

SIMULACIÓN MATEMÁTICA DE LAS TRANSFORMACIONES DE FASE EN LA  
ZONA AFECTADA POR EL CALOR EN UN PROCESO DE SOLDADURA SMAW  
EN UN ACERO AISI SAE 1040

DAYMIS ALFREDO RINCÓN RODRÍGUEZ  
ERIC DUVAN MENESES MARTINEZ

UNIVERSIDAD LIBRE DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BOGOTÁ D.C.  
2016

SIMULACIÓN MATEMÁTICA DE LAS TRANSFORMACIONES DE FASE EN LA  
ZONA AFECTADA POR EL CALOR EN UN PROCESO DE SOLDADURA SMAW  
EN UN ACERO AISI SAE 1040

DAYMIS ALFREDO RINCÓN RODRÍGUEZ  
ERIC DUVAN MENESES MARTINEZ

PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR  
POR EL TÍTULO DE INGENIEROS MECÁNICOS

Director:  
Ingeniero Bohórquez Ávila Carlos Arturo

UNIVERSIDAD LIBRE DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BOGOTÁ D.C.  
2016

Nota de Aceptación

---

---

---

---

---

---

---

Presidente del Jurado

---

Jurado

---

Jurado

Bogotá D.C. 05 de septiembre de 2016

Dedicamos este trabajo de grado a nuestros padres por darnos todo su apoyo, tanto emocional como económico, para hacer posible este sueño de obtener un título profesional en una universidad de calidad, buscando siempre lo mejor para nuestra vida y nuestro futuro; por esforzarse todos los días para que tuviéramos a nuestra disposición, durante toda la carrera, los recursos materiales necesarios para llevar un óptimo proceso de aprendizaje. Además, por todas sus enseñanzas y lecciones personales, para tener en cuenta en nuestras vidas, que nos permiten ser unos seres humanos éticos, morales y llenos de valores, dispuestos a estar orientados por el camino más honrado.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los docentes que, con todos sus conocimientos, nos permitieron tener un gran crecimiento intelectual, ético y profesional durante estos años de formación. Además, por toda su entrega, convicción y paciencia, para transmitir su sabiduría de manera eficaz, garantizando siempre, con su exigencia, que nuestro perfil profesional fuera el mejor y de más alto nivel.

Adicionalmente, queremos agradecer a todos aquellos que de manera directa o indirecta nos aportaron para hacer posible el presente documento, ya que, sin una adecuada orientación nos hubiera sido imposible lograr un adecuado desarrollo del mismo.

## CONTENIDO

	pág.
GLOSARIO.....	12
RESUMEN .....	14
1. TITULO .....	15
2. INTRODUCCIÓN .....	16
3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	17
3.1. ANTECEDENTES DE PROBLEMA.....	17
3.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	18
3.3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	18
4. JUSTIFICACIÓN .....	19
5. OBJETIVOS .....	20
5.1. OBJETIVO GENERAL .....	20
5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
6. MARCO REFERENCIAL.....	21
6.1. MARCO TEÓRICO .....	21

6.2. ESTADO DEL ARTE.....	36
7. DISEÑO METODOLÓGICO.....	44
7.1. MATERIALES .....	44
7.2. METODOLOGÍA .....	45
7.2.1. Tipo de investigación. ....	45
7.2.2. Universo y muestra. ....	45
7.2.3. Método, técnicas e instrumentos de investigación. ....	46
7.2.4. Procedimiento.....	46
8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	48
8.1. ANÁLISIS Y DESARROLLO DEL PROYECTO.....	48
8.2. DESARROLLO DEL MODELO MATEMÁTICO DE TRANSFERENCIA DE CALOR .....	50
8.3. RESULTADOS OBTENIDOS.....	59
8.4. COMPARACIÓN ENTRE EL MODELO MATEMÁTICO Y LA SIMULACIÓN POR MEDIO DE ANSYS MECHANICAL APDL.....	66
9. CONCLUSIONES .....	69
BIBLIOGRAFÍA .....	71

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1; Propiedades de material aplicadas al modelo matemático introducido en MATLAB®	44
Tabla 2. Dimensiones de la placa	44
Tabla 3. Puntos en coordenadas rectangulares para análisis gráfico	48
Tabla 4. Datos de tiempo necesarios para el análisis transitorio en ANSYS.	59
Tabla 5. Posición y referencia de los puntos graficados para la solución en MATLAB	60
Tabla 6. Posición y referencia de los puntos graficados para la solución en MATLAB	63
Tabla 7. Valores obtenidos para el coeficiente de Avrami y el exponente de Avrami.	65
Tabla 8. Velocidad de enfriamiento, Comparación entre modelos ANSYS y MATLAB	67
Tabla 9. Parámetro de enfriamiento para ANSYS y MATLAB	67
Tabla 10. Datos para regresión estadística.	67
Tabla 11 Durezas resultantes en el material, obtenidas del modelo matemático y la simulación, según diagrama CCT.	68



## LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1 Curvas de enfriamiento MATLAB _____	61
Gráfica 2. Curvas de enfriamiento ANSYS Mechanical APD _____	64
Gráfica 3. Graficas TEMP23 y TEMP_23 para análisis y comparación. _____	66

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Diagrama CCT para un acero 1045, con temperatura de austenización de 850°C.	23
Figura 2. Diagrama de equilibrio Fe-C hasta 7% de carbón. Las líneas solidas indican el diagrama Fe-Fe <sub>3</sub> C; líneas punteadas indican diagrama Fe-graphite.	24
Figura 3. Esquema de Sub-Zonas que se pueden formar en la zona afectada por el calor de un acero al carbón con un contenido de 0.15%	26
Figura 4 Elemento de volumen de un nodo interior general (m, n) para conducción bidimensional en régimen transitorio, en coordenadas rectangulares.	29
Figura 5 Distribución de temperaturas alrededor del cordón de soldadura.	34
Figura 6 Cordón de soldadura a tope.	45
Figura 7. Representación gráfica de los puntos de análisis para el modelo matemático y la simulación	49
Figura 8. Datos introducidos para el modelo matematico de tranferencia de calor	52
Figura 9. Modelos matemático aplicado a la placa base del proceso de soldadura.	53
Figura 10. Matriz de nodos para toma de datos.	54
Figura 11. Matriz para toma de datos y Graficas en MATLAB	55
Figura 12. Modelo geométrico en ANSYS® Mechanical APDL	56
Figura 13. Elemento PLANE55 Librería ANSYS®	57
Figura 14. Enmallado Placa ANSYS Mechanical APDL	58
Figura 15. Refinado N°1 del enmallado de la placa ANSYS Mechanical APDL	58

Figura 16. Refinado N°2 del enmallado de la placa ANSYS Mechanical APDL	59
Figura 17. Distribución de temperaturas en el material base luego de 10 segundos	60
Figura 18. Vista completa de la distribución de temperaturas en la solución en ANSYS Mechanical APDL para un tiempo de 0.1 Seg	62
Figura 19. Vista parcial de la distribución de temperaturas en la solución en ANSYS Mechanical APDL para un tiempo de 0.1 Seg	62
Figura 20. Vista parcial del flujo de calor para un tiempo de 0.1 s.	63

## GLOSARIO

**ACERO HIPOEUTECTOIDE:** Es un acero el cual tiene menos de 0,8 % de carbono.<sup>1</sup>

**ACEROS:** se definen principalmente por su composición química, el carbono es un elemento de aleación esencial, por lo que el acero puede ser definido como una aleación de hierro y pequeñas cantidades de carbono y otros elementos. Los aceros al carbono son tradicionalmente definidos por el contenido de carbono.<sup>1</sup>

**AUSTENITA:** esta se puede apreciar en la figura 2, esta comprende el campo entre los 900 y 1400 °C además de un máximo contenido de carbono de 2,08% en masa.<sup>1</sup>

**BAINITA:** es un constituyente de doble fase que contiene ferita y cementita.<sup>2</sup>

**Baño de soldadura:** depósito de material fundido constituido principalmente por material de aporte, producto de la energía adicionada durante el paso del electrodo.<sup>1</sup>

**DISTORSIÓN:** Este fenómeno se refiere a la deformación producida en la junta respecto a un eje original, debido a un encogimiento por solidificación y una contracción térmica del metal soldado durante el proceso. Esta distorsión se puede presentar de tres maneras; una de las formas de presentarse distorsión es de manera transversal al cordón de soldadura, lo que produce una disminución en la distancia medida perpendicularmente desde algún punto de la junta hasta un extremo del metal base luego de realizada la soldadura, la segunda posible distorsión que se presenta es longitudinal al cordón, lo que implica que al realizar la medición de la longitud del cordón y compararla con una distancia, medida paralelamente al cordón, de extremo a extremo de la placa se va a obtener una longitud menor del cordón de inicio a fin, respecto a la longitud de la placa original, y como tercer fenómeno se presenta un encogimiento angular hacia arriba, el cual suele ocurrir cuando se aplica únicamente el cordón de soldadura en la superficie de la(s) placa(s) o cuando se realiza un bisel en "v" en placas con espesores aproximadamente mayores a los 25 o 30mm.<sup>3</sup>

**RÉGIMEN TRANSITORIO:** Se presenta en general cuando la temperatura de cuerpo varía con el tiempo, así como con la posición.<sup>4</sup>

---

<sup>1</sup> KRAUSS, George. Steeld: Processing, Struture, and performance. 2005.

<sup>2</sup> ADAMS, Brent L, et al. ASM Metals Handbook. ASM internacional, 2004.

<sup>3</sup> KOU, Sindo. "Welding metallurgy." Wiley-Interscience, 2003.

<sup>4</sup> CENGEL, Yunus A. Transferencia de calor y masa. 3 ed. México D.F.: McGraw-Hill Interamericana Editores, 2007. p. 217.

FASE: material que tiene la misma composición, estructura y propiedades en todos los sitios bajo condiciones de equilibrio.<sup>5</sup>

FERRITA: es una estructura cristalina del hierro y su característica es su cristal BCC.<sup>6</sup>

METALOGRAFÍA: es la disciplina científica que permite examinar y determinar la constitución y la estructura de los componentes de metales, aleaciones y materiales.<sup>7</sup>

NUCLEACIÓN HETEROGÉNEA: se basa en que el desarrollo de la estructura del grano se produce en una familia de sustratos de la química diferente a la del sólido. La nucleación heterogénea se produce cuando las partículas de sustrato se introducen deliberadamente en una masa fundida para promover la formación de grano equiaxial.<sup>8</sup>

NUCLEACIÓN: para la soldadura es la estabilización e inicio de la solidificación de un material fundido continuando con la producción planar, celular, dendrítica o equiaxial de granos para finalizar con una solidificación completa del material. Para el proyecto es importante tener en cuenta y clasificar los tipos de núcleos que se pueden obtener en la masa fundida, lo cual resulta de una nucleación homogénea y la nucleación heterogénea.<sup>8</sup>

PUNTO EUTECTOIDE: es un tipo de reacción en la cual el acero pasa de líquido a sólido (cementita) si pasar por fases intermedias.<sup>7</sup>

SOLIDIFICACIÓN: es considerada como la transformación de la materia en estado líquido en materia en estado sólido. La microestructura que se obtiene después de completada la solidificación puede ser la final para el material, por lo cual se presenta el caso que esta afecta directamente a las propiedades mecánicas del material terminado.<sup>8</sup>

---

<sup>5</sup> ASKELAND, Donald R. Ciencia e ingeniería de los materiales. International Thomson Editores, 1998.

<sup>6</sup> KRAUSS, George. Steeld: Processing, Struture, and performance. 2005.

<sup>7</sup> ADAMS, Brent L, et al. ASM Metals Handbook. ASM internacional, 2004.

<sup>8</sup> MENEZES N., Rafael, et al. ASM handbook. Vol. 6. ASM International, 1993.

## RESUMEN

El presente documento se realizó con el fin de exponer resultados obtenidos por medio de la investigación realizada, basada en el modelado matemático y simulación de un proceso de soldadura con el fin de conocer los cambios microestructurales de la zona afectada por el calor de un acero AISI SAE 1040 por medio del proceso de arco manual con electrodo revestido (SMAW), analizando velocidades de enfriamiento, obtenidas a través del modelo realizado en el software MATLAB® y de la simulación realizada en el software ANSYS®, y las transformaciones de fase en el metal base, evaluadas con la ayuda de los diagramas CCT propios del material. El modelo matemático se basó en el uso del método de las diferencias finitas, usando las ecuaciones diferenciales parciales de transferencia de calor aplicables para el régimen transitorio. La simulación de la junta se llevó a cabo con el fin de comparar los resultados obtenidos del modelo matemático y establecer los índices de variabilidad presentes en el mismo.

**PALABRAS CLAVE:** Diagramas CCT, Transferencia de calor, régimen transitorio, velocidad de enfriamiento.

## 1. TITULO

Simulación matemática de las transformaciones de fase en la zona afectada por el calor en un proceso de soldadura SMAW en un acero AISI/SAE 1040

## 2. INTRODUCCIÓN

La soldadura SMAW es un proceso de unión implementado en metales, caracterizado por la creación y mantenimiento de un arco eléctrico entre un electrodo revestido y las piezas a soldar, este proceso es ampliamente utilizado en fabricación, reparación y mantenimiento a nivel industrial debido al alcance, la economía y simplicidad del mismo. La implementación de cualquier proceso de soldadura produce alteraciones micro-estructurales en la zona afectada por el calor (ZAC), estas son consecuencia de los cambios de fase y tiempos de enfriamiento utilizados para el material, de tal forma el material puede requerir un precalentamiento previo al proceso o un tratamiento térmico posterior del proceso de soldadura. Los cambios indeseables en la microestructura del material en la ZAC son perjudiciales para las propiedades finales del material además de generar pequeñas fallas que se propagarán hasta una falla total del material, estas fallas no previstas como las de cualquier componente mecánico perjudican los índices de disponibilidad del equipo y genera un sobrecosto en el mismo, además de todos los percances que puede generar dentro de un proceso de producción.

Durante el proceso de soldadura se presentan procesos físicos y químicos de gran importancia para las propiedades finales de la junta soldada. El proceso de transferencia de calor para la soldadura influye en las características mecánicas más importantes del material como dureza y tenacidad de la zona afectada por el calor, por esta razón el proceso de transferencia de calor en la zona afectada por el calor, es el principal objeto de estudio para este proyecto.

El proceso de transferencia de calor se describe por medio de ecuaciones matemáticas, para el desarrollo de estas ecuaciones se implementó un modelo matemático basado en un método elementos finitos conocido como diferencias finitas, por medio del cual se obtienen las gráficas correspondientes a la velocidad de enfriamiento durante la aplicación de soldadura; los datos obtenidos referentes a la velocidad de enfriamiento son implementados para prevenir y controlar la formación de microestructuras peligrosas en la zona afectada por el calor, buscando la garantía e integridad de la junta.



### 3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

#### 3.1. ANTECEDENTES DE PROBLEMA

La soldadura SMAW como proceso de unión implementado en metales y caracterizado por la creación y mantenimiento de un arco eléctrico entre un electrodo y la pieza a soldar, produce alteraciones micro-estructurales en la zona afectada por el calor (ZAC), estas son consecuencia de propiedades como la soldabilidad del material, la composición química del acero y el proceso de transferencia de calor, y parámetros físicos de proceso como el precalentamiento y tiempos de enfriamiento utilizados para el material, de tal forma que este puede requerir un tratamiento térmico posterior al proceso. Los cambios indeseables en la microestructura del material en la ZAC son perjudiciales para las propiedades finales del material, además de generar pequeñas fallas que se propagarán hasta una falla total del mismo.

Los elementos finitos como técnica de análisis térmico en un proceso de soldadura han sido implementados por medio de software especializado y con modelos matemáticos de gran alcance y complejidad; dentro de estos se han desarrollado estudios relacionados con simulación de soldaduras, en uno de ellos se obtuvieron dos programas de elementos finitos con los que realizó la simulación del proceso de soldadura para una tubería sometida a presión, allí se utilizó en primera instancia un modelo de 2D para facilitar la aproximación de resultados y luego uno en 3D más complejo y completo para encontrar un comportamiento térmico en la junta al realizar varias pasadas del cordón de soldadura; de donde se obtuvieron datos con exactitudes muy buenas, presentándose errores del orden del 5-8%. Se desarrolla también un programa de elementos finitos para analizar las tensiones residuales obtenidas en una tubería de un gaseoducto luego de ser soldado con el fin de encontrar los principales defectos en dicha junta y por los cuales podría fallar la unión soldada; se afirma que los resultados de la distribución de temperaturas en la junta, proporcionados por el modelo computacional coinciden altamente con los resultados obtenidos por medio de mediciones con termocuplas; dichos datos experimentales fueron obtenidos previamente como una base de análisis. Por los anteriores resultados dados a conocer y los de otras investigaciones, se puede dar una razón más para aplicar los modelos matemáticos de elementos finitos, como una herramienta para las empresas que utilizan dichos procesos de soldadura y mejorar el desempeño de las juntas en servicio.

### 3.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Evidenciando la utilidad de los elementos finitos, la industria ha desarrollado software y sistemas informáticos con grandes capacidades de análisis de datos, pero con altos costos y con necesidad de personal especializado para el manejo e implementación de dichas herramientas, reduciendo la utilización de los métodos numéricos a una población especializada en análisis por medio de software como ANSYS Mechanical APDL.

### 3.3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Las diferencias finitas como método de análisis numérico han sido llevadas a la industria durante décadas con la finalidad de resolver modelos matemáticos de baja complejidad; estos son capaces de describir procesos físicos y reducir costos en la implementación de software especializados en análisis numéricos. Los elementos finitos se basan en la definición de un dominio, un contorno y un conjunto de variables asociadas al proceso, el dominio como elemento base es dividido en pequeños elementos interconectados y regidos por un sistema de ecuaciones diferenciales que permiten el modelado y análisis del sistema, un aspecto muy importante es la cantidad de elementos necesarios para suplir una necesidad de precisión contra datos experimentales, una mayor cantidad de elementos relacionados permite un análisis con mayor precisión, por el contrario al tener una cantidad menor de elementos, se reduce la precisión del modelo aplicado, de igual forma los recursos utilizados por un sistema de mayor precisión son muy superiores a los implementados por un sistema de menor precisión.

Analizando el proceso de soldadura y su nivel de complejidad se puede apreciar que es posible analizar el comportamiento térmico y sus transformaciones de fase por medio de diferencias finitas.

#### 4. JUSTIFICACIÓN

En la industria se ha encontrado evidencia de la gran necesidad de mejorar los métodos de análisis relacionados con el control de calidad, en los procesos de fabricación, por medio de la creación de programas o análisis computarizados. Los análisis por elementos finitos son una técnica bastante eficiente que nos permite obtener datos muy precisos; habiéndose realizado previamente, por distintos autores, estudios sobre los esfuerzos residuales producidos en la zona afectada por el calor, además de otros tantos relacionados, y enfocados a una aplicación específica (gaseoductos, tubos, etc.).

La industria siempre está en búsqueda de un proceso simple y económico que permita conocer las propiedades metalúrgicas de las juntas soldadas con la finalidad de optimizar el proceso y garantizar la calidad para su puesta en servicio y cumplir con la vida útil nominal. Por lo tanto, se propone realizar un modelo matemático y una simulación por medio de elementos finitos que permita el análisis de las propiedades metalúrgicas obtenidas en una junta de acero AISI/SAE 1040 luego de aplicarse un cordón de soldadura a dos placas dispuestas a tope por medio del proceso SMAW, de manera que se logre obtener datos detallados y precisos de los perfiles de dureza relacionados a los cambios térmicos y de fase en la ZAC. Para lograr la obtención de datos, tanto con la simulación, como con el modelo matemático, se representará el material base y el cordón de soldadura, por medio de un modelo geométrico digital similar al real y con las respectivas condiciones de contorno, asociadas al proceso. Así mismo, busca la obtención de datos aproximados a los reales, que puedan ser confiables para determinar cuáles han sido las alteraciones micro-estructurales y perfiles de durezas de la zona afectada por el calor. Basándose en los datos obtenidos, se determina si la junta cumple con las propiedades esperadas después de la soldadura o, por el contrario, si es necesario realizar tratamientos térmicos para corregir problemas generados o mejorar las propiedades.

## 5. OBJETIVOS

### 5.1. OBJETIVO GENERAL

Implementar un modelo matemático para la obtención de las transformaciones de fase en el acero AISI-SAE 1040 en la zona afectada por el calor en un proceso SMAW.

### 5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

5.2.1. Analizar cómo afectan los parámetros del proceso de soldadura como: amperaje, voltaje, polaridad, espesor del material; las dimensiones de la zona afectada por el calor.

5.2.2. Desarrollar por medio de elementos finitos un modelo matemático de la transferencia de calor, para determinar la zona afectada por el calor ZAC.

5.2.3. Aplicar un modelo matemático del proceso de transferencia de calor durante un proceso de soldadura de una placa de  $\frac{1}{4}$ " de un acero AISI-SAE 1040 y determinar cuáles son las transformaciones de fase que ocurren en la ZAC.

5.2.4. Determinar los valores de dureza de acuerdo a la regla de las fases para el modelo matemático aplicado.

## 6. MARCO REFERENCIAL

### 6.1. MARCO TEÓRICO

#### Soldadura

Es un proceso de fabricación por el cual se produce la unión de materiales por medio de la fusión de las piezas de trabajo junto con el material de aporte, durante el proceso se genera un baño de material de aporte que luego de enfriarse produce una unión fuerte de las piezas de trabajo. Durante el proceso de soldadura por fusión se ocasionan fuertes cambios térmicos producidos por la fuente de calor la cual se encuentra en movimiento, además es importante definir la intensidad de energía dada por la corriente que se aporta para la producción del baño de soldadura, esta intensidad se puede determinar por medio de la geometría de la junta y características del material. Una vez terminado el proceso el producto final puede tener discontinuidades físicas originadas por enfriamientos inadecuados además de microestructuras desfavorables.<sup>9</sup>

Soldadura por arco manual, shielded metal arc welding (SMAW).

Es un proceso de soldadura manual por el cual un arco eléctrico es generado entre un electrodo de recubrimiento consumible y la pieza de trabajo. El proceso se basa en la descomposición del recubrimiento consumible para generar un gas protector que se encarga de no permitir niveles inadecuados de oxígeno e hidrógeno que pueden afectar el cordón de soldadura y para proveer el flujo de elementos para proteger las gotas de metal de soldadura fundido y el baño de soldadura. El metal fundido y el baño de soldadura son producto de la alta temperatura producida por el arco y el flujo de energía que es lo que permite que el material sea fundido y logre una adherencia adecuada, produciendo una junta fuerte y satisfactoria.<sup>10</sup>

Es importante resaltar que el arco se inicia con un leve roce entre el electrodo y la pieza de trabajo, el arco resultante es el encargado de aportar la energía para fundir tanto el metal base como el extremo en contacto más cercano del electrodo.

---

<sup>9</sup> THOMAS W., Eagar. «Fundamental of welding.» En Welding, Brazing, and soldering, de ASM internacional, 15-82. 2004.

<sup>10</sup> MENEZES N., Rafael, et al. ASM handbook. Vol. 6. ASM International, 1993.

Después de que el arco es formado por el rose momentáneo se produce el baño de metal fundido el cual es protegido durante la solidificación por la escoria que se produce, está por su menor densidad sobresale del baño para ser retirada una vez termine la aplicación del cordón de soldadura o para la aplicación de un cordón posterior.<sup>11</sup>

## Microestructura

La microestructura de un material se refiere al tamaño y la disposición de los cristales, también relacionada con la cantidad y la distribución de impurezas en el material, esta microestructura presenta tamaños muy pequeños que dan medida de micras, también permite conocer las propiedades de los materiales. Es importante examinar y caracterizar la microestructura de la soldadura con el fin de definir su formación granular y los efectos que trae esta formación de granos sobre las propiedades del material de la junta.

La microestructura de una soldadura se compone de tres regiones: una zona de fusión (material que ha sido fundido); una zona afectada por el calor (material que no se funde, pero cuya microestructura ha sido alterada), y el metal base. Las microestructuras de soldadura son examinadas usando la extracción de muestras estándar y técnicas de preparación, con algunas concesiones hechas por su naturaleza no homogénea. Del mismo modo, los parámetros utilizados para caracterizar las microestructuras de soldadura, tales como tamaño de grano, la morfología de grano, y la cantidad de las diversas fases o micro elementos presentes, son los que se utilizan para caracterizar el material. Dependiendo de la composición, los aceros de baja aleación pueden tener diversas microestructuras que consisten en diferentes formas y combinaciones de perlita, bainita, martensita, cementita, y ferrita.<sup>12</sup>

## Transformaciones de fase

Durante la transición de estado líquido a estado sólido del acero se producen los cristales, esta transición mencionada es conocida como cristalización y el mecanismo por el cual el proceso es llevado a cabo define la microestructura del producto final. Una transformación de fase, se conoce como el cambio de líquido a

---

<sup>11</sup> MENEZES N., Rafael, et al. ASM handbook. Vol. 6. ASM International, 1993.

<sup>12</sup> ADAMS, Brent L., et al. ASM Metals Handbook. ASM internacional, 2004.

sólido se produce por el mecanismo de nucleación de pequeños cristales en el líquido, que luego aumentan su tamaño mediante la adición de más material.<sup>13</sup>

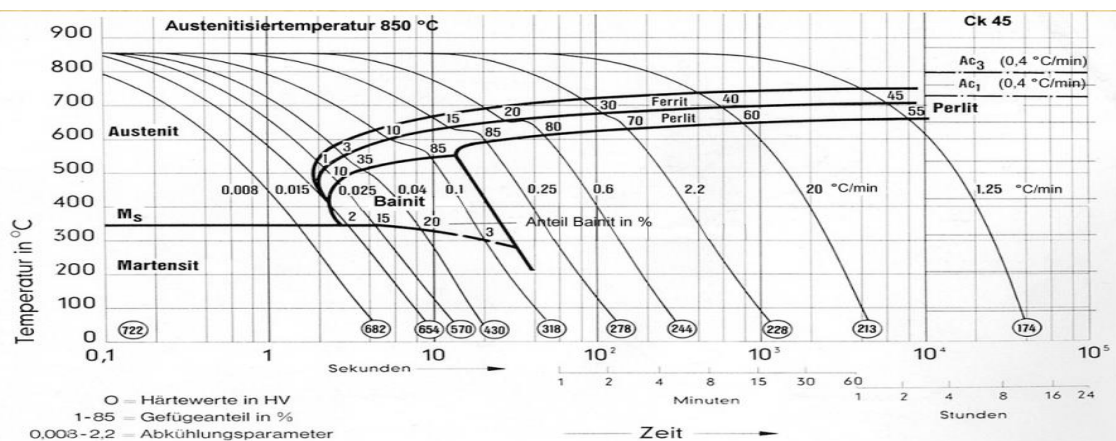
## Diagramas de fase

Con el fin de registrar y visualizar los resultados del estudio de los efectos de las variables de estado en un sistema, se han diseñado los diagramas de fase como medio para mostrar las relaciones entre las diferentes fases que aparecen en el sistema teniendo en cuenta condiciones de equilibrio. La mayoría de los diagramas son de dos o tres sustancias y en los gráficos mencionados se describen las relaciones de fase de estos sistemas dados por dos o más componentes, y estos por lo general contienen campos que presentan una fase mixta, así como campos de una sola fase, mediante este se muestran los cambios de fase en la sustancia, como consecuencia de la temperatura y / o cambios de presión.<sup>14</sup>

## Diagrama CCT

El diagrama CCT corresponde a la representación gráfica de las velocidades de enfriamiento teniendo en cuenta las fases que corresponden al material.

Figura 1. Diagrama CCT para un acero 1045, con temperatura de austenización de 850°C.



Fuente: LIEDTKE, Dieter. Bainitisieren Kontinuierliches oder isothermisches Umwandeln in der Bainitstufe. 2014.

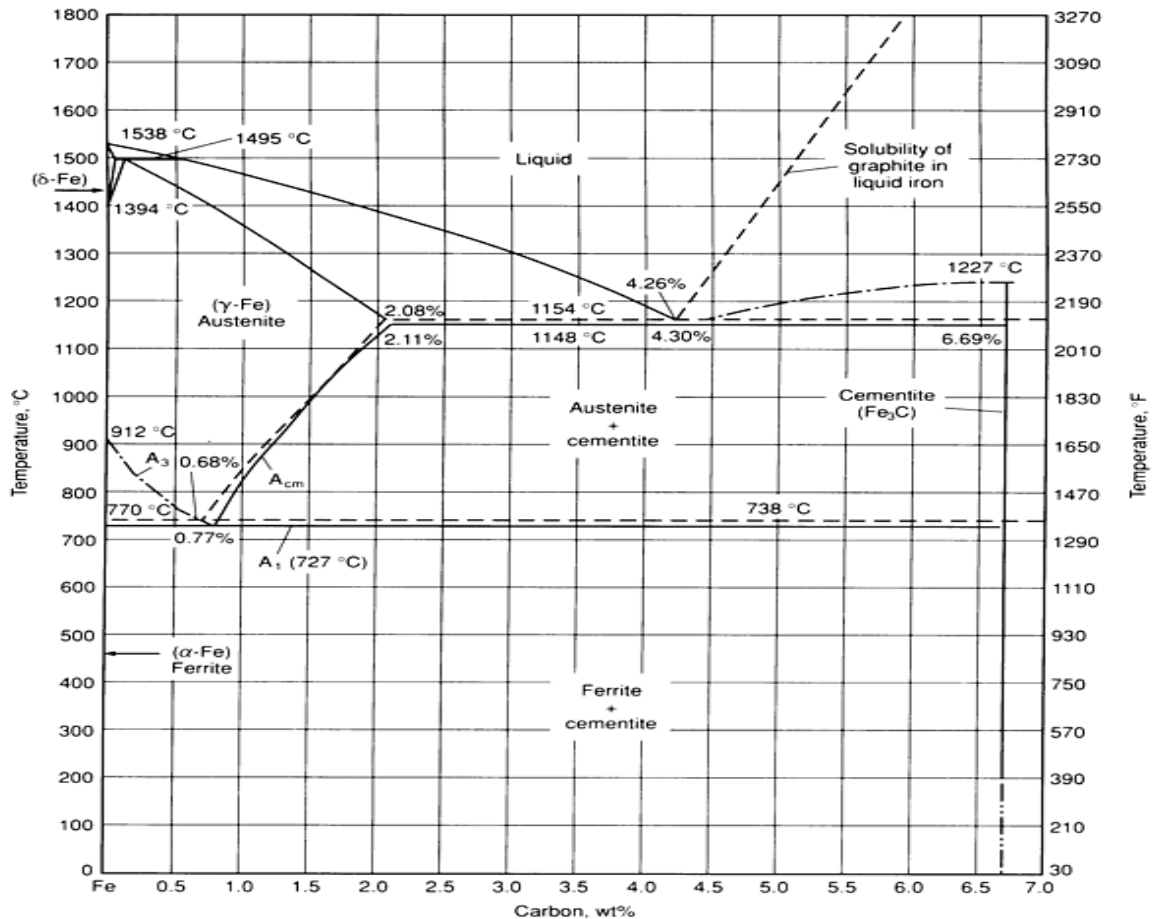
<sup>13</sup> ADAMS, Brent L, et al. ASM Metals Handbook. ASM internacional, 2004.

<sup>14</sup> KRAUSS, George. Steeld: Processing, Struture, and performance. 2005.

## Diagrama hierro-carbono (FE-C)

El diagrama hierro-carbono (Figura 2) presenta las fases, y las transformaciones que tienen los aceros como consecuencia de los cambios de temperatura, este debe ser considerado solamente una guía. El conocimiento de los cambios que tienen lugar en un acero, y como y cuando se alcanza el equilibrio en una fase dada, o los resultados de las transformaciones de fase, proporciona la base científica para el tratamiento térmico de los aceros y para el estudio adecuado de las transformaciones de fase en función del tiempo.<sup>15</sup>

Figura 2. Diagrama de equilibrio Fe-C hasta 7% de carbón. Las líneas solidas indican el diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C; líneas punteadas indican diagrama Fe-graphite.



Fuente: TORSTEN, Ericsson. "Principle of heat treating of Steels." In ASM Handbook Heat treating, by Arai., et al. TOHRU. Sweden, 2004.

<sup>15</sup> KRAUSS, George. Steeld: Processing, Struture, and performance. 2005.



## Temperaturas críticas

Estas temperaturas son de gran importancia debido a que definen las fronteras entre los campos de fase del diagrama Fe-C, (estas se pueden apreciar en la Figura 2 ) se identifican temperaturas para las diversas transformaciones de fase que pueden ocurrir en las aleaciones de Fe-C. Las temperaturas críticas de transformación se observan mediante la medición de los cambios en la transferencia de calor o volumen cuando los especímenes se calientan o enfrían. Para el calentamiento, el calor es absorbido y la contracción se produce como muestra de ferrita y cementita que se sustituyen por austenita. Al enfriar, se desprende calor y se produce expansión en el acero y esto se presenta como austenita que se transforma en ferrita y cementita.<sup>16</sup>

Hay tres temperaturas críticas de interés: Temperatura  $A_1$ , que corresponde con el límite entre el campo ferrita cementita y los campos que contienen austenita y ferrita o austenita y cementita; Temperatura  $A_3$  , corresponde al límite entre los campos de la ferrita y los campos de austenita, la temperatura  $A_{cm}$  que corresponde al límite entre los campos de la austenita y cementita – austenita, la temperatura  $Ar_3$  y  $Ar_1$  que corresponden al inicio y final respectivamente de la transformación de austenita en ferrita, estas temperaturas difieren de las temperaturas  $A_1$  y  $A_3$  principalmente por que corresponden al periodo de enfriamiento del material.<sup>17</sup>

Es importante mencionar que las temperaturas críticas son altamente sensibles a la composición y a las tasas de calentamiento y enfriamiento. El calentamiento rápido tiende a aumentar las temperaturas críticas y el enfriamiento rápido tiende a reducir las temperaturas críticas.<sup>18</sup>

Tiempo de enfriamiento  $t_{8-5}$ : El tiempo que emplea el material para bajar su temperatura de 800°C a 500 °C, este es el parámetro más importante para determinar la curva de enfriamiento y posteriormente determinar correctamente los cambios microestructurales ocurridos durante el enfriamiento de un acero.

---

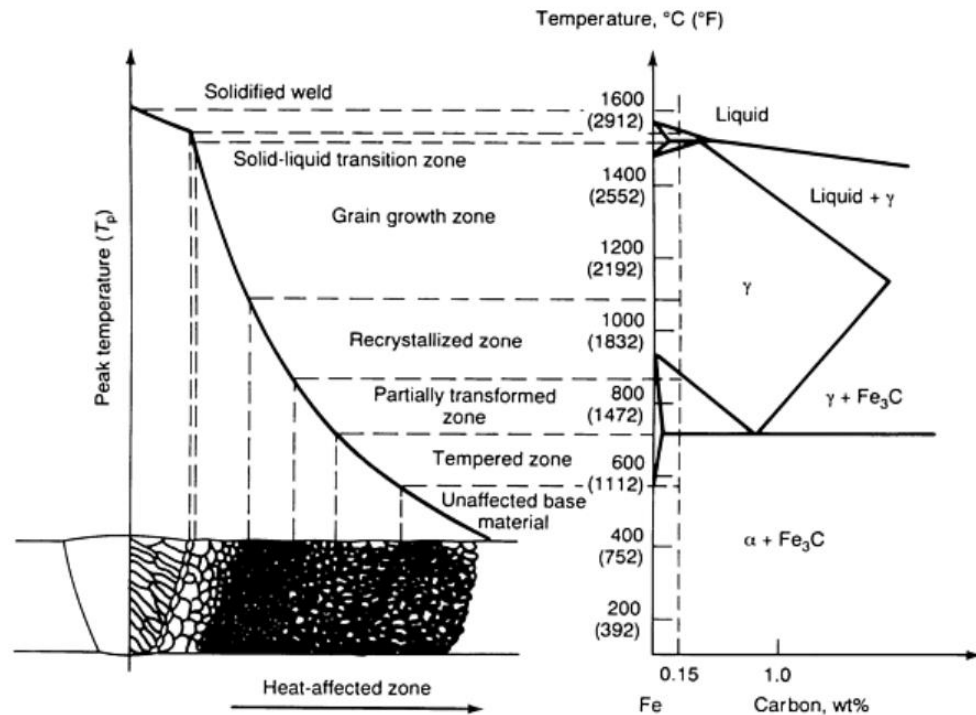
<sup>16</sup> KRAUSS, George. Steeld: Processing, Struture, and performance. 2005.

<sup>17</sup> KRAUSS, George. Steeld: Processing, Struture, and performance. 2005.

<sup>18</sup> KRAUSS, George. Steeld: Processing, Struture, and performance. 2005.

## Zona afectada por el calor (ZAC)

Figura 3. Esquema de Sub-Zonas que se pueden formar en la zona afectada por el calor de un acero al carbón con un contenido de 0.15%



Fuente: VISHNU, P Ravi. "Solid-state transformation in weldments." In *Welding brazing and soldering*, by Rafael, et al. MENEZES NUNES, 177-229. Luleá, 1993.

Como un primer concepto sobre el lugar de ubicación de la ZAC, se establece que es aquella zona donde la temperatura pico es muy baja para causar fundición, pero lo suficientemente alta para provocar cambios altamente significativos en la microestructura, tamaño de grano y propiedades del material.<sup>19</sup>

Durante el proceso de soldadura por fusión, se producen ciertos ciclos térmicos generados por el electrodo que está en constante movimiento y estos causan cambios de estado físico, transformaciones de fase, esfuerzos térmicos transitorios y un movimiento o flujo del material al producirse el baño de la soldadura. Cuando la soldadura está terminada se puede encontrar en la junta discontinuidades físicas producto de una solidificación excesivamente rápida,

<sup>19</sup> KOU, Sindo. *Welding metallurgy*. Wiley-Interscience, 2003.

microestructuras desfavorables debidas a un enfriamiento inapropiado, o esfuerzos residuales y distorsión producidas por la existencia de tensiones residuales.<sup>20</sup>

El movimiento de la fuente de calor o electrodo, es a lo largo de una trayectoria recta, con velocidad constante, y el resultado final, es la formación de un estado térmico transitorio en la soldadura. En algunos puntos luego de iniciar el suministro de calor, pero antes de finalizarlo, la distribución de temperaturas es estacionaria.

El calor que se suministra se va a repartir en dos, una parte va a conducirse a través del material base y la otra parte se va perder, ya sea en el arco o por la convección de la superficie de la placa con el ambiente que lo rodea. Se considera que se van a formar tres zonas metalúrgicas en el metal base luego de finalizarse el ciclo térmico, las cuales serán la zona del cordón de soldadura, la zona afectada por el calor o HEATED-AFFECTED-ZONE (ZAC o HAZ), y la zona del metal base.

La zona afectada por el calor visualizada en la Figura 3 va a estar directamente ligada a la temperatura pico o temperatura máxima alcanzada y la velocidad de enfriamiento que le sigue a dicha aplicación de calor, ya que son los dos factores que van a determinar la estructura de la ZAC; mientras los gradientes térmicos, las velocidades de solidificación y las velocidades de enfriamiento, determinan la estructura a la que va a solidificar la zona del cordón.<sup>21</sup>

#### Transferencia de calor

La transferencia de calor estudia el fenómeno de intercambio de calor entre un cuerpo frio y uno caliente. Cualquier cuerpo que este absorbiendo o perdiendo calor puede tener un cambio de calor sensible, latente o de ambos y este tipo de información es necesario conocerla para tener en cuenta al realizar un análisis. Por lo tanto, se afirma sobre una diversidad de tipos de intercambio de calor, ya que este intercambio no debe ser necesario entre dos cuerpos que estén en contacto, sino también se puede presentar una emisión de energía de un cuerpo a otro ubicados a alguna distancia.<sup>22</sup>

---

<sup>20</sup> MENEZES N., Rafael, et al. ASM handbook. Vol. 6. ASM International, 1993.

<sup>21</sup> MENEZES N., Rafael, et al. ASM handbook. Vol. 6. ASM International, 1993.

<sup>22</sup> KERN, Donald Q. Procesos de transferencia de calor. Compañía editorial continental, S.A. de C.V., 1999.

Se presentan tres maneras diferentes de transferencia de calor, las cuales son conducción, convección y radiación; pero para el presente trabajo se van a tener en cuenta la conducción y la convección únicamente, por lo tanto, solo se va a enfatizar en la descripción de estos dos procesos.<sup>23</sup>

La conducción es la transferencia de calor o de energía evidenciada a través de una sustancia homogénea con dos temperaturas distintas en dos de sus caras opuestas generan un flujo o transferencia de la pared de con mayor temperatura a la pared con menor temperatura, además se afirma que el flujo de calor es directamente proporcional al cambio de temperatura a través del cuerpo y del área de la pared en la que se está aplicando la temperatura. Este flujo de calor va a estar regido por la ecuación (Ecuación 1).

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{Ecuación 1})^{24}$$

Donde  $k$  es la conductividad térmica del material,  $(-\partial T/\partial x)$  es conocido como el gradiente de temperatura que va a estar aplicado en dirección normal al área  $A$ . A la ecuación anterior se le conoce como la Ley de Fourier.<sup>25</sup>

La convección, es la transferencia de calor producida por un fluido que pasa sobre una superficie sólida a una temperatura diferente y este proceso sucede debido al movimiento relativo que hay entre los dos. Este tipo de transferencia está regida por la siguiente ecuación:

$$q = hA \Delta T \quad (\text{Ecuación 2})^{26}$$

Donde  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección,  $A$  es el área de la superficie y el  $\Delta T$  corresponde a la diferencia entre la temperatura del fluido con la de la superficie.<sup>27</sup>

---

<sup>23</sup> KERN, Donald Q. Procesos de transferencia de calor. Compañía editorial continental, S.A. de C.V., 1999.

<sup>24</sup> INCROPERA. F:P. Heat and mass transfer, Seven edition. USA, 2011.

<sup>25</sup> INCROPERA. F:P. Heat and mass transfer, Seven edition. USA, 2011.

<sup>26</sup> INCROPERA. F:P. Heat and mass transfer, Seven edition. USA, 2011.

<sup>27</sup> INCROPERA. F:P. Heat and mass transfer, Seven edition. USA, 2011.

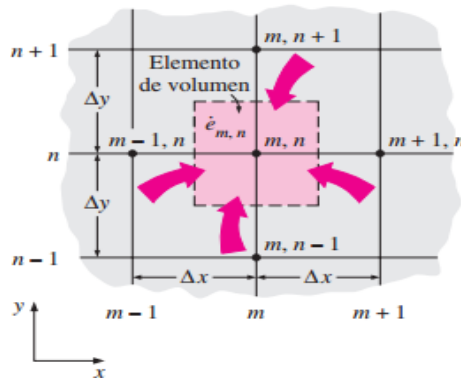
## Conducción y convección bidimensional de calor en régimen transitorio

$$\text{Numero de Biot} = Bi \quad (\text{Ecuación 3})^{28}$$
$$Bi = \frac{h * \Delta x}{k}$$

El número de biot relaciona la transferencia de calor por conducción y por convección con el delta de x. la (Ecuación 3) muestra la ecuación y las variables y contantes relacionadas para este número.

Considerando una región rectangular en la que la conducción de calor es significativa en las direcciones x y y, y considerando una profundidad unitaria de  $\Delta z=1$  en la dirección z. Se puede generar calor en el medio con una velocidad de  $\dot{e}(x, y, t)$ , la cual puede variar con el tiempo y la posición, si se supone que la conductividad térmica k del medio es constante. Dividiendo el plano x-y de la región en una malla rectangular de puntos nodales espaciados con una separación  $\Delta x$  y  $\Delta y$  en las direcciones x y y, respectivamente, y considere un nodo interior general (m, n) cuyas coordenadas son  $x= m \Delta x$  y  $y= n \Delta y$ , como se muestra en la figura 4.<sup>29</sup>

Figura 4 Elemento de volumen de un nodo interior general (m, n) para conducción bidimensional en régimen transitorio, en coordenadas rectangulares.



Fuente: CENGEL, Yunus A. Transferencia de calor y masa. México D.F.: McGraw-Hill Interamericana Editores, 2007. Pag. 304

<sup>28</sup> CENGEL, Yunus A. Transferencia de calor y masa. 3 ed. México D.F.: McGraw-Hill Interamericana Editores, 2007. p. 220.

<sup>29</sup> *Ibíd.*, p. 303

Dado que el elemento de volumen centrado en torno del nodo interior general (m, n) comprende conducción de calor desde los cuatro lados (derecho, izquierdo, superior e inferior), y el elemento de volumen es  $V_{elemento} = \Delta x \times \Delta y \times 1 = \Delta x \Delta y$ , la formulación en diferencias finitas en régimen transitorio para un nodo de ese tipo se puede expresar sobre la base de la siguiente ecuación.<sup>30</sup>

$$\begin{aligned}
 & k\Delta y \frac{T_{m-1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} + k\Delta x \frac{T_{m,n+1} - T_{m,n}}{\Delta y} \\
 & + k\Delta y \frac{T_{m+1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} + k\Delta x \frac{T_{m,n-1} - T_{m,n}}{\Delta y} \quad (\text{Ecuación 4})^{31} \\
 & + \dot{e}_{m,n} \Delta x \Delta y = \rho \Delta x \Delta y c_p \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t}
 \end{aligned}$$

Cuando se toma una malla cuadrada ( $\Delta x = \Delta y = l$ ) y se divide cada término entre  $k$  da, después de simplificar,

$$\begin{aligned}
 & T_{m-1,n} + T_{m+1,n} + T_{m,n+1} + T_{m,n-1} - 4T_{m,n} + \frac{\dot{e}_{m,n} l^2}{k} \\
 & = \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\tau} \quad (\text{Ecuación 5})^{32}
 \end{aligned}$$

Donde,  $\alpha = k/\rho c_p$  es la difusividad térmica del material y  $\tau = \alpha t/l^2$  es el número adimensional de Fourier. Esto también se puede expresar en términos de las temperaturas en los nodos vecinos en la siguiente forma, la cual es fácil de recordar.<sup>33</sup>

$$\begin{aligned}
 & T_{izquierda} + T_{superior} + T_{derecha} + T_{inferior} - 4T_{nodo} \\
 & + \frac{\dot{e}_{nodo} l^2}{k} = \frac{T_{nodo}^{i+1} - T_{nodo}^i}{\tau} \quad (\text{Ecuación 6})^{34}
 \end{aligned}$$

De nuevo, el primer miembro de esta ecuación es simplemente la formulación en diferencias finitas para el caso de estado estacionario, como era de esperarse.

<sup>30</sup> CENGEL, Yunus A. *Transferencia de calor y masa*. 3 ed. México D.F.: McGraw-Hill Interamericana Editores, 2007. p. 304.

<sup>31</sup> *Ibíd.*, p. 304.

<sup>32</sup> *Ibíd.*, p. 304.

<sup>33</sup> *Ibíd.*, p. 304.

<sup>34</sup> *Ibíd.*, p. 304.

Asimismo, todavía no se ha presentado la formulación explícita o implícita, puesto que no se indicó el intervalo de tiempo en el primer miembro de la ecuación. Ahora se obtiene la formulación explícita en diferencias finitas al expresar el primer miembro en el paso  $i$  de tiempo como.<sup>35</sup>

$$T_{izquierda}^i + T_{superior}^i + T_{derecha}^i + T_{inferior}^i - 4T_{nodo}^i + \frac{\dot{e}_{nodo}^i l^2}{k} = \frac{T_{nodo}^{i+1} - T_{nodo}^i}{\tau} \quad (\text{Ecuación 7})^{36}$$

Si se expresa el primer miembro en el intervalo de tiempo  $i=1$  en lugar del  $i$ , daría la formulación implícita. Esta ecuación se puede resolver explícitamente para la nueva temperatura  $T_{nodo}^{i+1}$ , para dar

$$T_{nodo}^{i+1} = \tau(T_{izquierda}^i + T_{superior}^i + T_{derecha}^i + T_{inferior}^i) + (1 - 4\tau) T_{nodo}^i + \tau \frac{\dot{e}_{nodo}^i l^2}{k} \quad (\text{Ecuación 8})^{37}$$

Para todos los nodos interiores ( $m, n$ ), donde  $m=1, 2, 3, \dots, M-1$  y  $n=1, 2, 3, \dots, N-1$ , en el medio. En el caso de que no haya generación de calor y  $\tau = \frac{1}{4}$ , la formulación explícita en diferencias finitas para un nodo interior general se reduce a  $T_{nodo}^{i+1} = \tau(T_{izquierda}^i + T_{superior}^i + T_{derecha}^i + T_{inferior}^i)/4$ , la cual tiene la interpretación de que la temperatura de un nodo interior en el nuevo intervalo de tiempo es simplemente el promedio de las temperaturas de sus nodos vecinos en el intervalo de tiempo anterior.<sup>38</sup>

El criterio de estabilidad que requiere que el coeficiente de  $T_m^i$  en la expresión  $T_m^{i+1}$  sea mayor o igual a cero para todos los nodos es igualmente válido para los casos bidimensionales o tridimensionales y limita en forma severa el tamaño del intervalo de tiempo  $\Delta t$  que se puede usar con el método explícito. En el caso de transferencia de calor bidimensional en régimen transitorio, en coordenadas

<sup>35</sup> CENGEL, Yunus A. Transferencia de calor y masa. 3 ed. México D.F.: McGraw-Hill Interamericana Editores, 2007. p. 305.

<sup>36</sup> *Ibíd.*, p. 304.

<sup>37</sup> *Ibíd.*, p. 304.

<sup>38</sup> *Ibíd.*, p. 304.

rectangulares, el coeficiente de  $T_m^i$  en la expresión  $T_m^{i+1}$  es  $\tau(1 + Bi) \leq 1/4$  y, por tanto, en este caso el criterio de estabilidad aplicable para todos los nodos de la placa que se desean trabajar corresponde a la (Ecuación 9).

$$\tau(1 + Bi) \leq \frac{1}{4} \quad (\text{Ecuación 9})^{39}$$

$$\tau = \frac{\alpha \Delta t}{l^2} \quad (\text{Ecuación 10})^{40}$$

La (Ecuación 10) define la relación entre la velocidad de la conducción de calor y la velocidad del almacenamiento de energía donde  $\Delta x = \Delta y = l$ . Cuando se conoce la difusividad térmica  $\alpha$  y se especifica el valor del tamaño  $l$  de la malla, se puede determinar el valor más grande admisible del intervalo de tiempo  $\Delta t$  a partir de la relación antes dada y el criterio de estabilidad del modelo en régimen transitorio.

Una vez más, los nodos frontera en los que interviene convección y/o radiación son más restrictivos que los interiores y, por consiguiente, requieren intervalos de tiempo más pequeños. Por lo tanto, debe usarse el nodo fronterero más restrictivo en la determinación del intervalo de tiempo máximo admisible  $\Delta t$  cuando se resuelve un problema en régimen transitorio con el método explícito.<sup>41</sup>

La aplicación de la (Ecuación 10) a cada uno de los  $(M-1) \times (N-1)$  nodos interiores da  $(M-1) \times (N-1)$  ecuaciones. Las ecuaciones restantes se obtienen mediante la aplicación del método de los nodos frontera a menos, por supuesto, que las temperaturas de frontera se especifiquen como constantes.<sup>42</sup>

## Elementos finitos

Una manera de entender los fenómenos y comportamientos que se producen en las cosas que nos rodean, con el fin de estudiarlos, es por medio de un método basado en la separación de dichos sistemas en los componentes individuales, a

---

<sup>39</sup> CENGEL, Yunus A. Transferencia de calor y masa. 3 ed. México D.F.: McGraw-Hill Interamericana Editores, 2007. p. 305.

<sup>40</sup> *Ibíd.*, p. 305.

<sup>41</sup> *Ibíd.*, p. 304.

<sup>42</sup> *Ibíd.*, p. 305.



los que se les denomina elementos, permitiendo realizar un análisis muy sencillo de cada uno de estos y luego utilizarlos para entender el comportamiento de todo el sistema en general.<sup>43</sup>

Al seleccionarse un número finito de elementos, bien escogidos, de todos los posibles que se pueden obtener, permitirá llegar a un modelo con resultados muy similares a los que se podrían obtener empíricamente. Este tipo de problemas se llaman discretos. Una ventaja adicional a este método de análisis de sistemas son los computadores, pues gracias a estos, así hallan un gran número de elementos, la resolución de los problemas va a ser muy sencilla.<sup>44</sup>

### Temperatura máxima en el cordón de soldadura

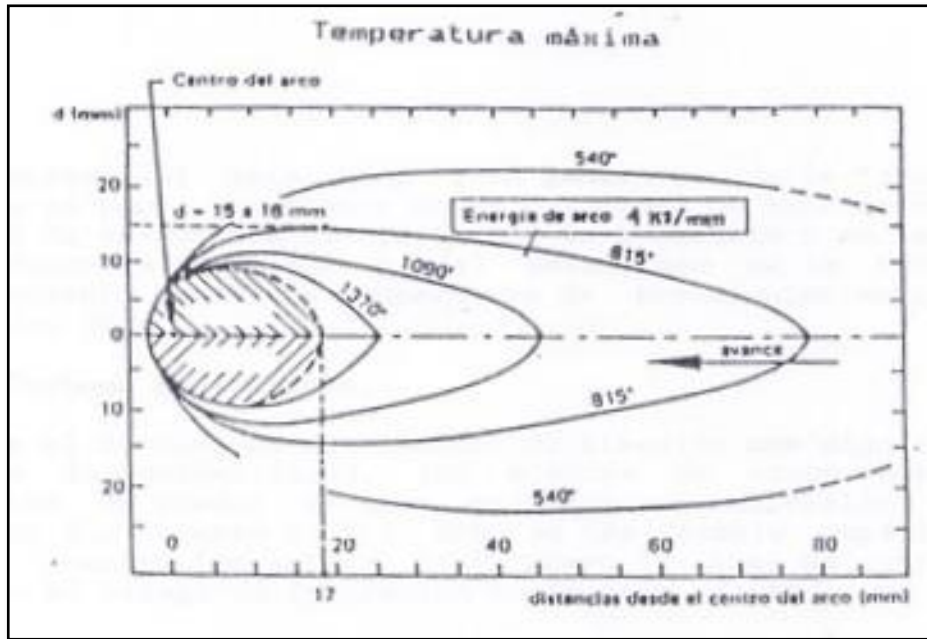
La temperatura máxima en el cordón de soldadura es de gran importancia para el correcto desarrollo del modelado, por lo cual se ha tomado la temperatura máxima a partir una gráfica obtenida experimentalmente. Es importante la veracidad de estos datos por lo cual se consultaron diferentes fuentes la cuales presentan coincidencias con respecto a los datos presentados por la Figura 5.

---

<sup>43</sup> ZIENKIEWICZ, O.C. El método de los elementos finitos. Barcelona: Editorial Reverté, S.A., 1982.

<sup>44</sup> ZIENKIEWICZ, O.C. El método de los elementos finitos. Barcelona: Editorial Reverté, S.A., 1982.

Figura 5 Distribución de temperaturas alrededor del cordón de soldadura.



Fuente: ADAMS, Brent L, et al. ASM Metals Handbook. ASM internacional, 2004.

En la Figura 55 se puede apreciar que la temperatura máxima en los puntos coincidentes del cordón y el material base es de aproximadamente  $1400^\circ\text{C}$ , por lo cual esta fue la temperatura considerada como temperatura pico en los nodos en contacto directo con el cordón de soldadura.

#### Modelado matemático de las transformaciones de fase

En el proceso de modelado de las transformaciones de fase presentadas durante el proceso de soldadura en la zona afectada por el calor, es de gran utilidad la ecuación de JMAK que define el porcentaje del volumen de transformación de una fase en función del tiempo por medio de una ecuación sigmoideal (Ecuación 11), siendo  $n(T)$  el exponente de Avrami (Ecuación 12) y  $b(T)$  el coeficiente de Avrami (Ecuación 13). Para la aplicación de este modelo a un proceso no isotérmico se utiliza la regla de la adición o ley de Scheil, implementando el modelo de Koistinem-Marburger (Ecuación 15). Por medio de esta ecuación, es posible realizar una aproximación de una transformación no isotérmica a múltiples procesos de transformación infinitesimales isotérmicos, donde se podrá emplear la ecuación JMAK.

$$V(t) = 1 - e^{-b(T)t^{n(T)}} \quad \text{(Ecuación 11)}^{45}$$

Exponente de Avrami = n

$$n = \frac{\left( \frac{\ln(1 - v_i)}{\ln(1 - v_f)} \right)}{\ln\left(\frac{t_i}{t_f}\right)} \quad \text{(Ecuación 12)}^{46}$$

Contante Avrami = b

$$b = \frac{\ln(1 - v_i)}{t_i^n} \quad \text{(Ecuación 13)}^{47}$$

tiempo =  $\theta_j$

$$\theta_j = \left( \frac{\ln(1 - V_{i-1}^{j-1})}{b} \right)^{\frac{1}{n}} \quad \text{(Ecuación 14)}^{48}$$

tiempo =  $\theta_j$

$$V_{i-1}^j = 1 - e^{-b(\theta_{j+1} + \Delta t_j)^n} \quad \text{(Ecuación 15)}^{49}$$

---

<sup>45</sup> GIMÉNEZ, María., et al. Simulación de un tratamiento térmico mediante elementos finitos. TRATER Revista del tratamiento térmico, 2013: Pag. 41-50.

<sup>46</sup> *Ibíd.*, p. 41-50.

<sup>47</sup> *Ibíd.*, p. 41-50.

<sup>48</sup> *Ibíd.*, p. 41-50.

<sup>49</sup> *Ibíd.*, p. 41-50.

## 6.2. ESTADO DEL ARTE

Teniendo en cuenta la complejidad de los procesos de soldadura se realizó un estudio en el año 2004 acerca del proceso de soldadura GMAW, éste fue realizado por (SPILLE-KOHOFF, Andreas.) “Simulation Of Gas Metal Arc Welding with CFX-5”. En el cual se tienen en cuenta ciertos fundamentos de simulación para soldadura dado por la gran complejidad física de los procesos, entre estos fundamentos están: las múltiples fases de flujo de metal y gas con superficie libre, la transferencia de calor, el electromagnetismo, la solidificación con su estructura de formación además de otras. También se tienen en cuenta efectos que interfieren en el proceso de soldadura para así poder realizar una correcta simulación, tales como efectos de adherencia, tensión superficial, punto de fusión, efectos electromagnéticos y otros que se deben considerar. A partir de las bases ya mencionadas se desarrollaron los diferentes modelos y con estos se obtuvieron distintos gráficos e imágenes de los procesos de soldadura desarrollados por medio de la simulación, para el proceso de simulación se tuvieron en cuenta condiciones establecidas por la geometría y contorno utilizados. Todas las bases y los desarrollos de ecuaciones aportaron modelos con buenos resultados cuantitativos tales como: modelos de radiación mejorada, Influencia de vapor de metal, influencia de los componentes, de los gases activos y otros que se consideran muy importantes.<sup>50</sup>

Para ver el comportamiento de la temperatura en cualquier metal base al aplicar la soldadura por arco manual, se puede utilizar una simulación computacional desarrollada de forma adecuada, como la realizada en el año 2004 por parte de (ELVIRA, Gustavo y SANZI, Claudio.) “Proceso de reparación de plaqueado sobre una conexión de un recipiente de presión”. Con el fin de efectuar una evaluación de la distribución térmica y analizar el comportamiento térmico en el metal base durante la pasada del cordón de soldadura y teniendo en cuenta la variación de las temperaturas respecto al número de pasadas realizadas, se plantearon dos modelos de elementos finitos en 2D y 3D, el modelo de dos dimensiones fue desarrollado axis-simétricamente para facilitar la obtención de resultados sencillos pero aproximados. El modelo en tres dimensiones no fue realizado en su totalidad debido que era necesaria la asignación de ciertas variables de control que dificultaban alcanzar el modelo adecuado. De esta manera se obtuvo un buen modelo en cuanto a aproximación a resultados reales y a su vez de sencillo en cuanto a su desarrollo como lo es el modelo de dos dimensiones, donde se obtuvo

---

<sup>50</sup> SPILLE-KOHOFF, Andreas. Simulation of gas metal arc welding with CFX-5; CFX Berlin Software GMBH. 2004.

una temperatura final máxima después de todas las pasadas de 410°C, acorde a datos reales.<sup>51</sup>

Para poder desarrollar un modelo adecuado de simulación de soldadura SMAW se necesitan corroborar los datos de la simulación con datos reales obtenidos experimentalmente para así verificar su precisión. Debido a que es necesario conocer las tensiones residuales en el metal base, se realizó un estudio en 2006, este fue realizado por (MEJIA I., et al.) “Esfuerzos residuales generados en la soldadura de placas de acero inoxidable AISI 304 mediante el proceso SMAW”. En este se presenta el uso de la soldadura SMAW en aceros inoxidables austeníticos que tienen buenas propiedades de soldabilidad, pero presentan fuertes cambios en las propiedades del material base ocasionados por los cambios de fase en la zona de fusión, ya que durante el enfriamiento se tienden a producir fuertes tensiones residuales, debido a que los coeficientes de expansión y contracción para este material son mayores que en otro tipo de metales. Por esto se estudiaron los esfuerzos residuales obtenidos a distintas distancias del centro del cordón de soldadura por medio de un método específico, obteniendo como resultado que al aplicar la soldadura de la manera propuesta el material base resultó con un alto esfuerzo residual y un grado de distorsión elevado, poniendo a la junta en un estado crítico. Este tipo de resultados muestran la importancia de verificar lo que ocurre al usar cierto tipo de cordón de soldadura, y permite analizar las posibles fallas que se puedan presentar en la junta durante su periodo de trabajo.<sup>52</sup>

Continuando con el estudio de los efectos de la soldadura en los materiales se ha encontrado un estudio realizado en el año 2007 acerca del efecto de los esfuerzos residuales provocados por la soldadura GMAW en una junta a tope, este fue realizado por (BULLON, C., et al.) “simulación de un proceso de soldadura mediante un modelo termo-mecánico considerando el efecto de esfuerzos residuales utilizando el método de los elementos finitos”. Los autores presentan en este artículo un análisis de los esfuerzos residuales producidos en una junta luego del proceso de soldadura GMAW, basados en el método de los elementos finitos y teniendo en cuenta los campos térmicos, mecánicos y metalográficos del proceso. Como aspecto importante se puede apreciar que el campo térmico es el encargado de producir las alteraciones al material base, el cual presenta deformaciones producto del aumento de temperatura durante el proceso. El modelo planteado entrega los resultados sobre dos puntos enunciados en la placa (uno ubicado en el cordón de soldadura y otro al extremo izquierdo de la placa) por medio de gráficos de esfuerzos de Von Misses contra tiempo. Presenta

---

<sup>51</sup> ELVIRA, Gustavo y SANZI, Claudio. Proceso de reparación de plaqueado sobre una conexión de un recipiente de presión. Evaluación de la distribución térmica. Planteo de dos modelos de elementos finitos 2D y 3D comparación de resultados. 2004.

<sup>52</sup> MEJIA I., et al. Esfuerzos residuales generados en la soldadura de placas de acero inoxidable AISI 304 mediante el proceso SMAW. 2006.

también imágenes sobre el desarrollo de la temperatura a medida que se aplica el cordón de soldadura, comparando el fenómeno térmico de ambos nodos por medio de una gráfica de temperatura contra tiempo y argumentando además que los resultados obtenidos en el programa son muy similares a los obtenidos experimentalmente. Se puede encontrar también el resultado de deformaciones, mostrando que no es de gran proporción la deformación resultante, pues esta depende mucho de la brida usada para la junta, pero mostrando que en los extremos de las placas es donde se encuentra la mayor deformación.<sup>53</sup>

Acerca del modelamiento y análisis de los campos térmicos de soldaduras por elementos finitos se efectuó un estudio en el año 2007, el cual fue realizado por (RAMOS, Morales F., et al.) "Modelo de elementos finitos para determinar el campo de temperatura en una costura de filete ". En el cual inicialmente tomaron datos experimentales a partir de pruebas, luego crearon el modelo de elementos finitos tridimensional ajustándolo exactamente desde un punto de vista geométrico, realizando enmallado por elementos finitos de orden superior con el fin de garantizar una mayor precisión, el modelo de elementos finitos simuló las condiciones de soldadura y enfriamiento de la probeta. Luego de obtener resultados se realizó un análisis entre los datos experimentales y los obtenidos por medio del modelo, determinando que la precisión del modelo con respecto a los datos experimentales es muy buena con un error inferior al 5%, también determinaron que es posible la calibración de modelos de elementos finitos.<sup>54</sup>

La importancia de las juntas soldadas y las aplicaciones de estas motivan a que se continúen estudiando estos procesos de soldadura, y se establezcan modelos y medios adecuados para su estudio. En el año 2007 se realizó un estudio por medio de elementos finitos el cual fue realizado por (NIW C., Chang y ABD RAHIM, Abu B.) "Finite Element Modeling of arc welded joints". En el cual se realiza el análisis para una junta soldada en T, con la finalidad de proporcionar un medio adecuado para modelar uniones soldadas por medio de elementos finitos. Utilizando el Software de elemento finitos ABAQUS, se buscó generar la frecuencia natural y la forma de cada una de las geometrías a simular. Se denominaron la placa vertical como placa A, y la horizontal como placa B, y el conjunto total como la unión de las dos placas. A cada uno se le realizaron diferentes análisis, considerando las características dinámicas de la estructura. Se realizaron varias simulaciones en diferentes tipos de condiciones y análisis dentro del software para cada una de las placas A y B y, claro está, para el conjunto total, Durante el proceso los resultados obtenidos por el análisis de elementos finitos fueron comparados con los datos del análisis experimental, al obtener resultados se fueron realizando correcciones a cada uno de los modelos con reducciones de

---

<sup>53</sup> BULLON, C., et al. simulación de un proceso de soldadura mediante un modelo termo-mecánico considerando el efecto de esfuerzos residuales utilizando el método de los elementos finitos. 2007.

<sup>54</sup> RAMOS, Morales F., et al. Modelo de elementos finitos para determinar el campo de temperatura en una costura de filete. 2007.

porcentajes de error, concluyendo para el análisis que los mejores tipos de elementos dentro del paquete de ABAQUS son el quad-4 y el hex-8 dando los mejores resultados.<sup>55</sup>

Enfocándose en el tema de análisis y modelamiento de zonas afectadas térmicamente por la soldadura, se realizó un estudio en 2008 relacionado con dicho tema, este fue realizado por (PEREYRA, S., et al.) “Modelado numérico del proceso de soldadura por fricción agitación en aceros inoxidable”, donde se desarrolló un programa de elementos finitos por medio del uso de métodos numéricos para simular la unión de dos placas de acero inoxidable por medio de un acoplamiento termo mecánico. Donde se llegó a evidenciar una gran similitud entre el modelo hecho por computador y el experimental en cuanto a temperatura máxima y distribución de la misma a través de la placa. Se presentan también imágenes ilustrativas del comportamiento térmico en el momento de realizar la soldadura y gráficos de temperatura vs. Posición. Por último, se reconoce una necesidad de ser aplicadas condiciones de desplazamiento más óptimas en la interface herramienta-placas, para poder tener una mayor evidencia de flujo de material y mejorar los resultados del modelo térmico.<sup>56</sup>

Siendo tan innumerables las aplicaciones del proceso de soldadura GMAW Se realizó un estudio en el año 2008 acerca de un proceso de soldadura GMAW aplicado a una cañería, realizado por (KLOSTER, M., et al) “Evaluación del ciclo térmico sobre una cañería producida por una soldadura tipo GMAW, planteo de soluciones analíticas y computacionales y su comparación experimental utilizando termocuplas”. Se presenta un modelo para el análisis de los fenómenos ocurridos en una cañería tipo API 5L-X65 soldada por el proceso de soldadura GMAW. Dicho modelo fue desarrollado para demostrar lo importante que es la utilización de estos métodos para una escogencia adecuada del proceso de soldadura, donde se necesita que el material base tenga las propiedades mecánicas óptimas para cumplir su función sin fallas. Para este caso se utilizó una gráfica de enfriamiento de la junta (Temperatura vs Tiempo), sobre un punto denominado “A” por donde ha pasado la soldadura. Se dan también datos de enfriamiento de tres nodos distintos que coinciden con la misma distancia desde la superficie de la placa del nodo “A”, pero son analizados a medida que avanza la soldadura, mostrando una tabla de comparación de valores analíticos, experimentales y computacionales. Se resalta que es importante realizar la comparación con un ensayo experimental para verificar la confiabilidad del modelo y Tener en cuenta el acabado de dicha soldadura, pues de este depende mucho el enfriamiento de la

---

<sup>55</sup> NIW C.,Chang y ABD RAHIM, Abu B. Finite elements modeling of arc welding joints. Malaysia, 2007.

<sup>56</sup> PEREYRA, S., et al. Modelado numérico del proceso de soldadura por fricción agitación en aceros inoxidable. 2008.

pieza y podría variar en gran porcentaje con los resultados obtenidos en el programa donde se establecen ciertas propiedades del cordón.<sup>57</sup>

Sabiendo que hay una gran cantidad de procesos de soldadura y que sus efectos en la zona afectada por el calor son similares, se ha tomado un análisis realizado en el año 2009, relacionado con la soldadura de arco de plasma, realizado por (SASS-TISOVSHAYA, Margarita.) “Plasma Arc Welding Simulation with Open FOAM”. Por medio de este trabajo se da a conocer una herramienta de simulación válida para el proceso de soldadura ya mencionado. El desarrollo de esta herramienta está basado en el paquete CFD de código abierto Open FOAM, el desarrollo del solver fue basado en el ya existente Buoyant Simple Foam solver. A través de este software se manejó la totalidad de las variables, tales como son el flujo de plasma, el transporte de la energía, teniendo en cuenta la conservación del momentum de masa y la entalpía. Se desarrollaron las ecuaciones necesarias para la adecuada realización de la simulación, estableciendo las diferentes condiciones de contorno que rodean este proceso de soldadura, teniendo en cuenta todos los aspectos físicos que se presentan. Un aspecto bastante importante tomado en cuenta es la variación en la temperatura. Los resultados obtenidos representan la compleja interacción entre el flujo y el campo electromagnético y representa con exactitud la fuerte dependencia que tiene el flujo de las propiedades termo físicas del plasma. Aunque este trabajo revelo un desacuerdo de un 50 % en la componente de la velocidad es muy importante apreciar la consideración de gran cantidad de variables. Se menciona que el modelo continúa en estudio debido a que es desconocida la causa de la gran diferencia.<sup>58</sup>

Teniendo en cuenta la importancia de arco de plasma producido durante la soldadura se realizó un estudio en el año 2009 acerca de modelamiento en CFD del proceso de soldadura por arco. Este fue realizado por (MURPHY, Anthony B., et al.) “CFD Modelling Of Arc Welding – The Importance Of The Arc Plasma”. Los autores de este estudio empezaron por analizar detalladamente cada una de las características que posee la soldadura por arco, con el fin de desarrollar un modelo matemático para la simulación del proceso de soldadura obteniendo efectos y características de fenómenos como son la influencia del arco de plasma en el baño de soldadura, los efectos del gas de protección, la producción del vapor de metal desde el baño de soldadura. Permitiendo analizar el efecto del electrodo en las propiedades del arco formado y el baño de soldadura. En el estudio realizado se obtienen imágenes de la simulación, que permiten apreciar la temperatura y el vapor de hierro en campos fraccionados. Claro está que estos

---

<sup>57</sup> KLOSTER, M., et al. Evaluación del ciclo térmico sobre una cañería, producida por una soldadura tipo GMAW planteo de soluciones analíticas y computacionales y su comparación experimental utilizando termocuplas. 2008.

<sup>58</sup> SASS-TISOVSHAYA, Margarita. Plasma arc welding simulation with open FOAM. Göteborg, 2009.



estudios han sido realizados asumiendo que el baño de soldadura presenta una superficie plana, lo cual no presenta datos confiables debido a la irregularidad de esta superficie.<sup>59</sup>

Conociendo la importancia del avance tecnológico en la simulación de procesos de soldadura en 2009 se realizó un estudio de las nuevas tecnologías para la simulación de los procesos de soldadura por arco, este estudio fue realizado por (BELLET, M., et al.) "New numerical technologies for the simulation of arc welding processes", donde se presentan algunas ideas y conceptos sobre los nuevos códigos numéricos desarrollados para la simulación y análisis de la soldadura por arco. Se presenta en primer lugar un sofisticado modelamiento del material depositado en una soldadura por arco donde se logra tener un completo diseño de la formación de material depositado en la junta. En segundo lugar, muestra un proceso de optimización de una malla dinámica para el modelo de elementos finitos, donde muestran gráficas de picos de temperatura en el cordón de la soldadura (Temperatura vs. Posición), así como también se logra obtener gráficas de esfuerzos con relación a la posición; este tipo de mallas muestra una mayor similitud con lo experimental y por lo tanto un menor error con lo elaborado en computador. Por último, presenta un método inverso de métodos finitos multivariable para la identificación de fuentes de calor, en este caso, de soldadura GMAW donde se presentan de igual manera los picos de temperatura y la formación del cordón con su incidencia térmica.<sup>60</sup>

Comprendiendo la importancia del modelamiento matemático, y su utilidad en procesos térmicos se realizó un estudio en el año 2010 acerca de la soldadura GTAW, el cual fue realizado por (MARTÍNEZ, E.; ESTREMS, M. y V., Miguel.) "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", en este artículo se muestra el desarrollo de un programa muy completo donde se presentan gráficas de temperatura contra tiempo de la soldadura GTAW, pero dando la posibilidad de hacer ciertas variaciones con el fin de ser usada en GMAW, SMAW y FCAW, para tener una proyección de la reacción térmica obtenida en el material al realizar la soldadura. Se obtienen unas graficas que comparan lo obtenido en el programa de elementos finitos y obtenidas por medio de mediciones experimentales, las cuales presentan diferencias que se consideran son producidas por la convección y radiación del ambiente, ya que en el programa desarrollado no se tienen en cuenta dichas pérdidas de calor. Otros datos importantes obtenidos de este programa son la penetración de la soldadura, o sea, la parte de metal fusionado. Permite también el uso de geometrías y trayectorias complejas a soldar, para ser estudiadas,

---

<sup>59</sup> MURPHY, Anthony B., et al. CFD Modelling of arc welding-the importance of the arc. Melbourne, 2009.

<sup>60</sup> BELLET, M., et al. "New numerical technologies for the simulation of arc welding processes." 2009.

dando muchos beneficios ante problemas difíciles de resolver analíticamente por su disposición geométrica.<sup>61</sup>

La simulación por medio de métodos numéricos (Elementos finitos) ha tomado bastante importancia con el tiempo, en el año 2011 se realizó un estudio relevante por medio de métodos numéricos, este fue desarrollado por (KONRAD, Adamus.) "Numerical Simulation of the Electron Beam Welding Process". Basados en antecedentes pueden comunicar por medio de su trabajo que la simulación y el modelamiento de soldaduras por haz de electrones han sido de gran desarrollo para la investigación en este campo, además de las aplicaciones prácticas en la ingeniería. Un estudio de modelado puede dar información detallada sobre las características del baño de soldadura y su relación con los parámetros del proceso de soldadura como son la velocidad de soldadura, potencia del haz de electrones, el espesor de la pieza de trabajo, etc. y además se puede utilizar para reducir los costes de experimentos. Una simulación del proceso de soldadura por haz de electrones permite la estimación de la geometría baño de soldadura, la temperatura transitoria, tensiones, tensiones residuales y distorsión. Sin embargo, se comunica que estas simulaciones no son una tarea fácil ya que implica la interacción de los fenómenos térmicos, mecánicos y metalúrgicos. Además, se necesita comprender adecuadamente el comportamiento y la transferencia de calor durante el proceso de soldaduras.<sup>62</sup>

Teniendo en cuenta la importancia del proceso de soldadura por láser y la utilización de tecnología para su estudio se realizó un trabajo en el año 2011 por (FRAUNHOFER INSTITUTE FOR LASER TECHNOLOGY ILT) "Simulation Of laser Welding Subject to alternations in specifications and other technical information" en el cual se da a conocer la forma geométrica de una costura de soldadura, además de cómo se forma durante la soldadura láser, y también como está determinada en una gran medida por la potencia absorbida en la superficie de la pieza base. El método utilizado es un modelo estacionario que es usado inicialmente para predecir la forma geométrica de la soldadura, además de establecer correlaciones entre la absorción local y la potencia del láser disponible durante el recorrido. Ellos también obtuvieron un modelo de la propagación del haz del láser en el proceso de soldadura la cual fue integrada a la simulación del proceso de soldadura. Quienes estuvieron trabajando en este proyecto obtuvieron como resultado el campo de radiación que se divide en los haces de rayos, este fue denominado como un método de rastreo del haz el cual se utiliza para calcular la intensidad de los haces en cada punto del volumen. Como aplicaciones prácticas y además de su uso en la simulación de procesos de soldadura laser,

---

<sup>61</sup> MARTÍNEZ, E.; ESTREMS, M. y V., Miguel. 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. 2010.

<sup>62</sup> KONRAD, Adamus. Simulation of the electron beam welding process. Journal Computers and Structures VOL. 89, 2011: 977-985.

este modelo fue desarrollado para simular otros tipos de procesamiento de materiales. El método de rastreo del rayo puede utilizarse para calcular los campos de radiación en todas las áreas de procesamiento del material, además proporciona un medio para calcular campos de radiación continua que es mucho más rápido que los métodos ópticos de ondas comparables.<sup>63</sup>

Sabiendo que los elementos finitos son un método muy útil por el cual se pueden estudiar las incidencias de la aplicación de un cordón de soldadura por el proceso SMAW, este método numérico fue utilizado para el desarrollo de una investigación en el año 2012 por (SANZI, Héctor; ELVIRA, Gustavo y TUREL, Alejandro) “Simulación computacional del procedimiento de soldadura en servicio empleado en la reparación estructural de un gasoducto”, En esta investigación se encuentra un análisis del efecto de la soldadura SMAW en la zona de afectación de calor de una tubería perteneciente a un gaseoducto, utilizando el método de elementos finitos de una forma bidimensional buscando obtener resultados sobre las tensiones residuales en la ZAC. Se realizaron comparaciones de los resultados obtenidos con el programa de elementos finitos y un trabajo realizado previamente de la medición por termocuplas de este mismo tipo de soldadura, llegando a concluir que coinciden de una manera adecuada, el resultado obtenido de forma computacional y el obtenido de forma experimental, obteniendo además datos importantes sobre los defectos encontrados en la junta, como tensiones residuales.<sup>64</sup>

---

<sup>63</sup> FRAUNHOFER INSTITUTE FOR LASER TECHNOLOGY ILT. Simulation of laser welding subject to alternations in specifications in specifications and other technical information. 2011.

<sup>64</sup> SANZI, Héctor; ELVIRA, Gustavo y TUREL, Alejandro. Simulación computacional del procedimiento de soldadura en servicio empleado en la reparación estructural de un gasoducto. 2012.

## 7. DISEÑO METODOLÓGICO

### 7.1. MATERIALES

Se ha seleccionado 1 placa de acero AISI SAE 1040 con las propiedades y características listadas en la Tabla 1 y la Tabla 2.

Tabla 1; Propiedades de proceso y del material aplicadas al modelo matemático introducido en MATLAB®

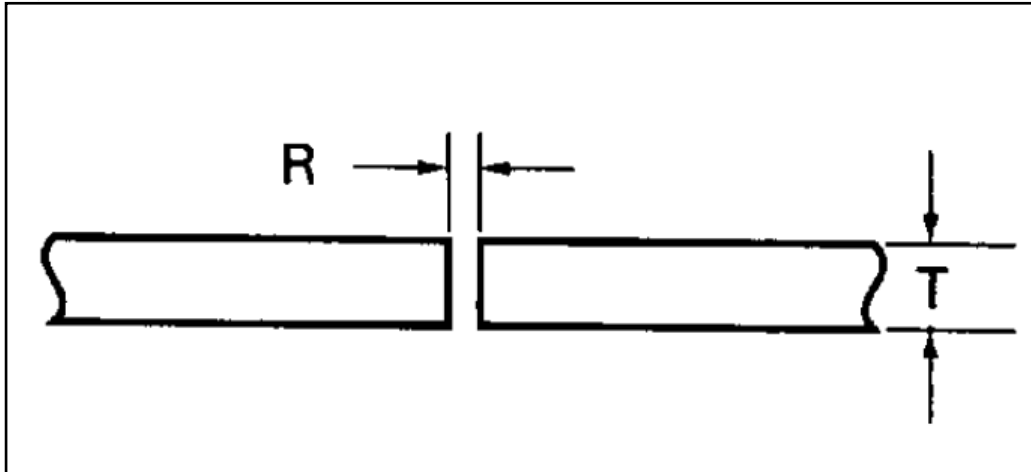
Propiedad		Símbolo
Coeficiente Conductividad térmica	$48 W/m * K$	k
Coeficiente Película del aire	$15 W/m^2 * K$	h
Calor específico	$600 J/(Kg * K)$	Cp
Densidad	$7845 Km/m^3$	$\rho$
Espesor Placa	$6.35 mm$	y
Temperatura inicial	$23 ^\circ C$	$T_0$
Diferencial de tiempo	$0.0275 seg$	$\Delta t$
Diferencial de x	$0.001058333 m$	$\Delta x$
Temperatura inicial	$23 ^\circ C$	$T_0$
Temperatura pico	$1450 ^\circ C$	$T_p$
Fuentes: Autores del proyecto		

Tabla 2. Dimensiones de la placa

Acero 1040		
Longitud	$0.1016 m$	a
Alto	$0.0508$	b
Ancho	$0.00635$	c
Fuente: Autores del proyecto		

El tipo de junta establecido para aplicar el modelo matemático de transferencia de calor durante el proceso de soldadura es una junta a tope, en la cual el modelo geométrico está definido por un perfil rectangular en el cual el proceso de unión se establece con una pasada del cordón de soldadura la cual produce el suficiente material de aporte para satisfacer la unión en su totalidad, esto se puede apreciar en la Figura 6.

Figura 6 Cordón de soldadura a tope.



Fuente: ADAMS, Brent L, et al. ASM Metals Handbook. ASM internacional, 2004.

## 7.2. METODOLOGÍA

7.2.1. Tipo de investigación. La investigación realizada es de tipo correlacional, estudiando la veracidad del método de los elementos finitos, para obtener características microestructurales y de dureza de una junta luego de ser soldada, comparada con una simulación desarrollada por medio de un software desarrollador de ingeniería asistido por computador, de donde se obtuvieron tiempos y velocidades de enfriamiento para analizar los valores de dureza finales luego de realizado el proceso.

Se define como correlacional la investigación, ya que compara los resultados obtenidos por medio de dos herramientas diferentes, las cuales son los métodos numéricos y los elementos finitos, dentro del contexto del proceso de soldadura por electrodo revestido aplicado a un acero AISI SAE 1040, donde las constantes físicas usadas para ambos métodos se mantienen exactamente iguales, para encontrar las posibles diferencias entre los métodos de análisis.

7.2.2. Universo y muestra. El universo de estudio de la investigación es la zona afectada por el calor de una junta soldada a tope por medio del proceso de soldadura manual con electrodo revestido, aplicado en un acero AISI SAE 1040.

La muestra está definida por la zona que alcanza la austenización a una temperatura de 800°C de la junta de acero soldada, donde no se define un tamaño de muestra, ya que al utilizar la investigación un proceso computarizado para el desarrollo y obtención de datos, no se obtendrán resultados diferentes, al realizar numerosas pruebas, sin variar las constantes utilizadas que definen el modelo.

### 7.2.3. Método, técnicas e instrumentos de investigación.

7.2.3.1. Método de investigación. La presente, está fundamentada en la investigación científica, donde se plantean una serie de procesos ordenados con el fin de llegar a un conocimiento muy integral y confiable sobre el fenómeno físico en el proceso de soldadura. Se siguen los pasos propuestos de manera ordenada, buscando el desarrollo apropiado de la investigación que garantice un incremento significativo del saber. El uso de numerosas referencias bibliográficas para crear unas bases de conocimiento y un amplio manejo de conceptos, dan la posibilidad de formular valiosas hipótesis sobre las cuales trabajar para entender a profundidad una realidad.

7.2.3.2. Técnicas de investigación. Por medio de las técnicas de investigación se da la estructura sistemática de ésta, garantizando un orden de las etapas, una adquisición de instrumentos para el dominio de información y un manejo de datos que orienten la obtención de conocimientos. Las técnicas utilizadas fueron la bibliográfica, para analizar antecedentes del fenómeno y las leyes que lo rigen; la observación de laboratorio, donde se realiza una prueba experimental, para dar una mejor idea del comportamiento del fenómeno a analizar, y por medio de la observación directa del mismo, se interpreta lo ocurrido.

7.2.3.3. Instrumentos de investigación. Los instrumentos utilizados fueron artículos científicos relacionados con el tema a investigar, bibliografías especializadas sobre termodinámica, ciencia de materiales, procesos de soldadura y métodos numéricos, se emplean también herramientas de computación y software especializados, entre algunos otros.

7.2.4. Procedimiento. El proceso investigativo planteado, se estructura de la siguiente manera:

Analizar cómo afectan los parámetros de la soldadura como: amperaje, voltaje, polaridad, espesor del material. Las dimensiones de la zona afectada por el calor.	Revisión bibliográfica. Definir la geometría exacta de la junta. Analizar parámetros físicos más influyentes en el proceso de soldadura
--	---

<p>Desarrollar por medio de elementos finitos un modelo matemático de la transferencia de calor para determinar la zona afectada por el calor ZAC.</p>	<p>Plantear ecuaciones de transferencia de calor que apliquen para el modelo. Obtener números adimensionales propios del proceso físico. Plantear ecuaciones dinámicas que aplique para el modelo. Definir la cantidad de variables dentro del modelo matemático. Desarrollar el modelo matemático para el proceso de soldadura SMAW enfocado en la zona afectada por el calor, teniendo en cuenta la geometría de la junta. Solucionar el modelo matemático por medio de MATLAB® Sintetizar los datos obtenidos.</p>
<p>Aplicar un modelo matemático de las transformaciones de fase para una placa de ¼" de un acero AISI-SAE 1040 y determinar cuáles ocurren en la ZAC de este.</p>	<p>Interpretar los cambios en la zona afectada por el calor, con los datos obtenidos en el modelo, por medio del diagrama CCT del acero AISI SAE 1040. Interpretar los cambios en la zona afectada por el calor, con los datos obtenidos en la simulación, por medio del diagrama CCT del acero AISI SAE 1040.</p>
<p>Determinar los valores de dureza de acuerdo a la regla de las fases para el modelo matemático aplicado.</p>	<p>Sintetizar los datos obtenidos por medio del modelo matemático Sintetizar lo datos obtenidos por medio de proceso de simulación Evaluar los datos obtenidos por medio del modelo contra lo datos obtenidos por medio de la simulación</p>

7.2.5. Modelo estadístico. En esta investigación no se aplica un modelo estadístico para definir un número de muestras necesarias a analizar, ya que, al utilizar software de sistemas para la obtención de datos, se va a obtener con cada corrida del programa, sin alterar valores de las variables, exactamente el mismo resultado.

## 8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 8.1. ANÁLISIS Y DESARROLLO DEL PROYECTO

8.1.1. Análisis. Obtención de características y parámetros del material determinantes para el modelo matemático de MATLAB y la simulación del proceso de transferencia de calor en ANSYS Mechanical APDL

En la Tabla 1 se listan las propiedades y características del proceso de soldadura y del material a trabajar en el modelo matemático y la simulación.

En la Tabla 2 se listan las dimensiones de la placa base tomada para el modelo matemático y la simulación y en la Tabla 3 se muestran las coordenadas rectangulares correspondientes a los puntos a analizar en el modelo matemático por medio de MATLAB ® y en la simulación por medio de ANSYS ® Mechanical APDL.

Tabla 3. Puntos en coordenadas rectangulares para análisis gráfico

	y1 =0	y2 =3.175	y3 =6.35
x1	1,06	1,06	1,06
x2	2,12	2,12	2,12
x3	3,18	3,18	3,18
x4	4,23	4,23	4,23
x5	5,29	5,29	5,29
x6	6,35	6,35	6,35
x7	7,41	7,41	7,41
x8	8,47	8,47	8,47
x9	9,53	9,53	9,53
x10	10,58	10,58	10,58
x11	11,64	11,64	11,64
x12	12,70	12,70	12,70
x13	13,76	13,76	13,76
x14	14,82	14,82	14,82
x15	15,88	15,88	15,88
x16	16,93	16,93	16,93
x17	17,99	17,99	17,99
x18	19,05	19,05	19,05
x19	20,11	20,11	20,11
x20	21,17	21,17	21,17

Fuente: Autores del proyecto



Figura 7. Representación gráfica de los puntos de análisis para el modelo matemático y la simulación



Fuente: Autores del proyecto

La Figura 7 representa gráficamente los puntos analizados por medio del modelo de diferencias finitas y la simulación por medio de ANSYS Mechanical APDL. La Gráfica 1 con base en la Tabla 5 muestra los resultados gráficos de los puntos seleccionados para el análisis.

8.1.1.1. Nodos en el baño de soldadura. Para que la simulación y el modelo matemático tengan sean lo más similares posibles en sus condiciones iniciales, se estableció un porcentaje de nodos con la temperatura inicial igual a 1450 °C, este porcentaje corresponde al 4.8 % de los nodos totales representados en cualquiera de los modelos.

El 4.8% de los nodos corresponde a un triángulo rectángulo isósceles representado el material fundido durante el proceso de soldadura, los dos lados iguales del triángulo corresponden al ancho de la placa seleccionada (Tabla 2. Dimensiones de la placa).

8.1.1.2. Especificaciones del material. Dentro del software ANSYS es de bastante importancia definir las propiedades del material el cual se está trabajando, la Tabla 1 muestra las propiedades asignadas para el proceso de simulación del proceso transferencia de calor durante el proceso de soldadura.

## 8.2. DESARROLLO DEL MODELO MATEMÁTICO DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Para la solución del modelo matemático empleado para el análisis de la zona afectada por el calor durante un proceso de soldadura, se tomaron las ecuaciones diferenciales de conducción y convección transitorias para las cuales es de gran importancia establecer el valor del número de BIOT y el número de Fourier los cuales dependen del diferencial de distancia y el diferencial de tiempo tomado, el diferencial de distancia en x es equivalente al diferencial de distancia en y.

### 8.2.1. Valores obtenidos

$$\begin{aligned} \text{Numero de Biot} &= Bi \\ Bi &= \frac{h * \Delta x}{k} = 3.3073e * 10^{-4} \end{aligned} \quad \text{(Ecuación 16)}^{65}$$

El número de biot es el que relaciona la transferencia de calor por conducción y por convección con el delta de x. La (Ecuación 16) muestra la ecuación y el valor correspondiente a dicho número.

*Restricción de Fo*

$$Fo(1 + Bi) \leq \frac{1}{4}$$

(Ecuación 17)<sup>66</sup>

*Numero de Fourier*

$$Fo = \frac{1}{4(1 + Bi)} = \frac{1}{4(1 + 0.0003307291667)}$$

$$Fo = 0.2499173450447$$

El número de Fourier tiene gran importancia en los modelos desarrollados por diferencias finitas, ya que este debe estar dentro de un rango de valores establecidos para que el modelo matemático se solucione correctamente. Debido a la gran importancia de este número, se ha calculado con base en el valor de la

---

<sup>65</sup> Autores del proyecto

<sup>66</sup> Autores del proyecto

restricción que tienen las ecuaciones de diferencias finitas aplicadas para un nodo esquinero. La (Ecuación 17) muestra su definición y el valor correspondiente a este.

Para el cálculo del  $\Delta x$  se utiliza la (ecuación 18), la cual permite calcular y definir la longitud del elemento en los ejes X y Y, así como los puntos n que se requieran para el espesor de la placa a modelar. Para el análisis se tomó un total de 7 puntos en la línea de menor longitud de la figura geométrica.

*Cálculo  $\Delta x$*

$$\Delta x = \frac{6.35}{n - 1} \quad (\text{Ecuación 18})^{67}$$

Para el cálculo del diferencial de tiempo en MATLAB se definió la ( Ecuación 19), El diferencial de tiempo se calcula con base en el número de Fourier, el diferencial de distancia para el modelo y la difusividad térmica del material.

*Cálculo  $\Delta t$*

$$\Delta t = \frac{Fo * \Delta x^2}{K} \quad (\text{ Ecuación 19})^{68}$$

$$Dt = \frac{0.2499173450447 * 0.0010583333333^2}{K}$$

Verificación de estabilidad del modelo.

Al definir el diferencial del tiempo con respecto a un valor referencia de estabilidad como lo es  $Fo(1 + Bi) = 1/4$  se asegura la estabilidad del modelo matemático

### 8.2.2. Modelo matemático establecido en MATLAB® para la solución del proceso de transferencia de calor en estado transitorio

---

<sup>67</sup> Autores del proyecto

<sup>68</sup> Autores del proyecto

Figura 8. Datos introducidos para el modelo matemático de transferencia de calor

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%
%           Transferencia de Calor
%           En la Zona Afectada Por El Calor
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clc
clear

global tkon t

n=7;%Nodos Ancho
m=96;%Nodos Largo
ro=7845;%Densidad del material
Cp=600;%Poder calorifico
Lon=6.35;%Ancho de la placa
k=48.0;%Coeficiente de Conductividad Térmica
K=k/(ro*Cp);%Difusividad Termica
Dx=Lon/(n-1)/1000;%Diferencial de distancia
h=15; % Coeficiente de convención
Bi=h*Dx/k; %Número de Biot
Fo=1/(4*(1+Bi)); %Número de Fourier
Dt=(Fo*((Dx)^2))/K; %Diferencial de tiempo
T=ones(n,m)*23;% Temperatura Inicial
To=23;%Temperatura Ambiente
TNodes=1450; %Temperatura Inicial Nodos del baño de soldadura

tkon=600;%Tiempo de análisis
T;
t=Dt;

%Nodos Con condición inicial de temperatura 1450 °C
T(1:7,1)=TNodes;
T(2:7,2)=TNodes;
T(2:7,3)=TNodes;
T(3:7,4)=TNodes;
T(4:7,5)=TNodes;
T(5:7,6)=TNodes;
T(7,7)=TNodes;

tsss=tkon/Dt;
tsss=round(tsss,0);
ts=tsss+1;
Z=ones(ts+1,2)*1;

```

Fuente: Autores del proyecto

Figura 9. Modelos matemático aplicado a la placa base del proceso de soldadura.

```

while t<tkon

%Cara Derecha
for i=2:n-1
    T(i,m)=Fo*(T(i-1,m)+T(i+1,m)+2*T(i,m-1)+2*Bi*To)+(1-4*Fo-2*Bi*Fo)*T(i,m);
    T(1,m)=2*Fo*(T(2,m)+T(1,m-1)+2*Bi*To)+(1-4*Fo-4*Bi*Fo)*T(1,m);
    T(n,m)=2*Fo*(T(n-1,m)+T(n,m-1)+2*Bi*To)+(1-4*Fo-4*Bi*Fo)*T(n,m);
end
%Cara Superior
for j=2:m-1
    T(n,j)=Fo*(T(n,j-1)+T(n,j+1)+2*T(n-1,j)+2*Bi*To)+(1-4*Fo-2*Bi*Fo)*T(n,j);
    T(n,1)=2*Fo*(T(n-1,1)+T(n,2)+2*Bi*To)+(1-4*Fo-4*Bi*Fo)*T(n,1);
    T(n,m)=2*Fo*(T(n-1,m)+T(n,m-1)+2*Bi*To)+(1-4*Fo-4*Bi*Fo)*T(n,m);
end
%Cara Izquierda
%for i=2:n-1
%    T(i,1)=Fo*(T(i-1,1)+T(i+1,1)+2*T(1,1+1)+2*Bi*To)+(1-4*Fo-2*Bi*Fo)*T(i,1);
%    T(n,1)=2*Fo*(T(n-1,1)+T(n,2)+2*Bi*To)+(1-4*Fo-4*Bi*Fo)*T(n,1);
%    T(1,1)=2*Fo*(T(1,2)+T(2,1)+2*Bi*To)+(1-4*Fo-4*Bi*Fo)*T(1,1);
%end
%Cara Inferior
for j=2:m-1
    T(1,j)=Fo*(T(1,j-1)+T(1,j+1)+2*T(2,j)+2*Bi*To)+(1-4*Fo-2*Bi*Fo)*T(1,j);
    T(1,1)=2*Fo*(T(1,2)+T(2,1)+2*Bi*To)+(1-4*Fo-4*Bi*Fo)*T(1,1);
    T(1,m)=2*Fo*(T(2,m)+T(1,m-1)+2*Bi*To)+(1-4*Fo-4*Bi*Fo)*T(1,m);
end
%Conducción en la pieza
for i=2:n-1
    for j=1:1
        r= T(i,j);
        T(i,j)=Fo*(T(i-1,j)+T(i+1,j)+2*T(i,j+1))+(1-4*Fo)*r;
        H(j)=T(i,j);
    end
    for j=2:m-1
        r= T(i,j);
        T(i,j)=(Fo*(T(i-1,j)+T(i+1,j)+T(i,j-1)+T(i,j+1))+T(i,j))+(1-4*Fo)*r;
        H(j)=T(i,j);
    end
end

%Registro de Nodos
tss=t/Dt;
tss=round(tss,0);
Z(tss,1)=t;
Z(tss,2)=T(4,1);
Z(tss,3)=T(4,2);
Z(tss,4)=T(4,3);

```

Fuente: Autores del proyecto

Figura 10. Matriz de nodos para toma de datos.

```
Z(tss,5)=T(4,4);
Z(tss,6)=T(4,5);
Z(tss,7)=T(4,6);
Z(tss,8)=T(4,7);
Z(tss,9)=T(4,8);
Z(tss,10)=T(4,9);
Z(tss,11)=T(4,10);
Z(tss,12)=T(4,11);
Z(tss,13)=T(4,12);
Z(tss,14)=T(4,13);
Z(tss,15)=T(4,14);
Z(tss,16)=T(4,15);
Z(tss,17)=T(4,16);
Z(tss,18)=T(4,17);
Z(tss,19)=T(4,18);
Z(tss,20)=T(4,19);
Z(tss,21)=T(4,20);
Z(tss,22)=T(4,21);
Z(tss,23)=T(4,22);
Z(tss,24)=T(4,23);
Z(tss,25)=T(4,24);
Z(tss,26)=T(4,25);
Z(tss,27)=T(4,26);
Z(tss,28)=T(4,27);
Z(tss,29)=T(4,28);
Z(tss,30)=T(4,29);
Z(tss,31)=T(4,30);
Z(tss,32)=T(1,1);
Z(tss,33)=T(1,2);
Z(tss,34)=T(1,3);
Z(tss,35)=T(1,4);
Z(tss,36)=T(1,5);
Z(tss,37)=T(1,6);
Z(tss,38)=T(1,7);
Z(tss,39)=T(1,8);
Z(tss,40)=T(1,9);
Z(tss,41)=T(1,10);
Z(tss,42)=T(1,11);
Z(tss,43)=T(1,12);
Z(tss,44)=T(1,13);
Z(tss,45)=T(1,14);
Z(tss,46)=T(1,15);
Z(tss,47)=T(1,16);
Z(tss,48)=T(1,17);
Z(tss,49)=T(1,18);
Z(tss,50)=T(1,19);
Z(tss,51)=T(1,20);
Z(tss,52)=T(1,21);
Z(tss,53)=T(1,22);
Z(tss,54)=T(1,23);
Z(tss,55)=T(1,24);
```

Fuente: Autores del proyecto

Figura 11. Matriz para toma de datos y Graficas en MATLAB

```
Z(tss,56)=T(1,25);
Z(tss,57)=T(1,26);
Z(tss,58)=T(1,27);
Z(tss,59)=T(1,28);
Z(tss,60)=T(1,29);
Z(tss,61)=T(1,30);
Z(tss,62)=T(7,1);
Z(tss,63)=T(7,2);
Z(tss,64)=T(7,3);
Z(tss,65)=T(7,4);
Z(tss,66)=T(7,5);
Z(tss,67)=T(7,6);
Z(tss,68)=T(7,7);
Z(tss,69)=T(7,8);
Z(tss,70)=T(7,9);
Z(tss,71)=T(7,10);
Z(tss,72)=T(7,11);
Z(tss,73)=T(7,12);
Z(tss,74)=T(7,13);
Z(tss,75)=T(7,14);
Z(tss,76)=T(7,15);
Z(tss,77)=T(7,16);
Z(tss,78)=T(7,17);
Z(tss,79)=T(7,18);
Z(tss,80)=T(7,19);
Z(tss,81)=T(7,20);
Z(tss,82)=T(7,21);
Z(tss,83)=T(7,22);
Z(tss,84)=T(7,23);
Z(tss,85)=T(7,24);
Z(tss,86)=T(7,25);
Z(tss,87)=T(7,26);
Z(tss,88)=T(7,27);
Z(tss,89)=T(7,28);
Z(tss,90)=T(7,29);
Z(tss,91)=T(7,30);
```

```
pause(0.02)
%axes(handles.graf);
pcolor(T)
retazec=sprintf('Time=%g s',t);
title(retazec)
colorbar
shading interp
colormap hot
% -----
t=t+Dt;
end
```

Fuente: Autores del proyecto

La Figura 8, la Figura 9 , la Figura 10 y la Figura 11 muestran el código ejecutado en MATLAB® para la solución del modelo matemático obtenido, allí se introducen los valores obtenidos para el modelo matemático, se expresan las ecuaciones utilizadas para proceso de transferencia de calor y se define la matriz de obtención de datos.

8.2.3. Desarrollo de simulación por medio de elementos finitos en ANSYS®. El análisis por medio de elemento finitos desarrollado en el software ANSYS, fue un análisis más sencillo en cuanto a su desarrollo, debido a que el software tiene en su programación toda la parte matemática correspondiente a los elementos finitos, por lo cual los puntos de mayor importancia son el desarrollo del modelo geométrico correspondiente, la selección de parámetros adecuados dentro de la interfaz del software y establecer los tiempos para el análisis.

8.2.3.1. Desarrollo del modelo geométrico para ANSYS®. El modelo geométrico de la Figura 12 fue elaborado por medio del software ANSYS APDL Mechanical con las dimensiones de la Tabla 1; Propiedades de proceso y del material aplicadas al modelo matemático introducido en MATLAB®, este modelo geométrico representa el material base, cabe resaltar que se consideran solo una placa de material base ya que por su configuración geométrica simétrica presentan el mismo comportamiento.

Figura 12. Modelo geométrico en ANSYS® Mechanical APDL



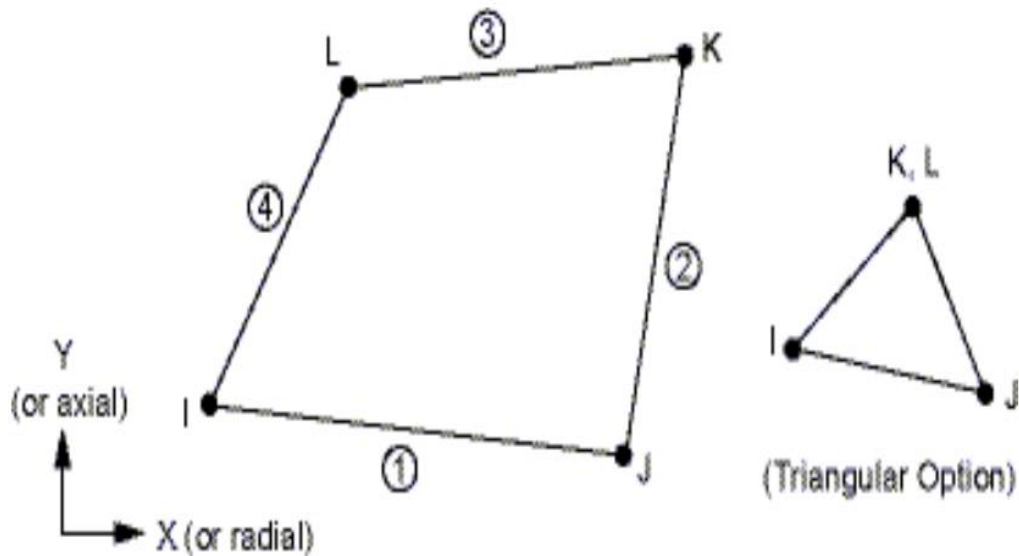
Fuente: Autores del proyecto



8.2.3.2. Selección de tipo de elementos finitos. La librería de elementos del software ANSYS® es bastante completa y permite seleccionar un tipo de elemento que se ajuste al análisis que se desea realizar dependiendo del tipo de las características del proceso a evaluar y de la complejidad que se le asigne.

Para el análisis realizado se seleccionó el elemento PLANE55 Figura 13. Elemento PLANE55 Librería ANSYS®, el cual es un elemento rectangular que está definido por 4 nodos. Se toma este tipo de elemento debido a que nos permite modelar adecuadamente la geometría del material y la configuración obtenida con este es la más aproximada a un modelo de diferencias finitas, lo cual con respecto al modelo matemático de MATLAB permite un índice de proximidad más alto que con cualquier otro elemento manejado en ANSYS® Mechanical APDL.

Figura 13. Elemento PLANE55 Librería ANSYS®

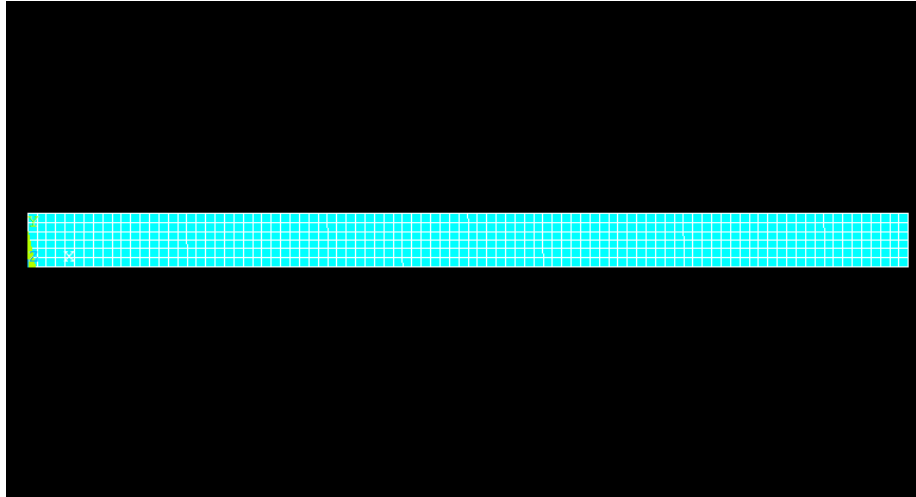


Fuente: ANSYS®. Element Library, PLANE55. 2013.

8.2.3.3. Enmallado del modelo geométrico. El enmallado para un proceso de simulación es uno de los factores más importantes a considerar, el tamaño de cada elemento, y la cantidad de elementos que representan la geometría definen el error que se puede presentar en el análisis, aunque es de gran importancia considerar que una gran cantidad de elementos consume más recursos de hardware en una computadora, por lo cual es importante definir la cantidad de elementos adecuados para obtener una muy buena solución, para este caso se ha realizado un solo re-enmallado debido a que los recursos del equipo no permitieron un segundo re-enmallado. La Figura 14 muestra el enmallado

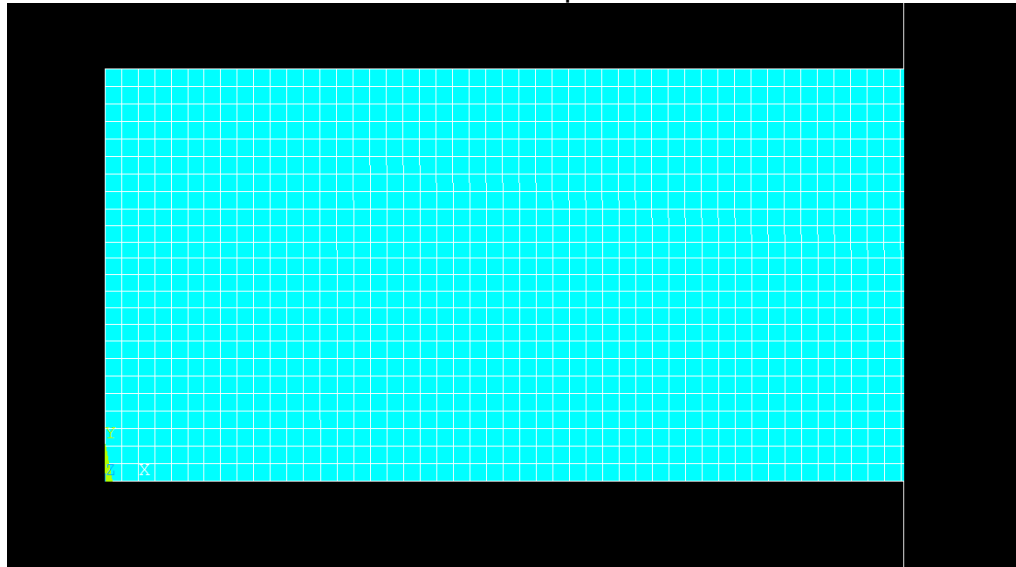
realizado a la geometría del material base, la Figura 15 y la Figura 16 corresponden al re-enmallado de los elementos.

Figura 14. Enmallado Placa ANSYS Mechanical APDL



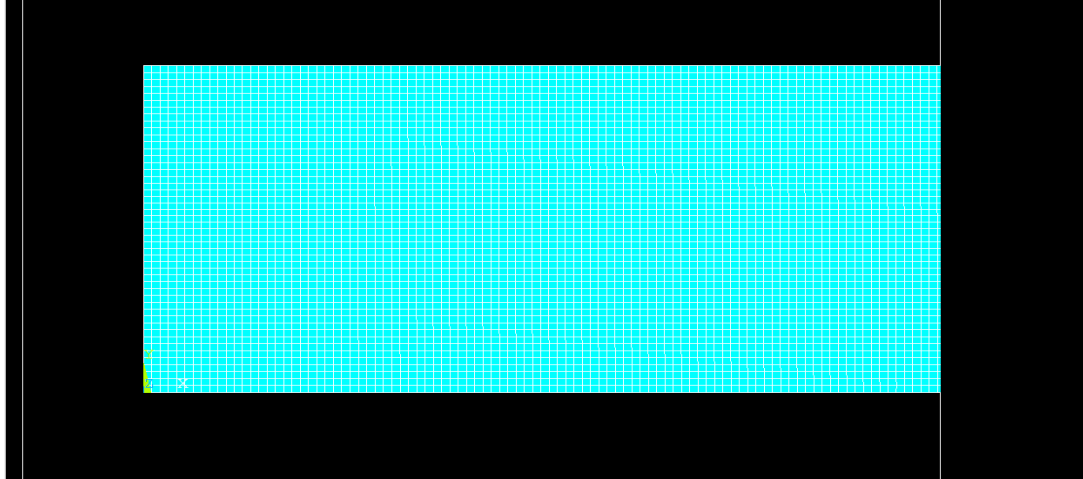
Fuente: Autores del proyecto

Figura 15. Refinado N°1 del enmallado de la placa ANSYS Mechanical APDL



Fuente: Autores del proyecto

Figura 16. Refinado N°2 del enmallado de la placa ANSYS Mechanical APDL



Fuente: Autores del proyecto

Es de gran importancia definir dentro del software ANSYS que el análisis a realiza es en régimen transitorio además de definir los parámetros de tiempo de análisis y el diferencial de tiempo deseado.

Tabla 4. Datos de tiempo necesarios para el análisis transitorio en ANSYS.

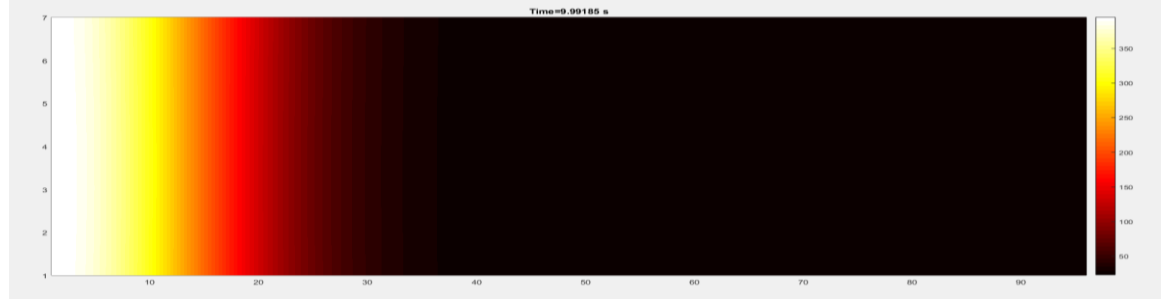
<b>Tiempo</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Unidad</b>
Tiempo de análisis	600	s
Diferencial de tiempo	0.1	s
Diferencial de tiempo min	0.099	s
Diferencial de tiempo máx.	0.101	s
Fuente: Autores del proyecto		

### 8.3. RESULTADOS OBTENIDOS

8.3.1. Solución obtenida por medio del modelo matemático. La solución obtenida por medio del MATLAB® muestra adecuadamente el proceso de transferencia de calor, este modelo entrega datos en cada instante de tiempo y será de gran importancia para un análisis posterior acerca de su composición micro estructural.

La Figura 17 en una vista alzada del modelo geométrico (Material base), la distribución de temperaturas luego de 10 segundos de iniciado el proceso de soldadura.

Figura 17. Distribución de temperaturas en el material base luego de 10 segundos



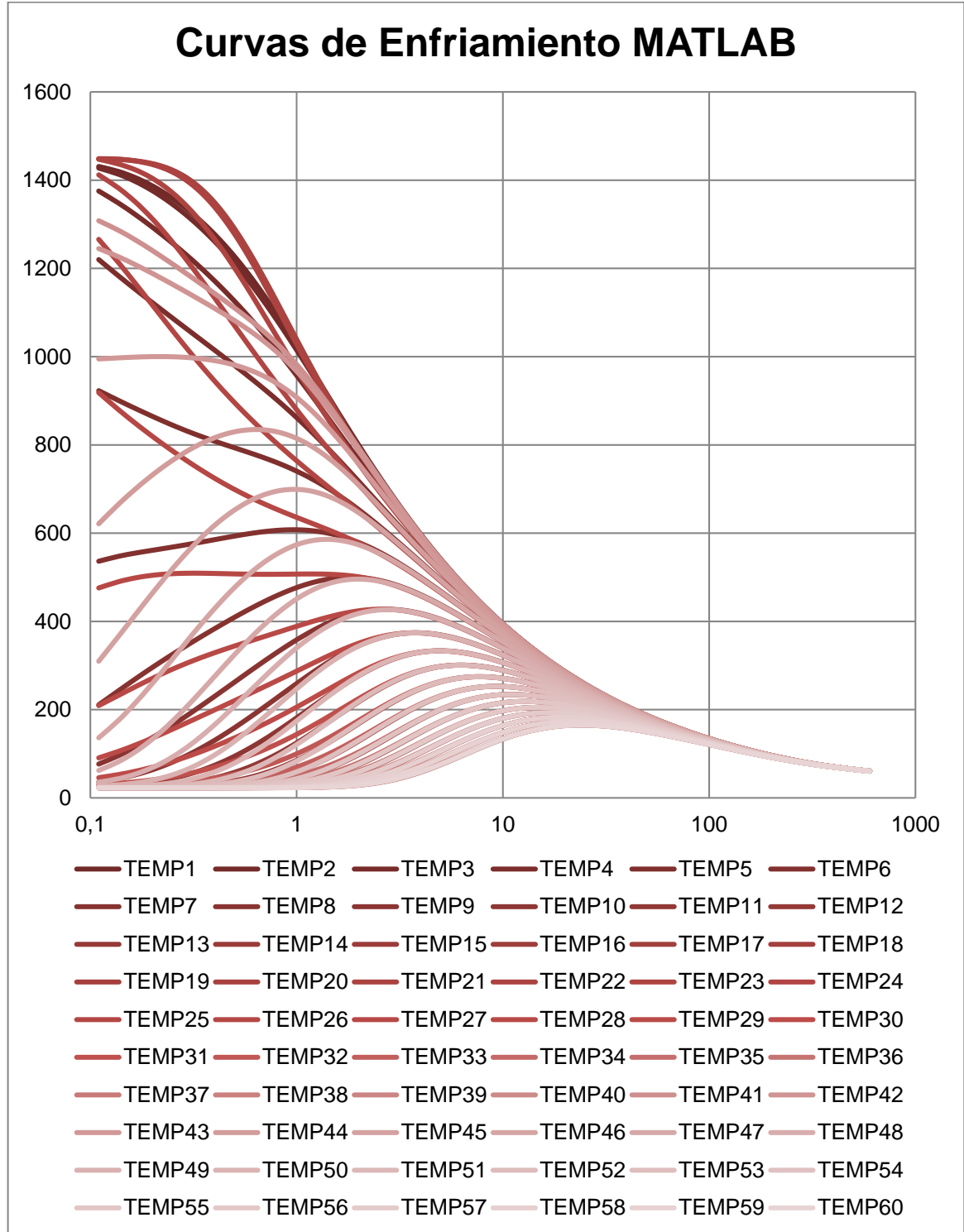
Fuente: Autores del proyecto

Tabla 5. Posición y referencia de los puntos graficados para la solución en MATLAB

Gráfica	Posición en $x$ para $y = 3,175$	Gráfica	Posición en $x$ para $y = 6,35$	Gráfica	Posición en $x$ para $y = 0$
TEMP1	1,06	TEMP21	1,06	TEMP41	1,06
TEMP2	2,12	TEMP22	2,12	TEMP42	2,12
TEMP3	3,18	TEMP23	3,18	TEMP43	3,18
TEMP4	4,23	TEMP24	4,23	TEMP44	4,23
TEMP5	5,29	TEMP25	5,29	TEMP45	5,29
TEMP6	6,35	TEMP26	6,35	TEMP46	6,35
TEMP7	7,41	TEMP27	7,41	TEMP47	7,41
TEMP8	8,47	TEMP28	8,47	TEMP48	8,47
TEMP9	9,53	TEMP29	9,53	TEMP49	9,53
TEMP10	10,58	TEMP30	10,58	TEMP50	10,58
TEMP11	11,64	TEMP31	11,64	TEMP51	11,64
TEMP12	12,70	TEMP32	12,70	TEMP52	12,70
TEMP13	13,76	TEMP33	13,76	TEMP53	13,76
TEMP14	14,82	TEMP34	14,82	TEMP54	14,82
TEMP15	15,88	TEMP35	15,88	TEMP55	15,88
TEMP16	16,93	TEMP36	16,93	TEMP56	16,93
TEMP17	17,99	TEMP37	17,99	TEMP57	17,99
TEMP18	19,05	TEMP38	19,05	TEMP58	19,05
TEMP19	20,11	TEMP39	20,11	TEMP59	20,11
TEMP20	21,17	TEMP40	21,17	TEMP60	21,17

Fuente: Autores del proyecto

Gráfica 1 Curvas de enfriamiento MATLAB

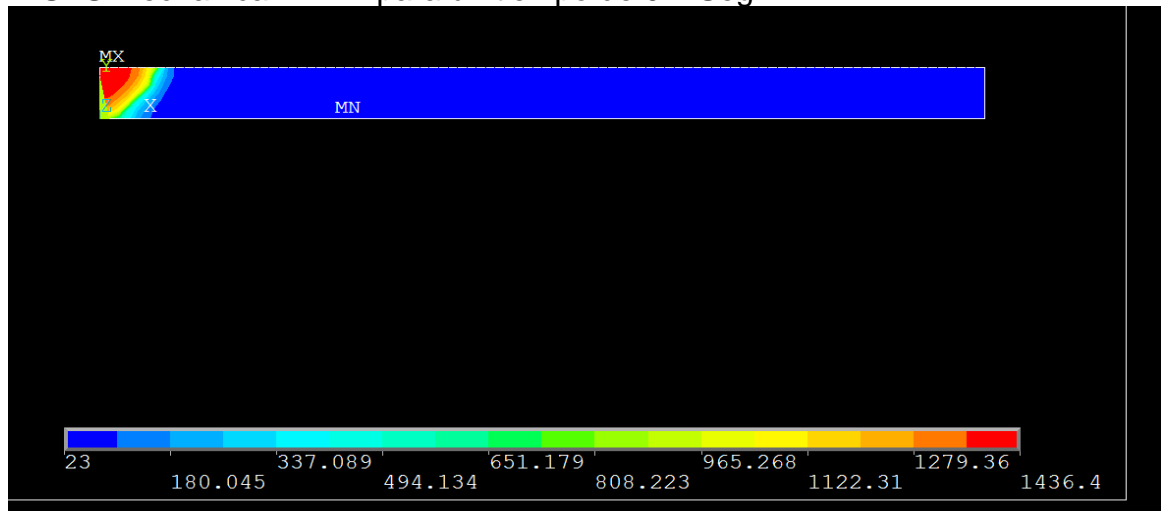


Fuente: Autores del proyecto

8.3.2. Solución obtenida por medio de la simulación en ANSYS®.

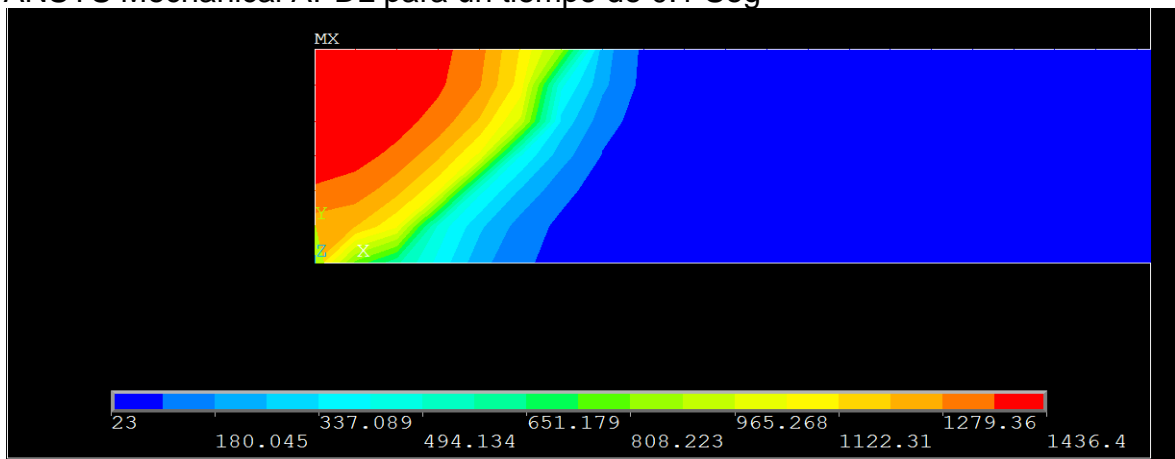
8.3.3. Figura 18 muestra una vista alzada del modelo geométrico solucionado por medio de ANSYS®, en esta figura se evidencia claramente el proceso de transferencia de calor, es claro que esta simulación llegó a ser visualmente mucho más eficiente que el modelo geométrico desarrollado por medio de MATLAB.

Figura 18. Vista completa de la distribución de temperaturas en la solución en ANSYS Mechanical APDL para un tiempo de 0.1 Seg



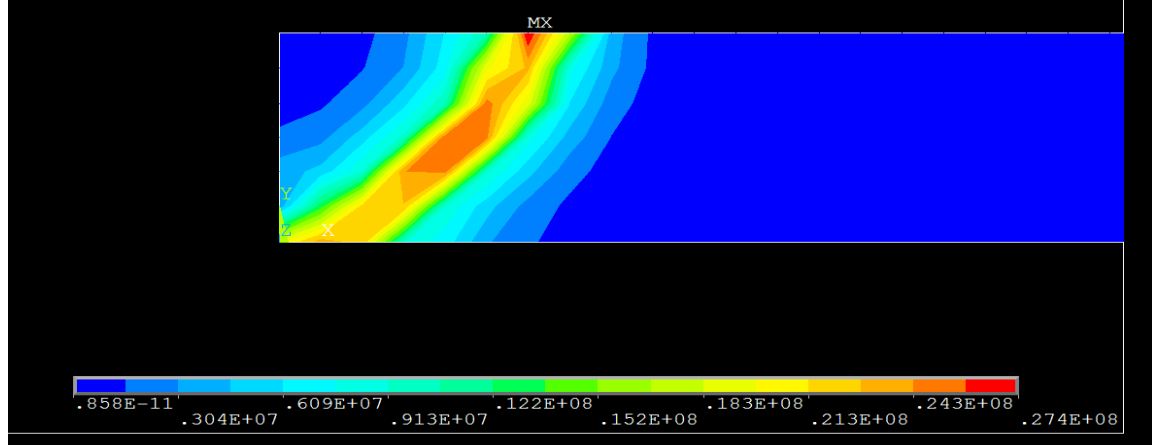
Fuente: Autores del proyecto

Figura 19. Vista parcial de la distribución de temperaturas en la solución en ANSYS Mechanical APDL para un tiempo de 0.1 Seg



Fuente: Autores del proyecto

Figura 20. Vista parcial del flujo de calor para un tiempo de 0.1 s.



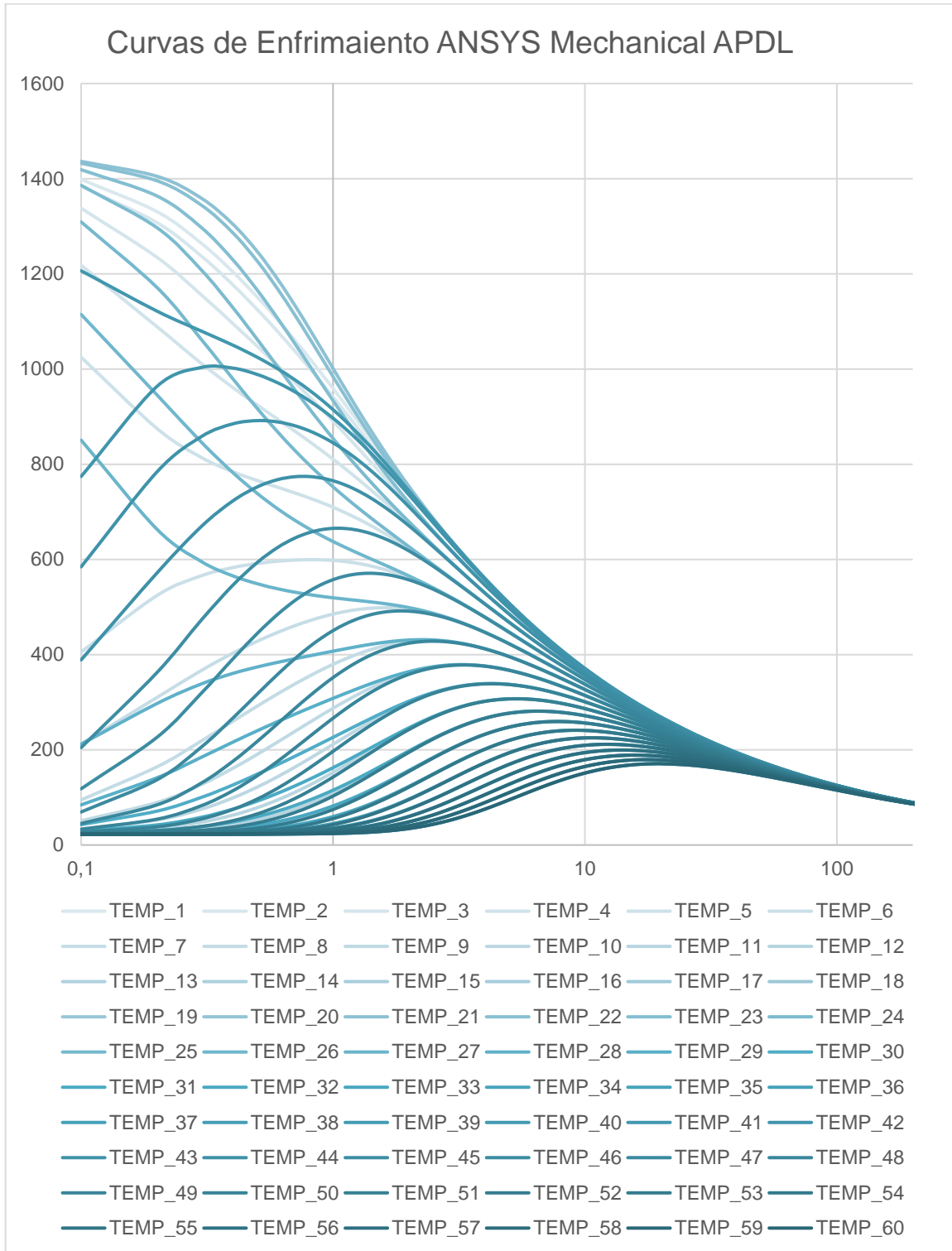
Fuente: Autores del proyecto

Tabla 6. Posición y referencia de los puntos graficados para la solución en ANSYS®

	Posición en x para y = 3,175		Posición en x para y =6,35		Posición en x para y = 0
TEMP_1	1,06	TEMP_1	1,06	TEMP_1	1,06
TEMP_2	2,12	TEMP_2	2,12	TEMP_2	2,12
TEMP_3	3,18	TEMP_3	3,18	TEMP_3	3,18
TEMP_4	4,23	TEMP_4	4,23	TEMP_4	4,23
TEMP_5	5,29	TEMP_5	5,29	TEMP_5	5,29
TEMP_6	6,35	TEMP_6	6,35	TEMP_6	6,35
TEMP_7	7,41	TEMP_7	7,41	TEMP_7	7,41
TEMP_8	8,47	TEMP_8	8,47	TEMP_8	8,47
TEMP_9	9,53	TEMP_9	9,53	TEMP_9	9,53
TEMP_10	10,58	TEMP_10	10,58	TEMP_10	10,58
TEMP_11	11,64	TEMP_11	11,64	TEMP_11	11,64
TEMP_12	12,70	TEMP_12	12,70	TEMP_12	12,70
TEMP_13	13,76	TEMP_13	13,76	TEMP_13	13,76
TEMP_14	14,82	TEMP_14	14,82	TEMP_14	14,82
TEMP_15	15,88	TEMP_15	15,88	TEMP_15	15,88
TEMP_16	16,93	TEMP_16	16,93	TEMP_16	16,93
TEMP_17	17,99	TEMP_17	17,99	TEMP_17	17,99
TEMP_18	19,05	TEMP_18	19,05	TEMP_18	19,05
TEMP_19	20,11	TEMP_19	20,11	TEMP_19	20,11
TEMP_20	21,17	TEMP_20	21,17	TEMP_20	21,17

Fuente: Autores del proyecto

Gráfica 2. Curvas de enfriamiento ANSYS Mechanical APD



Fuente: Autores del proyecto



8.3.4. Modelo matemático para las transformaciones de fase. Para la aplicación del modelo matemático se utiliza la regla de adición propuesta por Scheil para modelos no isotérmicos. Por medio de la (Ecuación 12) y la (Ecuación 13) se determina el coeficiente de Avrami y el exponente de Avrami para determinadas curvas de enfriamiento; para este caso se ha considerado el modelado de cinco curvas de enfriamiento relacionadas con las transformaciones de fase correspondientes al diagrama CCT representado en la Figura 1 y a las curvas de enfriamiento obtenidas por medio del modelo matemático de transferencia de calor.

Tabla 7. Valores obtenidos para el coeficiente de Avrami y el exponente de Avrami.

Velocidad de enfriamiento en centi-Segundos	Fase	Vi (% de transformación inicial )	Vf (% de transformación final)	Ti(Tiempo de transformación inicial)	Tf (tiempo de transformación final)	n	b
0.015	Bainita	0,0100	0,0200	2,3376	3,0465	2,6361	1,072E-03
0.025	Ferrita	0,0010	0,0100	1,9593	2,2036	19.639	1,005E-02
	Perlita	0,0100	0,1000	2,2036	2,6629	12,410	5,544E-07
	Bainita	0,0100	0,1500	2,6629	4,4728	5,3669	5,240E-05
0.04	Ferrita	0,0100	0,0300	2,5071	2,8941	7,7244	8,295E-06
	Perlita	0,0100	0,3500	2,8941	3,7458	14,569	1,900E-09
	Bainita	0,0100	0,2000	3,7458	8,6521	3,7032	7,555E-05
0.1	Ferrita	0,0100	0,1000	4,48776	5,49819325	11,572	2,865E-10
	Perlita	0,0100	0,8500	5,4982	9,96666819	8,8101	3,025E-09
	Bainita	0,0100	0,2000	9,96667	21,268164	4,0902	8,278E-07
0.25	Ferrita	0,0100	0,1500	9,9165	12,7770	10,981	1,150E-13
	Perlita	0,0100	0,8500	12,7770	21,6167	9,9663	9,443E-14
Fuente: Autores del proyecto							

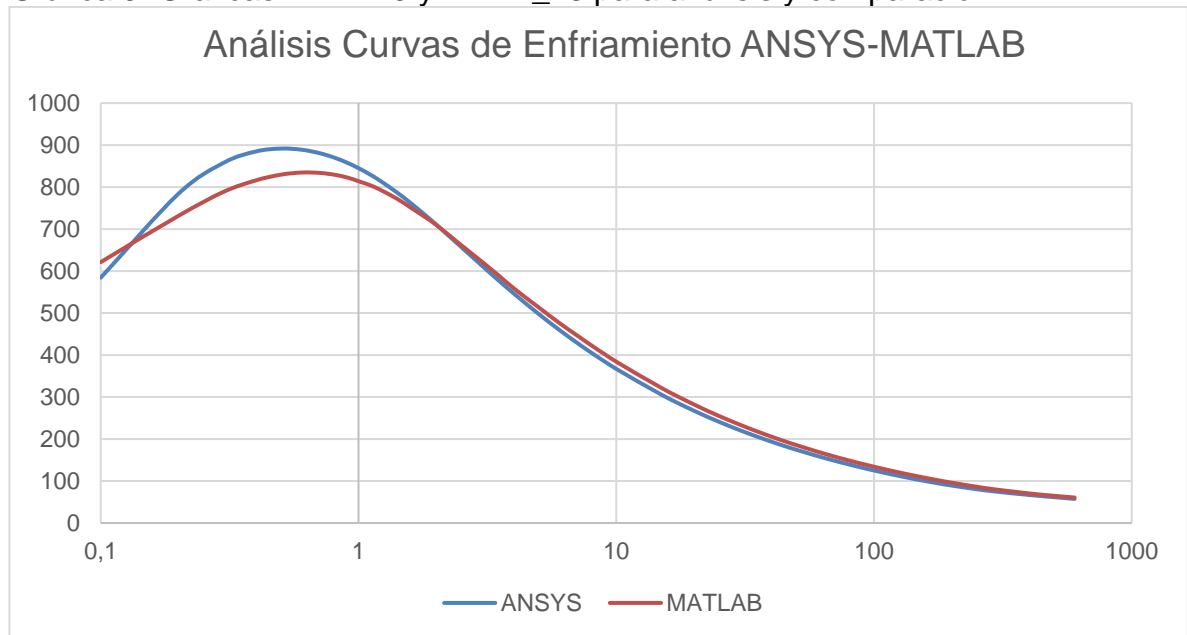
#### 8.4. COMPARACIÓN ENTRE EL MODELO MATEMÁTICO Y LA SIMULACIÓN POR MEDIO DE ANSYS MECHANICAL APDL.

Para realizar una comparación válida se ha tomado el mismo punto de análisis para el modelo matemático y para la simulación, el punto seleccionado es el que se acerca a la temperatura de autenticación del material, 850°C, en los procesos de temple la pieza se calienta hasta dicha temperatura para realizar el tratamiento térmico.

Con el fin de determinar la dureza del material por método gráfico se utiliza el diagrama CCT del acero AISI/SAE 1045, material similar en composición al Acero AISI/SAE 1040. Para determinar la dureza del material luego del enfriamiento se utiliza el tiempo de enfriamiento  $t_{8-5}$ , que es básicamente el tiempo que emplea el material en pasar de 800 °C a 500°C, la Gráfica 3.

La Tabla 8 muestra los tiempos obtenidos para las temperaturas de 800°C y 500 °C para el modelo matemático (MATLAB) y para la simulación por medio de ANSYS, cabe resaltar que los datos mostrados corresponden a un mismo punto evaluado por medio del modelo y la simulación, la siguiente gráfica muestra las curvas relacionadas para la comparación del modelo y la simulación.

Gráfica 3. Graficas TEMP23 y TEMP\_23 para análisis y comparación.



Fuente: Autores del proyecto

Tabla 8. Velocidad de enfriamiento, Comparación entre modelos ANSYS y MATLAB

	T1(°C)	T2(°C)	t1(s)	t2(s)	t8-5(s)	Velocidad de enfriamiento(°C/s)
<b>ANSYS</b>	800	500,19	1,318243	4,9453	3,627	82,6593
<b>MATLAB</b>	799,9616	499,8651	1,67446	5,68218	4,0077	74.8556

Fuente: Autores del proyecto

8.4.1. Parámetro de refrigeración. El parámetro de enfriamiento se refiere al tiempo que se requiere para el enfriamiento de 800°C a 500 °C expresado en unidades de centi-segundos. En la Tabla 9 se muestran los parámetros de enfriamiento obtenidos para los puntos TEMP23 y TEMP\_23 en el modelo matemático y la simulación.

Tabla 9. Parámetro de enfriamiento para ANSYS y MATLAB

	<b>ANSYS</b>	<b>MATLAB</b>
<b>Velocidad de enfriamiento</b>	82,659302	74,8553
<b>Parámetro de enfriamiento</b>	0.036271	0.040077

Fuente: Autores del proyecto

Para poder obtener la dureza se realizó una regresión con base en las durezas y parámetros de enfriamiento de la Figura 1. Diagrama CCT para un acero 1045, con temperatura de austenización de 850°C.

Tabla 10. Datos para regresión estadística.

<b>PDE</b>	<b>Dureza (HV)</b>
0,008	682
0,015	654
0,025	570
0,04	430

Fuente: Autores del proyecto

Con base en la Tabla 10 se realiza la regresión polinómica de tercer grado y se obtiene la (Ecuación 20)

$$y = 7000000x^3 + -591059x^2 + 6763.4x + 662.18 \quad (\text{Ecuación 20})$$

$$R^2 = 1$$

Solucionando la (Ecuación 20) se obtienen los valores de dureza representados en la siguiente tabla:

Tabla 11 Durezas resultantes en el material, obtenidas del modelo matemático y la simulación, según diagrama CCT.

<b>Parámetro de enfriamiento</b>	<b>Dureza Obtenida (HV)</b>	<b>Dureza Obtenida (HRC)</b>
0.040077	434.4889	43.95
0.036271	463.9335	46.45
Fuente: Autores del proyecto		

8.4.2. Análisis y comparación con diagramas CCT. A partir del modelo matemático desarrollado en MATLAB® y proceso de simulación en ANSYS® se obtienen numerosas curvas de enfriamiento en los nodos pertenecientes a la zona afectada por el calor, producto de los distintos puntos medidos perpendicularmente a diferentes distancias desde el centro del cordón de soldadura hacia el metal base. Para el estudio de este proyecto se ha delimitado como zona de interés la Zona Afectada por el Calor (ZAC) en las que principalmente se presentan las alteraciones micro estructurales que puede afectar el material, y cambios de fase más significativos en la junta y bajo los cuales se van a poder establecer las propiedades mecánicas de la unión con el fin de que cumpla los requisitos de diseño.

Se seleccionan dos de los puntos dentro de la ZAC para realizar el respectivo análisis de lo sucedido dentro de esta, obteniéndose los parámetros de enfriamiento mostrados en la Tabla 9, los cuales permite conocer las transformaciones de fase durante el proceso de enfriamiento, para los dos casos se aprecia una estructura similar por lo cual se realiza solo una descripción de las transformaciones de fase.

8.4.3. Transformaciones de fase: durante el proceso de enfriamiento se obtiene un parámetro de enfriamiento equivalente a 0.04, para esta curva de enfriamiento según la Figura 11 se obtiene un 3% de ferrita, un 35% de perlita y un 20% de bainita, el porcentaje restante corresponde a la martensita alcanzada durante el proceso de enfriamiento.

## 9. CONCLUSIONES

Finalizado el análisis teórico correspondiente al proceso de soldadura se concluye que los parámetros como corriente, voltaje y espesor de placa definen la máxima temperatura del charco formado por el proceso de soldadura, así como la cantidad de calor que se va a aportar y la porción de material base que se verá afectado por el mismo; pero para la zona afectada por el calor, sea cual sea la temperatura alcanzada en el cordón, se alcanzan temperaturas de austenización que, acompañadas de un enfriamiento inadecuado, influyen negativamente en las propiedades mecánicas del material. Cabe resaltar que, a mayor corriente aplicada, mayor será el calor aportado y por lo tanto la zona afectada por el calor será mayor, creando cambios de propiedades en un volumen mayor del material base. Por otro lado, el espesor del metal base será directamente proporcional al tamaño de la zona afectada por el calor, pues para crear una junta homogénea será necesario aportar más calor para fundir el material.

Según el análisis teórico del modelo matemático, los parámetros del proceso de soldadura no influyen como variable en ninguna de las ecuaciones propias de la transferencia de calor, cabe resaltar que los parámetros de proceso definen constantes del análisis, pero no afectan el modelo matemático.

Se incorporan, por medio de un modelado matemático, las ecuaciones que describen el proceso de soldadura, regido básicamente por ecuaciones de transferencia de calor por convección y conducción, para obtener velocidades de enfriamiento a diferentes distancias del cordón de soldadura, que permitieron realizar un apropiado análisis de las transformaciones de fase.

Se puede afirmar que el uso de las diferencias finitas permite un análisis completo de modelos de transferencia de calor sencillos como los relacionados con figuras rectangulares y triangulares en su defecto. Cabe notar que para el correcto funcionamiento del modelo matemático se deben tomar los parámetros de restricción asociados a los nodos y con base en ellos definir las variables dependientes de valores como BIOT y Fourier.

Los modelos matemáticos para las diferencias finitas requieren un análisis teórico previo de las condiciones obtenidas durante el proceso de enfriamiento para ser aplicados correctamente para la obtención de las transformaciones de fase en la zona afectada por el calor, por lo cual desde el alcance actual de recursos nos es posible desarrollar un único modelo que satisfaga la necesidad completa de modelado del proceso de soldadura y transformaciones de fase.

Se puede evidenciar que los dos modelos planteados muestran resultados satisfactorios que permitirán continuar con el proceso de análisis micro estructural de la zona afectada por el calor, presentando curvas de enfriamiento con diferencias no relevantes para el análisis final.

La geometría y enmallados utilizados para la simulación se obtuvieron por medio de una serie de iteraciones que garantizaran resultados precisos, sin llegar a aumentar significativamente la cantidad de datos procesados, evitando así una demanda excesiva de recursos computacionales; de tal manera que pudieron ser usados en el software ANSYS sin ningún problema para llevar a cabo la simulación en los dos ejes, debido a que el comportamiento en el eje Z, por las dimensiones de la placa, no presentará variación significativa. Siendo, de esta manera, suficiente una simulación de dos dimensiones para poder realizar la comparación con el modelo de diferencias finitas.

Un modelo matemático por diferencias finitas puede proveer un resultado muy aproximado al de una simulación por medio de ANSYS Mechanical APDL, reduciendo costos en los procesos de análisis, ya que se obtienen resultados similares entre los dos métodos, con proporciones de error poco relevantes; permitiendo la aplicación e implementación de manera confiable a quienes lo requieran, para optimizar la calidad de sus productos y procesos.

Las microestructuras y las durezas finales se infieren por medio de las velocidades de enfriamiento, obtenidas del modelo matemático y la simulación por elementos finitos, empleadas para analizar por medio del diagrama CCT y las ecuaciones de la regla de la adición los cambios de propiedades mecánicas, llegando a porcentajes de micro-constituyentes, tiempos de transformación de cada uno y las propiedades finales de dureza. Por medio del modelo matemático se evidencian resultados similares a los obtenidos por medio de ANSYS Mechanical APDL, donde el modelo matemático tiene un 5.39% de error contra la simulación realizada en ANSYS Mechanical APDL, por lo cual se pueden trabajar procesos simples de transferencia de calor sin necesidad de implementar un software costoso como el ya mencionado.

## BIBLIOGRAFÍA

ADAMS, Brent L, et al. *ASM Metals Handbook*. ASM internacional, 2004.

AMERICAN WELDING SOCIETY . *Welding Handbook: Welding Science Ans Technology Ninth Edition*. USA, 2001.

ANSYS®. *Element Library, PLANE55*. 2013.

ASKELAND, Donald R. *Ciencia e ingeniería de los masteriales*. International Thomson Editores, 1998.

BELLETT, M., et al. "New numerical technologies for the simulation of arc welding processes." 2009.

BULLON, C., et al. "simulación de un proceso de soldadura mediante un modelo termo-mecánico considerando el efecto de esfuerzos residuales utilizando el método de los elementos finitos." 2007.

CENGEL, Yunus A. *Transferencia de calor y masa*. México D.F.: McGraw-Hill Interamericana Editores, 2007.

ELVIRA, Gustavo y SANZI, Claudio. "Proceso de reparación de plaqueado sobre una conexión de un recipiente de presión. Evaluación de la distribución térmica. Planteo de dos modelos de elementos finitos 2D y 3D comparación de resultados." 2004.

ESAB-CONARCO. *Soldar Conarco. Publicación N° 129. 5-14*. 2007.

FRAUNHOFER INSTITUTE FOR LASER TECHNOLOGY ILT. "Simulation of laser welding subject to alternations in specifications in specifications and other technical information." 2011.

GIMÉNEZ, Maria. et al.,. "Simulación de un tratamiento térmico mediante elementos finitos." *TRATER Revista del tratamiento térmico*, 2013: Pag. 41-50.

HOLMAN, J.P. *Heat Transfer, Ten Edition*. New York, 2010.

INCROPERA. F:P. *Heat and mass transfer, Seven edition*. USA, 2011.

K. POORHAYDARI, K. PATCHETT, B AND IVEY, D. "Estimation of Cooling Rate in the Welding of Plates with Intermediate Thickness." 2005.

KERN, Donald Q. "Procesos de transferencia de calor." Compañía editorial continental, S.A. de C.V., 1999.

KLOSTER, M., et al. "Evaluación del ciclo térmico sobre una cañería, producida por una soldadura tipo GMAW planteo de soluciones analíticas y computacionales y su comparación experimental utilizando termocuplas." 2008.

KONRAD, Adamus. "Simulation of the electron beam welding process." *Journal Computers and Structures VOL. 89*, 2011: 977-985.

KOU, Sindo. "Welding metallurgy." Wiley-Interscience, 2003.

KRAUSS, George. *Steeld: Processing, Struture, and performance*. 2005.

LIEDTKE, Dieter. *Bainitisieren Kontinuierliches oder isothermisches Umwandeln in der Bainitstufe*. 2014.

M Atkins BSc, BMet, FIM. *Atlas of Continuous Cooling Transformation Diagrams for Engineering Steels*. AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1980.



MARTÍNEZ, E.; ESTREMS, M. y V., Miguel. "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." 2010.

MEJIA I., et al. "Esfuerzos residuales generados en la soldadura de placas de acero inoxidable AISI 304 mediante el proceso SMAW." 2006.

MENEZES N., Rafael, et al. *ASM handbook*. Vol. 6. ASM International, 1993.

MURPHY, Anthony B., et al. "CFD Modelling of arc welding-the importance of the arc." Melbourne, 2009.

NIW C., Chang y ABD RAHIM, Abu B. "Finite elements modeling of arc welding joints." MALAYSIA, 2007.

ORTEGA G., Manuel R. n.d.

[http://www.uco.es/~fa1orgim/fisica/archivos/guias/T01\\_Conceptos\\_previos.pdf](http://www.uco.es/~fa1orgim/fisica/archivos/guias/T01_Conceptos_previos.pdf)  
(accessed Septiembre 22, 2013).

PEREYRA, S., et al. "Modelado numérico del proceso de soldadura por fricción agitación en aceros inoxidable." 2008.

RAMOS, Morales F., et al. "Modelo de elementos finitos para determinar el campo de temperatura en una costura de filete." 2007.

SANZI, Héctor; ELVIRA, Gustavo y TUREL, Alejandro. "Simulación computacional del procedimiento de soldadura en servicio empleado en la reparación estructural de un gasoducto." 2012.

SASS-TISOVSHAYA, Margarita. "Plasma arc welding simulation with open FOAM." GÖTEBORG, 2009.

SPILE-KOHOFF, Andreas. "Simulation of gas metal arc welding with CFX-5; CFX Berlin Software GMBH." 2004.

TAFUR C., Edgar W. *Scribd*. n.d. <http://es.scribd.com/doc/86957747/Esfuerzo-termico> (accessed Septiembre 22, 2013).

THOMAS W., Eagar. "Fundamental of welding." In *Welding, Brazing, and soldering*, by ASM internacional, 15-82. 2004.

TORSTEN, Ericsson. "Principle of heat treating of Steels." In *ASM Handbook Heat treating*, by Arai., et al. TOHRU. Sweden, 2004.

VISHNU, P Ravi. "Solid-state transformation in weldments." In *Welding brazing and soldering*, by Rafael, et al. MENEZES NUNES, 177-229. Luleá, 1993.

ZIENKIEWICZ, O.C. "El método de los elementos finitos." Barcelona: Editorial Reverté, S.A., 1982.