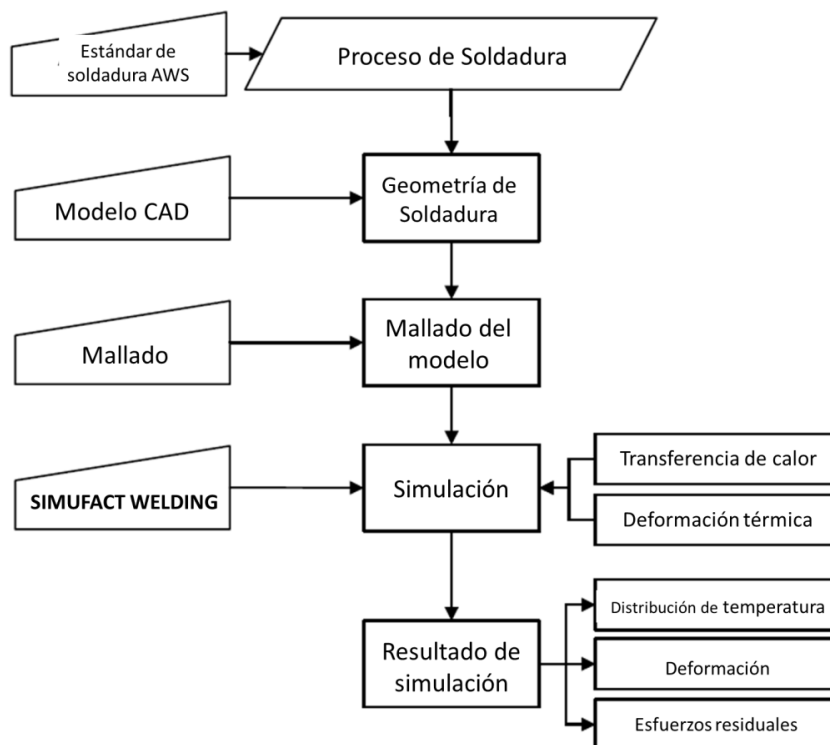


Figura 0.12 Procedimiento de simulación del proceso GMAW [33].

2.6 Aplicación de la simulación del proceso GMAW

En esta sección se analizarán dos artículos que ayudan a comprender la metodología utilizada FEM en los simuladores, aplicada en el proceso GMAW.

Primeramente W. Bullón y J. Acosta (2007) en su trabajo titulado como “Simulación de un proceso de soldadura mediante un modelo termo - mecánico considerando el efecto de esfuerzos residuales utilizando el método de los elementos finitos”, presentan una simulación de un proceso de soldadura GMAW por el método de elementos finitos mediante un modelo de ciclo térmico con el programa Solidworks, con el fin de obtener los resultados para prever probables problemas durante la aplicación del proceso. [34].

Durante el proceso de soldadura ocurren variaciones en función del tiempo y de la temperatura como se puede observar en la Figura 0.13 una probable distribución de temperaturas en una sección transversal en cualquier soldadura. Aplicando el calor localmente a la zona de unión se transmite rápidamente por el metal aumentando su temperatura. Originando un calentamiento en el metal soldado que conlleva a que el metal sufra transformaciones metalúrgicas que afectarán su microestructura y ésta, a su vez, sus propiedades mecánicas, cambios dimensionales en la pieza que provocarán distorsiones y esfuerzos residuales [34].

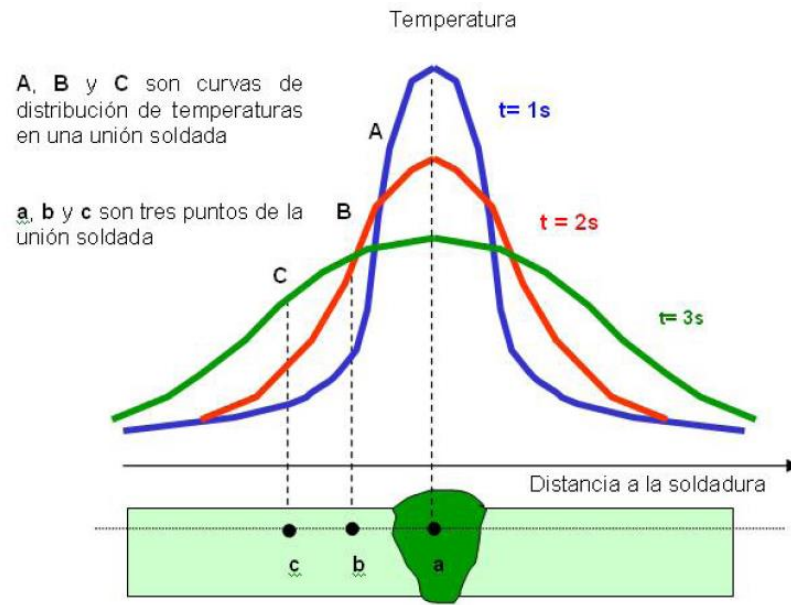


Figura 0.13 Distribución de temperaturas [34].

Particularmente para realizar las curvas de tiempo vs temperatura, se colocan termopares sobre toda la superficie de las piezas a soldar, para medir en cada punto de la pieza, el ciclo térmico durante la soldadura y se dibujan las curvas isotermas a partir de las mediciones de temperatura, se puede obtener una representación como de la Figura 0.14 [34].

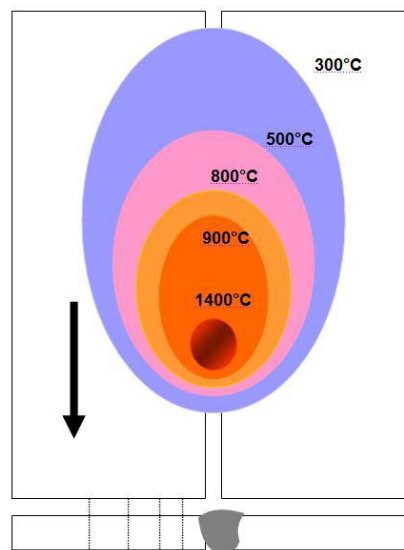


Figura 0.14 Curvas isotérmicas en una pieza sometida a soldadura a tope [34].

2.6.1 Condiciones preliminares

Para la simulación J. Acosta y W. Bullón en el presente estudio se empleó el programa Solidworks simulation para construir el modelo geométrico y parte de la simulación del proceso. Para realizar cualquier simulación es necesario determinar las propiedades químicas del material, en la Tabla 0.4 se muestra la composición química del material utilizado, así como también tener en cuenta los parámetros para el proceso GMAW. En la Tabla 0.5 se muestran los parámetros establecidos para tomar en cuenta en el proceso de simulación [34].

Tabla 0.4 Composición química del acero Dillidur 400V [34].

Elemento	% en peso
%C	0.102
%Mn	1.298
%Si	0.354
%Ni	0.054
%Cr	0.546
%Cu	0.036

Tabla 0.5 Parámetros de soldadura y material [34].

Parámetros	
Longitud de chapa	200 mm c/u
Espesor	6 mm
Voltaje	30 V
Amperaje	250 A
Velocidad de avance	2.5 mm/seg

2.6.2 Modelo experimental

En dicho estudio, para la simulación del proceso GMAW se diseñó un modelo 3D (tridimensional) Figura 0.15, generado en el software SOLIDWORKS para estudiar el comportamiento del proceso así como sus propiedades térmicas durante la soldadura [34].

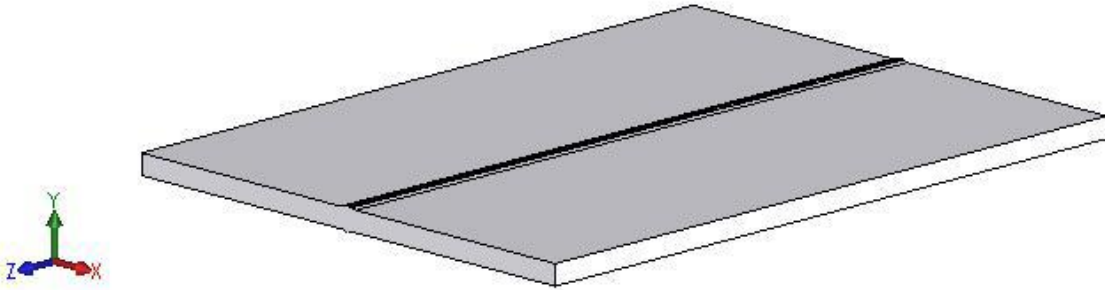


Figura 0.15 Modelo geométrico 3D empleado para la simulación [34].

El software permite realizar un mallado más fino en las zonas de interés, es decir en la zona donde el gradiente de temperatura es mayor, como lo es; la zona de fusión y la ZAC, lo que permite una mayor definición y detalle. Es por esto que una vez realizado el modelo geométrico, se realizó el enmallado de la pieza. En la Figura 0.16 se puede observar dos tamaños de malla diferentes en el modelo. Se utiliza una malla más fina en la zona de mayor importancia como es la zona de fusión, en la Figura 0.17 se observa con mayor detalle el mallado del modelo geométrico en esta zona la cual se prescribe el ciclo térmico mediante fuentes puntuales de temperatura a lo largo del cordón.[34].

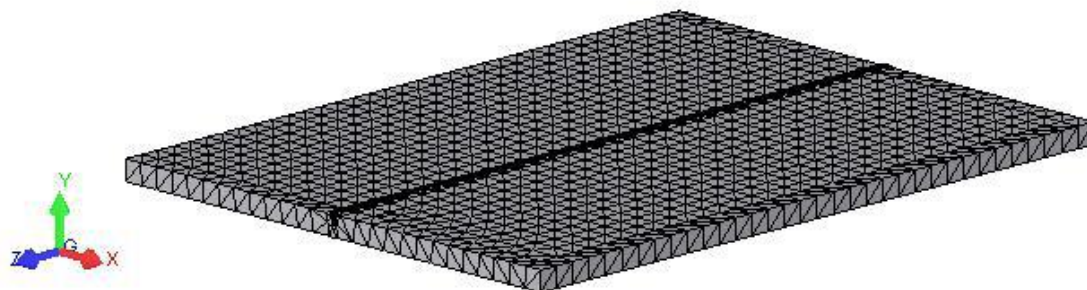


Figura 0.16 Malla empleada para la simulación numérica del proceso [34].

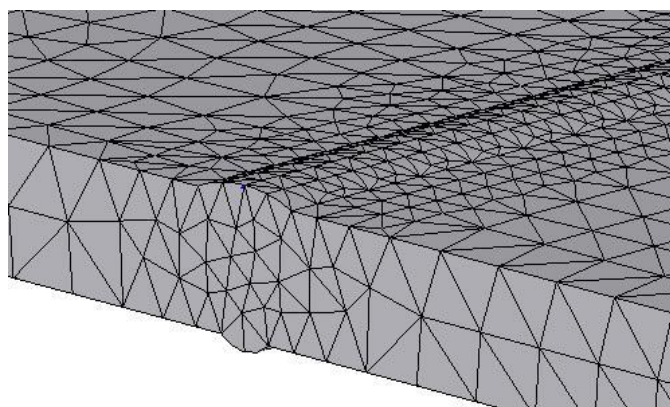


Figura 0.17 Detalle del modelo geométrico mallado [34].

2.6.3 Ciclo térmico del cordón de soldadura

W. Bullón y J. Acosta (2010) para tener un análisis de referencia del ciclo térmico del cordón de soldadura realizaron una experimentación con termopares en los costados de la zona de fusión. El ciclo térmico de la Figura 0.18 se obtuvo como resultado de mediciones experimentales con termopares, en tanto que la historia térmica de la Figura 0.19 es producto de una simulación termo-mecánica de un proceso de soldadura, en el que utiliza una fuente de calor de doble elipsoide, propuesto por Goldak y un modelo bidimensional, además de características y parámetros similares a los del presente estudio [34].

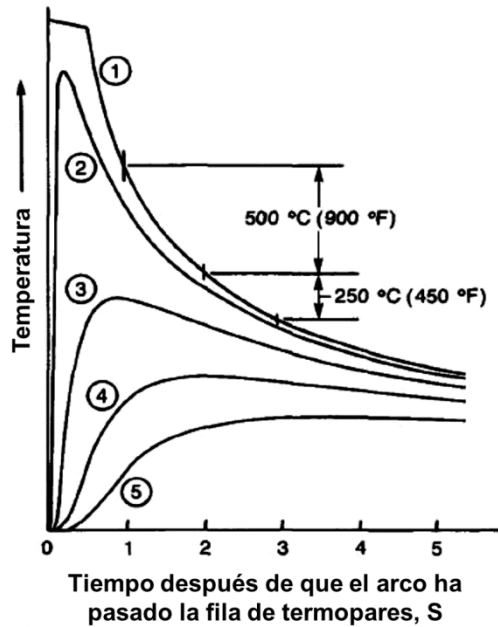


Figura 0.18 Temperaturas representadas gráficamente en función del tiempo en cuatro diferentes puntos en el metal base [34].

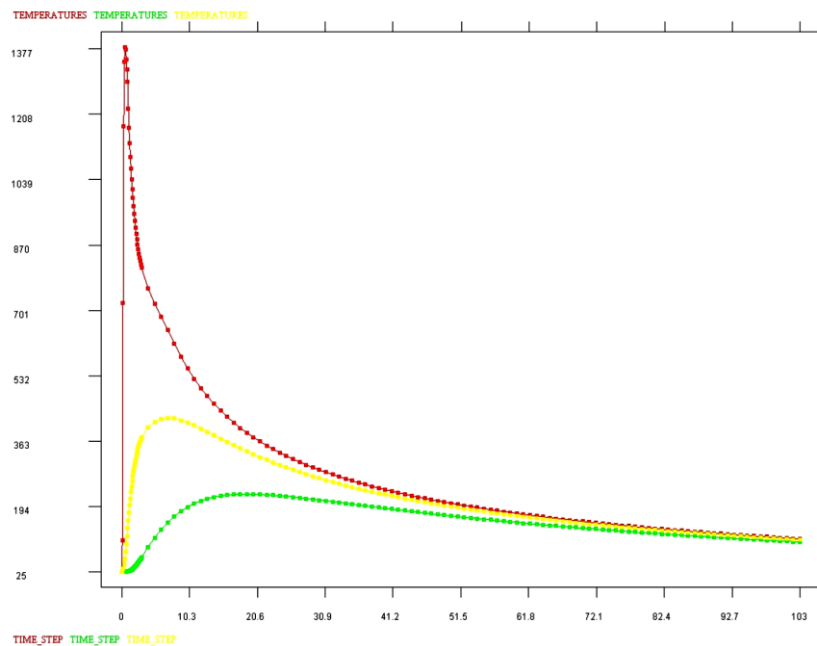


Figura 0.19 Historia térmica en diferentes puntos en una sección transversal de la unión soldada [34].

Como se puede observar, los resultados del presente estudio (historia térmica) tienen una tendencia en la forma de las curvas similar a las curvas que se toman como referencias [34].

2.6.4 Resultados de la simulación en GMAW

Una vez realizada la simulación de la unión W. Bullón y J. Acosta concluyeron, que obtuvieron resultados con aproximidad en el campo térmico a los que se obtienen con el proceso real de soldadura, asegurando la simulación de soldadura un método viable y confiable aplicable a la industria automotriz para hacer análisis de geometrías de uniones más complejas. Como se puede observar en la Figura 0.20 y Figura 0.21, que la simulación numérica nos permite obtener la historia térmica en cualquier punto del modelo geométrico y en cualquier instante de tiempo [34].

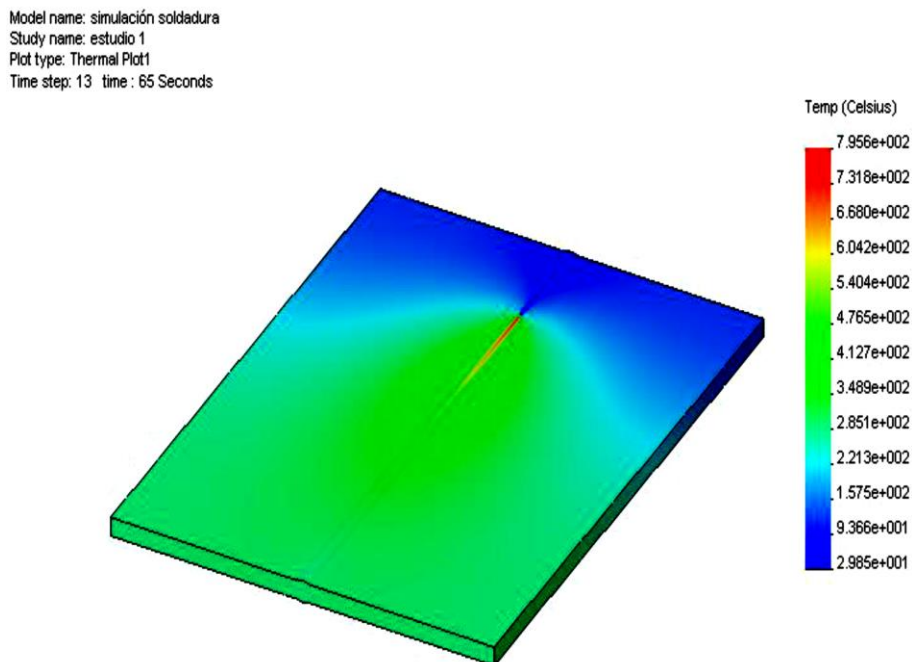


Figura 0.20 Distribución de temperaturas (historia térmica) a 65 segundos de iniciado el proceso [34].

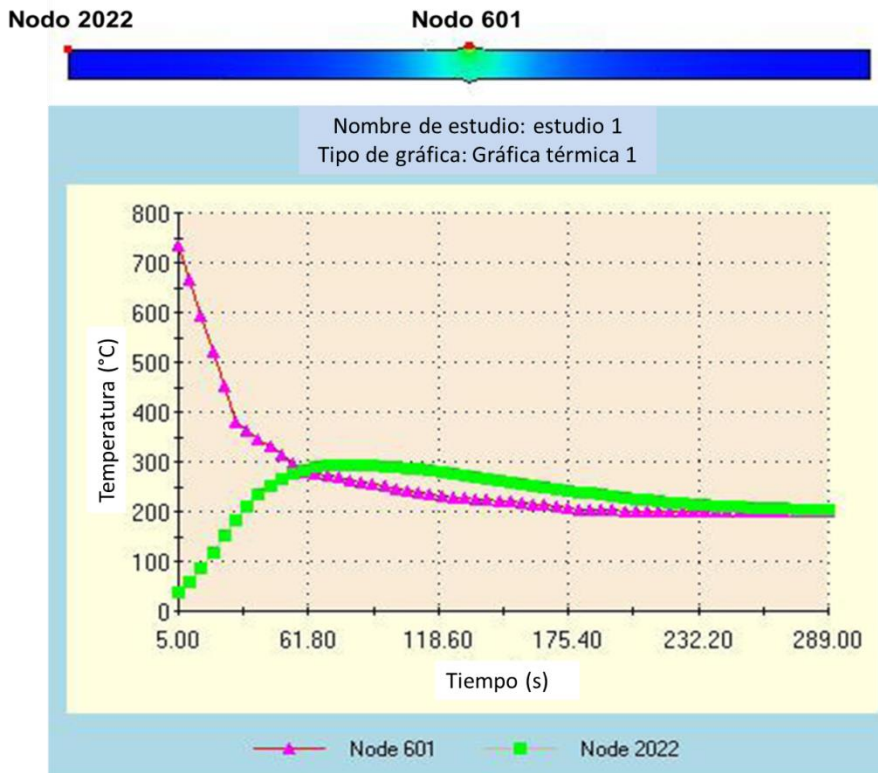


Figura 0.21 Historia térmica de dos puntos (nodo 601: sobre el cordón de soldadura, nodo 2022: sobre el extremo lateral izquierdo del metal base) en una sección transversal de la junta soldada [34].

Para obtener resultados cercanos a la realidad es importante realizar una adecuada modelación del material, es decir, se debe contar con información acerca de la dependencia de las propiedades térmicas y mecánicas del material base y material de aporte en función de la temperatura. Otros aspectos importantes para obtener resultados satisfactorios en la simulación son: la calidad de la malla, es decir el refinamiento de la malla de elementos finitos en el la zona correspondiente al cordón de soldadura (área donde se prescribe la temperatura) y zonas adyacentes próximas a este, así mismo utilizar un paso de tiempo pequeño, especialmente en el estudio térmico transitorio, para mayor precisión en los resultados. [34].

Por otra parte E. Martínez y M. Estrems (2010) desarrollaron un método de diferencias finitas para calcular el campo de temperaturas en la zona afectada por el calor en la soldadura en las chapas de acero inoxidable AISI 304, que fueron soldadas mediante el proceso GTAW [35], por lo tanto, el objetivo es desarrollar un método de diferencias finitas para el cálculo del ciclo térmico de la soldadura, en función de las propiedades térmicas del material, los parámetros geométricos del metal base y los parámetros de soldadura.

La implementación del procedimiento de cálculo de dicho trabajo se ha realizado utilizando hojas de cálculo MS-Excel con Visual Basic para aplicaciones (V.B.A), debido a la sencillez y gran difusión de estos programas. Ya que este tipo de formato facilita la compatibilidad con otros programas y su interrelación con otros libros de cálculo utilizados, así como la visualización gráfica de los resultados. En la Tabla 0.6 se establece la secuencia de libros de cálculo considerados en donde se distribuyen las tareas que son realizadas para el cumplimiento del procedimiento de análisis numérico [35]

Tabla 0.6 Esquema de la distribución de hojas de cálculo [35].

Programa de simulación ciclo térmico soldeo
Datos geométricos, parámetros de soldeo y propiedades material
Temperatura en el instante "i"
Temperatura en el instante "i+1"
Fracción líquida en el instante "i"
Fracción líquida en el instante "i+1"
Cálculo de aportación de calor Goldak
Resultados: Distribución de temperaturas
Cálculo ZAT
Cálculo $t_{8/5}$

Para introducir los datos se utiliza una hoja de cálculo, que es la que contiene las propiedades térmicas y físicas del material, geometría, tensión, intensidad y velocidad de soldadura. Y que posteriormente a partir de los datos de entrada, en diferentes hojas de cálculo queda representada la discretización (aproximación de la solución) de la chapa a soldar. Donde cada hoja de cálculo representa el valor de una característica, sea temperatura o fracción líquida en el instante, y la posición de la fuente de calor en el instante. El cálculo de las temperaturas y fracciones líquidas se realiza en el instante. En cuanto se tenga una solución, se copian los resultados y se registran los datos en la hoja "Resultados", y una vez teniendo un resultado se vuelve a reposicionar el aporte de calor, y se procede al cálculo del siguiente intervalo de tiempo.

En la hoja de resultados se queda reflejada la evolución de temperatura de los puntos de interés de la pieza soldada y se muestra una representación gráfica. El mismo libro de Excel tiene un proyecto VBA que contiene un módulo de programación, el cual, usando los objetos de las hojas que se realizaron, aplica formulas y realiza los procedimientos para calcular todo el proceso [35].

El procedimiento de soldadura empleado fue el GTAW. El caudal de gas utilizado fue de 12 l/min, y se realizó la soldadura sin material de aporte. La posición de soldadura fue horizontal en una unión a tope. Se empleó un electrodo de tungsteno aleado con lantano con un diámetros de 1.6 mm [35].

Para medir la temperatura de la chapa se realizó con ayuda de 8 termopares, y el registro de temperaturas se efectuó mediante un sistema de adquisición de datos. Los termopares utilizados fueron del tipo K (cromel/alumel) de 0.2 mm de diámetro y con una precisión de 0.5°C en un rango de funcionamiento de -75°C a 1200°C. El registro de datos se realizó con un registrador comercial TC-08, conectado a una computadora que permitió adquirir y visualizar la evolución de los datos de los termopares. Para el registro de los datos de temperaturas, se utilizó el software Picolog for Windows 5.15.6.

En la Tabla 0.7 se muestran los datos empleados para el caso de aplicación para la simulación de la soldadura de las chapas de acero inoxidable AISI 304 por GTAW [35]

Tabla 0.7 Parámetros de simulación de soldadura de acero inoxidable AISI 304 [35].

Espesor de metal base	3 mm
Velocidad de soldadura	0.0033 m/s
Voltaje	20 V
Intensidad de corriente	120 A

E. Martínez y M. Estrems (2010) encontraron que si se representaba en tres dimensiones los datos obtenidos en la hoja de resultados, correspondiente al caso de aplicación indicado, se obtiene la gráfica de la Figura 0.22. En dicha figura, el eje Z corresponde a la temperatura alcanzada en °C, en el eje X se representa la distancia en mm de las diferentes isotermas al centro del cordón de soldadura, y el eje Y representa el tiempo transcurrido en segundos [35].

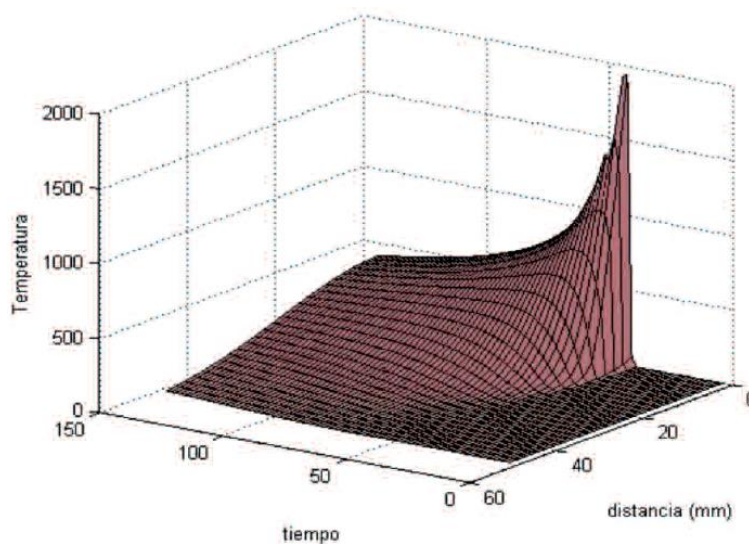


Figura 0.22 Simulación del ciclo térmico de soldadura tridimensional [35].

Sin embargo, se representa los resultados en dos dimensiones, se obtiene una evolución temporal de las temperaturas en la zona central de la chapa, tomada

en puntos de la línea perpendicular al eje del cordón de soldadura, como se indica en la Figura 0.23. Cada curva de dicha figura indica el ciclo térmico de soldadura a diferentes distancias del eje de fusión. La distancia de cada isoterma al eje de cordón será de 2,4, 6, 8 y 10 mm, etc. Como se observa en la Figura 0.23, se distinguen tres etapas térmicas diferentes. Donde la primera corresponde al aumento de la temperatura que se produce en los primeros instantes de la aplicación de la soldadura, la segunda fase corresponde a una distribución de temperatura, y finalmente, existe una fase térmica en la que la temperatura permanece uniforme a partir del instante en que el arco eléctrico desaparece [35].

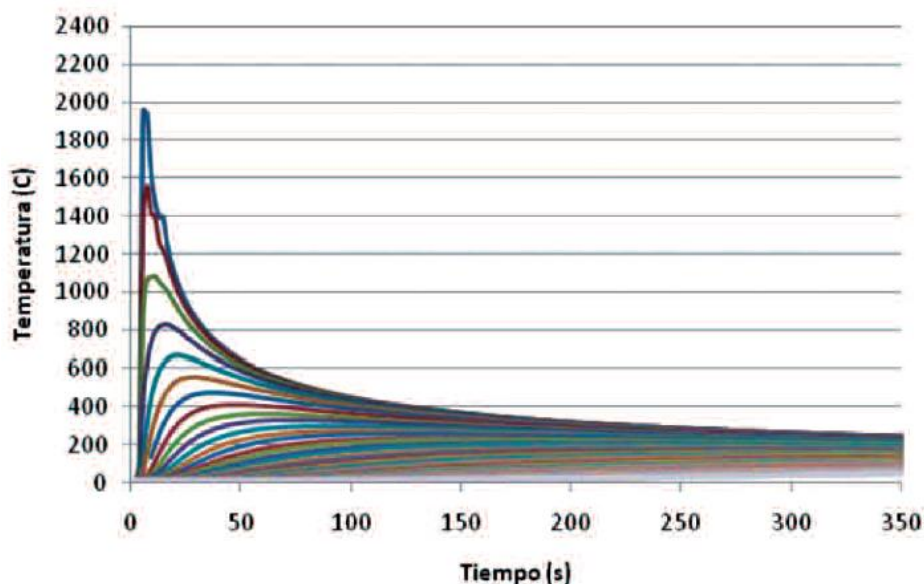


Figura 0.23 Simulación del ciclo térmico de soldadura (2D) [35].

Para concluir E. Martínez y M. Estrems (2010) realizaron una comparación de los resultados teóricos y experimentales para un punto situado a 5 mm del centro del cordón de soldadura. En la Figura 0.24 se muestra la comparación de la simulación numérica donde se obtuvo la temperatura del ciclo térmico de dicho punto considerando tres valores diferentes para el rendimiento térmico de la operación. En donde observan que el calentamiento y la temperatura máxima alcanzada se ajustan muy bien si se considera un rendimiento de 0.6 para la

operación. Se observa que la velocidad de enfriamiento de la curva experimental es más grande que la teórica, y que por lo tanto, el tiempo de enfriamiento es menor en la experimental que en la curva teórica, y esto se justificó debido que el flujo de calor en la simulación numérica es bidimensional, no se considera flujo de calor en la dirección del eje Z [35].

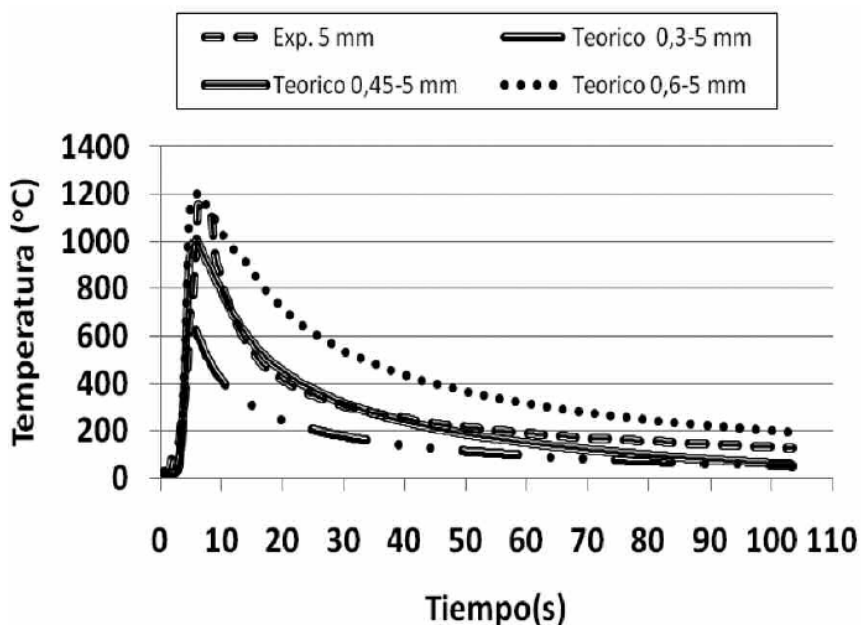


Figura 0.24 Comparación de resultados experimentales y numéricos [35].

El análisis y las soluciones descritas anteriormente son en este caso para el acero inoxidable AISI 304 mediante el proceso GTAW, mas sin embargo dicho procedimiento experimental se puede utilizar para otros tipos de metales y aleaciones, y para otros procedimientos de soldadura por arco eléctrico como el MIG/MAG, SMAW y FCAW. Y además que la disponibilidad y la extensión del programa hace que no se requieran especiales conocimientos informáticos para su implementación y uso. Partiendo de los parámetros que definen el comportamiento térmico de un material, de las dimensiones de las chapas a soldar y de las variables del proceso, se puede obtener y representar gráficamente el campo completo de temperaturas durante la operación de soldeo [35].

CAPÍTULO III

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE

BIBLIOGRAFÍA

La demanda y aplicaciones en la actualidad de los aceros inoxidable y AHSS han ido en aumento gracias a la cantidad de productos y aplicaciones que se les puede dar. El acero inoxidable tiene una amplia gama de aplicaciones en la industria automotriz debido a sus excelentes propiedades de acuerdo a su composición química, las características de fabricación, disponibilidad, propiedades mecánicas y costos del producto. Siendo la resistencia a la corrosión y propiedades mecánicas los factores más importantes en la selección de un grado de acero inoxidable para una aplicación. Por otra parte para los AHSS su aplicación ha ido en aumento gracias a que tienen excelentes propiedades de resistencia y ductilidad mayor a los aceros convencionales, y son especialmente utilizados en la fabricación de carrocerías para automóvil.

Las ventajas del proceso GMAW sobre otros procesos para unir aceros inoxidable y AHSS, es que es un proceso de soldadura continuo, tiene accesibilidad a puntos difíciles y en diferentes posiciones, así como es capaz de soldar diferentes materiales y que hoy en día es un proceso robótico debido a

sus cualidades. Mas sin embargo existen algunos inconvenientes en el proceso, que básicamente se refiere al costo elevado del equipo y material.

El requisito para el proceso GMAW es generar un arco entre el metal base y el electrodo, y que el calentamiento resultante funda el metal base y el electrodo proporcionando la unión de las placas base. Y durante el proceso, un gas protector salvaguarda la soldadura de la atmósfera evitando la oxidación del metal base.

Por lo anterior se ha estudiado por diversos autores el proceso GMAW mediante diferentes programas computacionales de simulación que emplean el método de elemento finito, para conocer el proceso y determinar si su aplicación puede ser satisfactorio, además con la ayuda de equipos de cómputo se pueden diseñar, modelar y ajustar diversos parámetros de soldadura, de esta misma manera también permite observar y analizar las diversas zonas de interés en el material soldado que son expuestas durante el cordón de soldadura, si falla o no falla la zona de soldadura, el calor generado en el metal base durante el proceso y la distribución de la temperatura.

Las simulaciones en la actualidad son una gran herramienta para cualquier industria ayudando a ahorrar tiempos y costos, proporcionando resultados aproximados de los diferentes procesos donde se aplica la simulación, pero sin duda es importante y necesario conocer los conceptos básicos de modelación para simular el proceso lo más entendible y preciso posible para obtener un resultado y análisis coherente.

En lo que se refiere al proceso GMAW se ha empleado la simulación para comprender los diferentes mecanismos que dan lugar en la manifestación de los fenómenos tales como transformaciones de fase y su morfología, y el flujo de calor presente en el cordón durante la soldadura.

Los programas de cómputo empleados para simular el proceso GMAW, se rigen por métodos numéricos, el cual realiza una modelización del proceso para representar ciertos aspectos del comportamiento del sistema (proceso).

Durante una simulación numérica se realiza un modelo para describir el comportamiento del material y un modelo para definir el ciclo térmico que se genera en la soldadura, y para ésta solución numérica se utiliza un software adecuado.

De manera general el objetivo del FEM es que mediante un proceso de discretización se pasa de un sistema físico a un modelo discreto, que al ser solucionado permite al operador obtener una solución, y el resultado total del modelo se verifica contrastando los resultados de soluciones obtenidas por métodos experimentales o teóricos.

En la revisión se presentó los programas de cómputo empleados para desarrollar simulaciones del proceso GMAW, los cuales se observan en la Tabla 3.1. Estos programas se desarrollan con una metodología básica, llevándose a cabo mediante las siguientes etapas:

- **Etapas de preprocesamiento:** se define el modelo, y a la vez se delimita el problema y determina el tipo de análisis a desarrollar.
- **Etapas de solución:** Se asignan cargas puntuales y restricciones del modelo con el tipo de ecuaciones que maneja el programa de cómputo para darle solución al problema.
- **Etapas de post-procesamiento:** Se muestran los resultados arrojados por el programa de simulación.

Tabla 3.1 Principales programas de simulación.

SOFTWARE
SOLIDWORKS
ANSYS
SimuFact Welding

En la actualidad existe una gran variedad de programas de cómputo en desarrollo el cual cada uno tiene potencial en su campo de aplicación. El ANSYS es un software que ayuda en la simulación del comportamiento de los productos manufacturados y de procesos industriales, lo que lo hace uno de los principales softwares utilizados hoy en día en las industrias, y en el campo de la simulación de soldadura, mientras que por otro lado el SOLIDWORKS se va abriendo camino en la parte de simulación de procesos de soldadura aumentando su paquete computacional con diversas funciones para la simulación de soldadura. Por otro lado el SimuFact Welding a pesar de que es un software nuevo y poco empleado en la industria de la soldadura, es un software que es capaz de simular una gran variedad de tipos de soldadura, tiene una interfaz amigable y permite el cálculo efectivo de la secuencia de soldadura y una predicción realista del componente en la influencia de calor de la ZAC y permite concluir con las propiedades del cordón de soldadura, tomando también en cuenta la transformación de la microestructura.

CONCLUSIONES

- El proceso GMAW es uno de los procesos más empleados en la industria automotriz y más conveniente para el desarrollo de diversas uniones disímiles por las ventajas de operación y aplicaciones que ofrece éste con respecto a otros procesos de soldadura.
- La simulación de un proceso de soldadura en específico del proceso GMAW es una herramienta eficaz que ayuda a solucionar de una manera precisa los inconvenientes presentes en este tipo de soldadura ya que se logra determinar y estudiar los efectos que produce la soldadura en el metal base de la aleación, teniendo presente que los resultados que arroja el software de simulación son aproximaciones a los resultados obtenidos realmente, además de que la simulación de un proceso de soldadura es un método fácil de entender una vez que se comprende la teoría general aplicada para los diferentes programas de cómputo que hoy en día se utilizan.
- Las herramientas de simulación ayudan a resolver de manera rápida y eficaz los diversos problemas industriales permitiéndole al operador manipular las variables de entrada, el entorno y los parámetros del proceso, evitando así realizar diversas pruebas en físico logrando ahorrar en costos y tiempo.

BIBLIOGRAFÍA

1. ASM Handbook, 1998. Properties and Selection: Irons. Vol 1. 10° Edición. Pp. 841-907.
2. KOTECKI D.J.1995, Welding of Stainless Steels. ASM Handbook. Vol 6, 9° Edición, pp. 677 - 707.
3. Acero inoxidable en la industria del transporte. APLICA-inox. [Internet] [Cited: Agosto 31, 2014].
<http://aplicainox.org/transporte/aplicaciones/ap01/2>
4. BOMBON, M. 2014. Análisis de la variación de velocidad de avance en la soldadura del acero inoxidable austenítico 304 mediante el proceso GMAW. Universidad Técnica de Ecuador.
5. INTERNATIONAL IRON & STEEL INSTITUTE Committee on Automotive Applications. 2006, Advanced high strength steel application.
6. MADIAS, J. Informe Técnico: Innovación en acero para la Industria Automotriz. [Internet] [Cited: Agosto 26, 2014].
http://www.alacero.org/Tecnologia/BT_2_2014/Innovaci%C3%B3n%20en%20acero%20para%20la%20industria%20automotriz.pdf
7. Instituto para el Desarrollo del Mercado del Acero [Internet] [Cited: Agosto 26, 2014].

<http://www.autosteel.org/Research/Growth%20of%20AHSS.aspx>

8. PEREZ, G., REYES, F., et al. 2010. Integridad estructural de un acero TRIP800 soldado mediante procesos láser CO₂ y GMAW. Ingenierías. Vol. XIII, No. 47.
9. ROWE, R. 2008, Manual de soldadura GMAW (MIG). Madrid, España. pp. 1-6.
10. TEMPLE, P.I. Soldadura por arco de metal y gas. American Welding Society. Manual de soldadura. 8va edición, pp 110-154
11. KOU, S. 2003, Welding Metallurgy. 2a edición. Pp: 47-53.
12. Mecanismos de transferencia de calor. [Internet] [Cited: Octubre 2014] [http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/34475/1/Mecanismos%20de%20transmisi%C3%B3n%20de%20calor%20\(CONDUCCION,%20CONVECCION,%20RADIACION\).pdf](http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/34475/1/Mecanismos%20de%20transmisi%C3%B3n%20de%20calor%20(CONDUCCION,%20CONVECCION,%20RADIACION).pdf)
13. HOYOS, E. 2009. Efecto de la técnica de pases en las propiedades mecánicas del acero ASTM A743. Universidad Nacional de Colombia Medellín.
14. WAHAB, M.A et al. 2000. The prediction of the temperatura distribution and Weld pool geometry in the gas metal arc welding process. Journal of Materials Processing Technology
15. LLICAN, J.A. Simulación de sistemas. [Internet] [Cited: Agosto 27, 2014] http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/tesis/basic/llican_cj/cap2.pdf
16. BULLON, W. 2010. Simulación de un proceso de soldadura utilizando un modelo termo-mecánico tridimensional. Pontifica Universidad Católica del Perú.
17. ZAPATA, O. 2012. Simulación de la evolución Microestructural de aceros al silicio. Facultad de Ingeniería de Mecánica y Eléctrica. Universidad Autónoma de Nuevo León.
18. LOPEZ, Z. 2012. Estudio de herramientas de simulación por elementos finitos en el proceso de soldadura por fricción FSW aplicado en aleaciones de aluminio. Corporación Mexicana de Investigación en Materiales

19. BERMON, L. Simulación: definición de modelo. Universidad Nacional de Colombia. [Internet] [Cited: Diciembre 17, 2014] <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4060010/lecciones/Capitulo1/modelo.htm>
20. MARTINEZ, E. ESTREMS, M et al. 2009. Estado del arte de la modelización de los procesos de soldadura por arco eléctrico empleados en construcción metálica. XIII Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos.
21. CARNICERO, A. Introducción al método de los elementos finitos. [Internet] [Cited: Noviembre 2014] http://www.iit.upcomillas.es/~carnicero/Resistencia/Introduccion_al_MEF.pdf
22. MEJIA, F. Modelamiento mediante elementos finitos. [Internet] [Cited: Noviembre 2014] <http://www.estructuras.unal.edu.co/Pagina%20ANSYS/fernandomejia/1modelam.pdf>
23. ESCRIBANO, M. El análisis por elementos finitos. Universidad Complutense de Madrid.
24. DASSAULT SYSTEMES. SOLIDWORKS. Análisis por elementos finitos. [Internet] [Cited: Diciembre 2014] <http://www.solidworks.es/sw/products/simulation/finite-element-analysis.htm>
25. DASSAULT SYSTEMES. SOLIDWORKS Simulation. Perspectivas de diseño para liderar el mercado de la innovación [Internet] [Cited: Diciembre 2014] http://www.solidworks.es/launch/documents/SW2014_Datasheet_Simulation_ESP.pdf
26. DASSAULT SYSTEMES. SOLIDWORKS. Análisis térmico. [Internet] [Cited: Diciembre 2014] <http://www.solidworks.es/sw/products/simulation/thermal-analysis.htm>

27. 3D CAD Portal. ANSYS. [Internet] [Cited: Diciembre 2014] <http://www.3dcadportal.com/ansys.html>
28. ANSYS. [Internet] [Cited: Diciembre 2014] <http://www.ansys.com>
29. POZO, J. GGARCIA, J. 2009. Metodología de modelación mediante ANSYS de la historia térmica, tensiones y deformaciones de soldadura. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería Mecánica. Centro de Investigación de Soldadura. Cuba.
30. 3D CAD Portal. SimuFact. [Internet] [Cited: Diciembre 2014] <http://www.3dcadportal.com/simufact.html>
31. SimuFact Simulation Manufacturing. SimuFact Welding. [Internet] [Cited: Diciembre 2014] http://www.simufact.de/en/solutions/sol_weld.html
32. SimuFact Welding. The solution to simulating welding processes. [Internet] [Cited: Diciembre 2014] http://www.simufact.de/en/solutions/Praesentation_wel/Simufact_BR_simufact.welding_en.pdf
33. SON MINH, P. VIET PHU, T. 2014. Study on the deformation in the process of Gas Metal Arc Welding. American Journal of Mechanical Engineering. Vol 2.
34. BULLÓN, W. ACOSTA, J. 2010. Simulación de un proceso de soldadura mediante un modelo termo-mecánico considerando el efecto de esfuerzos residuales utilizando el método de los elementos finitos. 8° Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. Pontifica Universidad Católica de Perú.
35. MARTINEZ, E. ESTREMS, M. 2010. Desarrollo de un modelo matemático de diferencias finitas para el análisis del campo de temperaturas en la soldadura por arco de chapas finas de acero inoxidable. Revista de Metalurgia.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Aplicación del acero inoxidable austenítico en el sistema de escape de un automóvil [3].	10
Figura 2.2 Esquema de una microestructura de un acero TRIP [5].	14
Figura 2.3 Representación de la aplicación de los AHSS en la carrocería de un automóvil [7].	15
Figura 2.4 Esquema del proceso de soldadura GMAW [10].	17
Figura 2.5 Flujo de calor en dos dimensiones en chapas delgadas [11].	22
Figura 2.6 Flujo de calor en tres dimensiones en chapas gruesas [11].	23
Figura 2.7 Curva de temperatura en función del tiempo en un punto específico de la ZAC en la soldadura [13].	24
Figura 2.8 Representación de doble elipsoidal de la distribución de calor de soldadura por arco [14].	25
Figura 2.9 Concepto gráfico de un modelo de simulación [19].	27
Figura 2.10 Uso del método de los elementos finitos [22].	30
Figura 2.11 Procedimiento de modelación y simulación de la soldadura en ANSYS, a) Geometría de la unión soldada, b) Mallado intermedio del modelo, c) aplicación de restricciones en el modelo y d) análisis térmico de la unión en modelo con malla intermedia [29].	35
Figura 2.12 Procedimiento de simulación del proceso GMAW [33].	36
Figura 2.13 Distribución de temperaturas [34].	38

Figura 2.14 Curvas isotérmicas en una pieza sometida a soldadura a tope [34].....	38
Figura 2.15 Modelo geométrico 3D empleado para la simulación [34].	40
Figura 2.16 Malla empleada para la simulación numérica del proceso [34].	41
Figura 2.17 Detalle del modelo geométrico mallado [34].	41
Figura 2.18 Temperaturas representadas gráficamente en función del tiempo en cuatro diferentes puntos en el metal base [34].	42
Figura 2.19 Historia térmica en diferentes puntos en una sección transversal de la unión soldada [34].....	42
Figura 2.20 Distribución de temperaturas (historia térmica) a 65 segundos de iniciado el proceso [34].	43
Figura 2.21 Historia térmica de dos puntos (nodo 601: sobre el cordón de soldadura, nodo 2022: sobre el extremo lateral izquierdo del metal base) en una sección transversal de la junta soldada [34].	44
Figura 2.22 Simulación del ciclo térmico de soldadura tridimensional [35]. .	47
Figura 2.23 Simulación del ciclo térmico de soldadura (2D) [35].	48
Figura 2.24 Comparación de resultados experimentales y numéricos [35]..	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Soldabilidad de los aceros inoxidables [4].	11
Tabla 2.2 Clasificación de los aceros según la AISI [5].	12
Tabla 2.3 Clasificación de los AHSS [5]......	13
Tabla 2.4 Composición química del acero Dillidur 400V [34]......	39
Tabla 2.5 Parámetros de soldadura y material [34].	39
Tabla 2.6 Esquema de la distribución de hojas de cálculo [35].	45
Tabla 2.7 Parámetros de simulación de soldadura de acero inoxidable AISI 304 [35]......	47
Tabla 3.1 Principales programas de simulación.	52

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Nombre	Martha Evangelina Pérez Mauricio
Grado a obtener	Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial
Título de monografía	Estudio de las herramientas de simulación para análisis térmicos en soldaduras de aceros inoxidable y AHSS empleados en la industria automotriz
Títulos obtenidos	Ingeniera en Materiales Instituto Tecnológico de Saltillo 2009-2013
Experiencia profesional	Prácticas profesionales COMIMSA, colaboración en el trabajo de investigación “Estudio del comportamiento térmico en soldaduras de aceros inoxidable y AHSS empleados en la industria automotriz”. Agosto 2013 - Enero 2014
Lugar y fecha de nacimiento	Saltillo, Coahuila; 27 de Noviembre de 1991