Modelamiento de los esfuerzos residuales presentes en una unión soldada de acero 1045 realizada mediante el método SMAW para una junta en V

Anji Paola Cabrera Romero

James Daniel Bulla Oñoro

Trabajo de grado para la obtención del título de tecnólogo mecánico industrial

Tutor de proyecto
Ing. Carlos Arturo Bohórquez Ávila

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad Tecnológica

Tecnología en Mecánica Industrial

Bogotá D.C
2021

CONTENIDO

pág.

RESUMEN	3
INTRODUCCIÓN	3
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.1 Justificación	5
1.2 Estado del arte	5
1.3 Objetivo	7
1.3.1 Objetivo general	7
1.3.2 Objetivos específicos	7
1.4 Metodología propuesta	7
2. MARCO TEÓRICO	9
2.1 Elementos finitos	9
2.2 Soldadura manual de metal por arco (SMAW)	9
2.2.1 Zona afectada por el calor (ZAC)	10
2.2.2 Parámetros de soldadura	12
2.2.3 Ciclo térmico	13
2.3 Acero 1045	15
2.3.1 Soldabilidad	15
2.3.2 Propiedades	16
2.3.3 Composición química	16
2.3.4 Microestructura	16
2.3.4.1 Ferrita	17
2.3.4.2 Perlita	18
2.4 Frases presentes después de la soldadura	18
2.4.1 Austenita	18
2.4.1.1 Austenita retenida	19
2.4.2 Transformación de fases	19
2.4.2.1 Fracción volumétrica de austenita	20
2.4.2.2 Martensita	21
2.4.2.3 Temperatura de Inicio (Ms) y fin de martensita (Mf)	21
2.4.2.4 Temperaturas críticas	22
2.4.2.5 Fracción volumétrica de martensita	23
2.4.2.6 Temperaturas para el porcentaje de martensita	23
2.5 Esfuerzos residuales	23
2.5.1 Esfuerzos residuales en soldadura	24
2.5.2 Ley de Hooke	25
2.5.2.1 Deformación en las transformaciones de fase	27

CONTENIDO

	pág
2.5.2.2 Modelo plástico de transformación bilineal	27
2.5.2.2.1 Esfuerzo con deformación plástica bilineal	28
3.DESARROLLO	30
3.1 Simulación del proceso de soldadura	30
3.1.1 Modelamiento de la pieza	30
3.1.2 Análisis térmico transitorio de la transferencia de calor	31
3.1.2.1 Datos iniciales	31
3.1.2.2 Enmallado	31
3.1.2.3 Variables térmicas	32
3.1.2.4 Resultados en el campo térmico	33
3.1.2.5 Temperatura en nodos	35
3.2 Transformaciones de fase	36
3.2.1 Velocidades de enfriamiento	36
3.2.2 Curvas de enfriamiento	38
3.2.2.1 Parámetros curva de enfriamiento	42
3.2.3 Porcentaje de cada fase	42
3.2.4 Fracción volumétrica de cada fase	43
3.3 Esfuerzos residuales	44
3.3.1 Cálculo de esfuerzos	44
3.3.2 Cálculo de esfuerzos residuales por modelo plástico	46
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	52
5. CONCLUSIONES	55
BIBLIOGRAFÍA	56

RESUMEN

Este trabajo se centró en la búsqueda de los esfuerzos residuales producidos por una unión soldada en una junta en V de acero AISI 1045, por medio de soldadura por fusión, manual de metal por arco (SMAW) la cual fue modelada mediante el software Ansys, en la interfaz Workbench teniendo en cuenta el análisis térmico transitorio. Fue necesario considerar las propiedades del material e investigar a fondo sobre los parámetros de soldadura del método elegido, con el objetivo de obtener la mejor versión de la simulación.

Con los datos suministrados por el software, se realizó un análisis térmico con fuentes puntales transitorias de la temperatura calculada para la fusión, con el perfil térmico y con referencia al diagrama CCT del material se realizaron las curvas de enfriamiento donde se puede apreciar la velocidad, teniendo en cuenta estos parámetros es posible determinar las transformaciones de fase ocurridas en la junta antes y después de hecha la soldadura y su respectivo enfriamiento.

Finalmente, se realizó el cálculo de las deformaciones a partir de las transformaciones de fase del material, su cambio de longitud, y porcentaje de carbono, se usa la ley de Hooke para determinar la magnitud de los esfuerzos residuales transversales presentes en el material después del proceso de soldadura. Después de esto y teniendo en cuenta todo el proceso, es posible determinar y analizar oportunamente las consecuencias y afectaciones, principalmente en la zona afectada por el calor.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las simulaciones en software permiten que el diseño y la fabricación de algún producto o proceso sea más seguro y efectivo, la soldadura es un procedimiento muy habitual en la industria, ya que permite unir una o más piezas con la garantía de que habrá seguridad a la hora de su operación y también, es una alternativa económica comparada con otras del mercado. Sin embargo, existe una incertidumbre al realizar la soldadura en el acero, este radica en los esfuerzos residuales presentes al calentar de forma desigual los elementos, por esto, resulta pertinente hacer una evaluación previa de ellos, simulando su análisis térmico mediante el método de elementos finitos (AEF) y de tal manera, poder realizar un análisis completo y exacto.

Así mismo, hay diversas investigaciones donde se ha realizado exhaustivamente este proceso de simulación de soldadura, el cual se

desarrolla de forma real para evaluar la similitud existente entre ambos métodos; el diseño por elementos finitos es habitual para el modelamiento de juntas con el objetivo de saber cuáles son los esfuerzos residuales presentes en los modelos. Sin embargo, en la mayoría de los casos, estos materiales son sometidos a algún tratamiento térmico que cambia sus condiciones iniciales y no es conocido el comportamiento de algún material sin estas alteraciones.

Teniendo en cuenta lo anterior, el siguiente trabajo pretende lograr un análisis térmico-estructural para una simulación de soldadura, realizando un modelamiento que permita obtener, evidenciar y entender el comportamiento del material al ser soldado; la variación de temperatura a lo largo del mismo provoca en la pieza transformaciones de fase y estás a su vez, presentan alteraciones en propiedades físicas que terminan por dar esfuerzos residuales que ayudan a comprender las capacidades del material.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La soldadura es uno de los métodos de unión estructural más usados en la actualidad, pues permiten una unión total de las piezas y además una alta resistencia la rotura; a nivel industrial, la calidad de las uniones es imprescindible para el desarrollo de procesos productivos, sin embargo, existen algunas desventajas o problemáticas al momento de soldar en uniones tipo V debidas a la temperatura como lo son las tensiones residuales presentes en el material base, que podrían causar cambios adimensionales en el material, fracturas o rompimientos [1], principalmente en la zona afectada por el calor (ZAC), lo que haría que la pieza no sea apta para operar. El reconocer e identificar esfuerzos residuales ayuda en un proceso de fabricación tan aplicado como lo es la soldadura a conocer y delimitar con claridad los alcances a los que cierta unión, junta o pieza puede operar sin complicaciones o riesgos [2].

Los materiales con los que se realizan procesos de soldadura generalmente son sometidos a tratamientos térmicos (T.T) con el objetivo de incrementar sus capacidades, por esta razón y luego de realizar una recopilación de literatura relacionada con el tema, no se encontró mucha evidencia de aplicaciones con materiales sin ningún tipo de T.T anterior al proceso de soldadura, así que surge la incógnita de cuál sería el comportamiento, en este caso, de un acero 1045 cuando es usado para soldadura y cómo serían sus esfuerzos residuales si no se le realiza ningún T.T, con la idea de que ante una eventual aplicación real, no hayan fallas durante su funcionamiento.

1.1 Justificación

Es de gran importancia predecir las tensiones residuales en una junta soldada para la elaboración de nuevas estructuras metálicas y elementos de unión menos susceptibles a fallas, de esta manera, se pueden realizar diseños más eficientes de uniones soldadas, evitando problemas inesperados durante la fabricación de éstos, y a lo largo de la vida útil, ahorrando el tiempo que se consumiría en solucionarlos después de fabricados. En la actualidad, hay diversas herramientas que facilitan este proceso de diseño y tienen la meta de optimizar lo mayor posible dicho proceso; la implementación de software de simulación proporciona un concepto en el diseñador de cómo podría ser el funcionamiento en la realidad, de tal manera que el fabricante conoce las capacidades y posibilidades que tiene con dicho material para cierta labor.

La simulación de esfuerzos residuales permite identificar factores variables y condiciones con anticipación a un proceso real, evitando así tener que hacer un análisis destructivo de las uniones, lo que genera un beneficio económico puesto que la inversión en maquinaria y materiales para ensayos suele tener un costo elevado.

En la industria metalmecánica existen varias aplicaciones en las que diversos tipos de juntas son implementadas, dichas juntas son seleccionadas en vista de qué tan viables son en cierta aplicación, por lo cual surge la necesidad de analizar las uniones y evaluar bajo qué condición(es) tendrá el mejor desempeño.

1.2 Estado del arte

En el trabajo de Bullón se aborda la simulación de la soldadura como un proceso que servirá para predecir el comportamiento del material empleado y las complicaciones y/o cambios que este sufre para el proceso; se utilizó el programa SolidWorks para dicha simulación y a partir de allí, se realizaron diagramas con diferentes variables como temperatura o propiedades mecánicas para hacer un amplio análisis de las condiciones brindada por el material, tenía como fin evaluar los cambios presentes durante y después del tratamiento y a través de la simulación se busca comprender las consecuencias y las nuevas condiciones en el material.[2]

Bate y sus colegas realizaron mediciones a uniones soldadas por medio de simulaciones en dos programas: ABAQUS y SYSWELD, bajo el método de elementos finitos se busca saber las condiciones que ofrece

la pieza en la región soldada, para validar y ver la precisión de estos resultados, también se realizaron ensayos experimentales reales en dos probetas (A y B). La tercera probeta la cual es la C fue la modelada para sus resultados de simulación. El motivo de hacer la simulación con elementos finitos en este artículo parte de ver la diferencia con resultados experimentales reales con los valores de esfuerzos residuales se puede hacer una idea de la vida útil de la pieza y las condiciones ideales para su operación.[3]

En 2017, Zheng y sus colegas identificaron el comportamiento de las tensiones residuales en un acero 304L que fue sometido a un tratamiento de impacto ultrasónico, por medio de una simulación realizada con software ABAQUS, la investigación se desarrolló con dos tipos de soldadura, en junta de tope y junta T, observando esfuerzos longitudinales, transversales, y a través del espesor para poder compararlos con resultados experimentales. [4]

En el artículo de Launert, se presenta una estrategia de medición y comparación de dos aceros en perfil tipo I sometidos a soldadura, consistía en realizar un ejercicio experimental evaluando composición química de materiales base y los parámetros de soldadura, y luego soldar bajo la norma ISO 9447, por arco metálico con gas y proceder a la medición de las tensiones por medio del método de secciones con galgas, posteriormente, realizar una simulación numérica en el software con transformación de fases tipo SPM Y MPM con simetría horizontal; finalmente, verificaron si los resultados eran similares y que tan posible es partir de una sola de ellas para la construcción de una estructura.[5]

El trabajo realizado por Ramos buscó simular varias uniones soldadas por medio del software de simulación Sysweld, para obtener así valores de ciclo térmico y esfuerzos residuales presentes por el enfriamiento desigual de las juntas, además se compararon con resultados experimentales realizados anteriormente, luego, el trabajo simuló reparaciones en las uniones soldadas, evidenciando el cambio de los esfuerzos residuales y finalmente, se realiza un análisis mediante la norma BS7910 como adición de la comparación .[6]

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Obtener los esfuerzos residuales presentes en una unión soldada de acero 1045 realizada mediante el método SMAW para una junta en V

1.3.2 Objetivos específicos

- Simular mediante el software ANSYS el proceso térmico transitorio ocurrido en las juntas cuando se realiza el proceso de soldadura.
- Identificar las transformaciones de fase presentes en el material al ser sometido a un cambio térmico cuando se realiza la unión soldada.
- Establecer el estado de esfuerzos residuales en una junta en V de un acero 1045.

1.4 Metodología propuesta

- **Etapa 1**

Recolección de documentos relacionados con el tema propuesto: En primer lugar, se recolectó información para entrar en contexto sobre los estudios previos y los alcances en el tema; también se investigó sobre los métodos para obtener los resultados esperados.

Elección del software y parámetros experimentales: De acuerdo con las expectativas propuestas, se usó el software ANSYS debido a que proporciona un análisis completo para diversos tipos de necesidades (térmico, estructural, etc.) y su interfaz presenta un fácil manejo. Se escogió un acero 1045 con una junta en V.

Aprendizaje y manejo del programa: Con ayuda del docente director, el cual orientó el manejo e instrucciones para hacer uso del programa, se realizaron tutorías y clases guiadas.

- **Etapa 2**

Experimentación y modelado: Se propuso modelar la junta seleccionada previamente y en el proceso sus dimensiones fueron asignadas, con la junta modelada y con ayuda del software ANSYS se introdujo en el sistema propiedades del material.

Análisis térmico: Una vez realizada la introducción de parámetros en el software, se consultaron los valores correspondientes a la temperatura de soldadura y el coeficiente de convección para simular la distribución de calor una vez terminado el proceso.

- **Etapa 3**

  Análisis de transformaciones de fase: A partir de los datos obtenidos en el análisis térmico, fue necesario tomar valores como la velocidad de enfriamiento y el cambio de temperatura para determinar qué fases están presentes en el material una vez realizada la soldadura, y también la cantidad presente de las mismas.

  Evaluación de esfuerzos residuales: Con las fases ya definidas, se pudo apreciar cuáles son los cambios de forma o de longitud y, por ende, se obtuvieron los esfuerzos residuales existentes en la junta.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Elementos finitos

El Método de Elementos Finitos (MEF) es un método numérico ampliamente utilizado para la solución de problemas de Ingeniería y física, dado que permite resolver sistemas de ecuaciones diferenciales parciales, las cuales se dificultan analíticamente o con modelos matemáticos simples. Este método se fundamenta en la discretización de un medio continuo, es decir dividir la estructura de estudio en una serie de subdominios “Elementos Finitos” con determinadas condiciones de vínculo entre los mismos, con el fin de generar sistemas lineales, que permitan la evaluación del medio, con la ayuda de herramientas computacionales, debido a que el número de incógnitas es directamente proporcional al número de nodos generados en la discretización. [7]

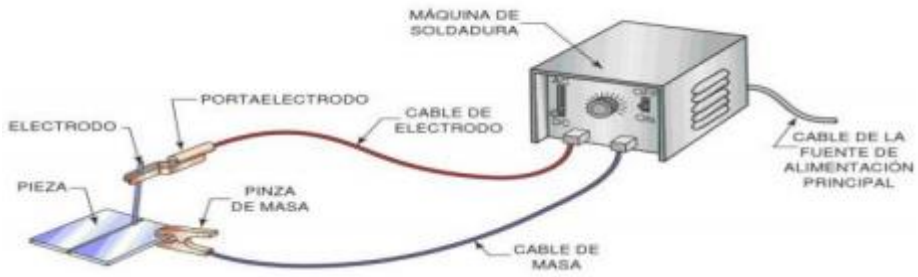
2.2 Soldadura manual de metal por arco (SMAW)

La soldadura manual del metal por arco (SMAW) es un proceso que funde y une metales calentándose con un arco establecido entre un electrodo revestido en forma de varilla y los metales, como se muestra en la figura 1(a) usualmente se denomina soldadura de varilla. El portaelectrodo se conecta mediante un cable de soldadura a un terminal de la fuente de energía y la pieza de trabajo se conecta a través de un segundo cable al otro terminal de la fuente de energía (Figura 1 a).

El núcleo del electrodo revestido, el hilo del núcleo, conduce la corriente eléctrica al arco y proporciona el metal de relleno para la unión. Para el contacto eléctrico, los 1,5 cm superiores del hilo central están desnudos y se sujetan con el portaelectrodos. El portaelectrodo es esencialmente una pinza metálica con una cubierta exterior aislado eléctricamente para que el soldador lo sujete con seguridad.

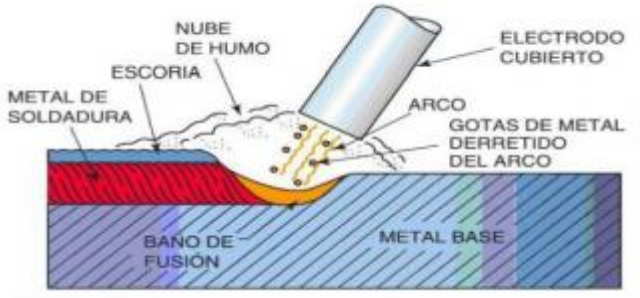
El calor del arco hace que tanto el alambre del núcleo como la cubierta de fundente en la punta del electrodo se fundan en forma de gotas (Figura 1b). El metal fundido se acumula en el baño de soldadura y se solidifica en el metal de soldadura. El fundente más ligero, por el contrario, flota en la superficie del baño y se solidifica formando una capa de escoria en la parte superior del metal de soldadura. [8]

Figura 1(a). Equipo de soldadura por arco Metálico Protegido SMAW.



Fuente: Larry Jeffus. Soldadura Principios y Aplicaciones. [Imagen].Ediciones Paraninfo, S.A, 2009. [Consultado en mayo de 2021]

Figura 1(b). Características de soldadura por proceso SMAW.



Fuente: Larry Jeffus. Soldadura Principios y Aplicaciones. [Imagen].Ediciones Paraninfo, S.A, 2009. [Consultado en mayo de 2021]

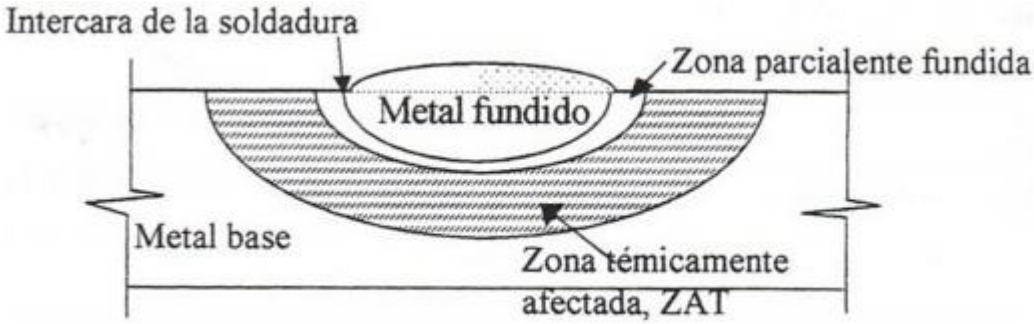
2.2.1 Zona afectada por el calor (ZAC)

Es aquella parte del metal base adyacente al metal de soldadura, la cual ha sido calentada a una temperatura suficientemente alta como para sufrir algún cambio físico significativo y detectable, pero que en general no se ha fundido. El cambio físico puede ser un crecimiento de grano o un revenido en caso de que el acero haya sido templado; o un endurecimiento del acero con o sin crecimiento de grano.

Los materiales que se endurecen por disolución suelen verse menos afectados, a menos que hayan sido endurecidos por el trabajo y, por tanto, no pueden tratarse por separado. Resulta del calentamiento entre las temperaturas A1 (temperatura eutéctica) y la temperatura peritéctica (temperatura en que una fase líquida reacciona con una fase sólida para formar una fase sólida nueva y diferente). Durante el enfriamiento el tiempo de permanencia de la ZAC entre las temperaturas A3 y A1 es muy corto. Está sometida a un duro ciclo térmico, donde el

calentamiento, el consumo y el tiempo de enfriamiento influyen sobre el tamaño de grano.

Figura 2. Esquematización de la zona afectada por el calor en una unión soldada



Fuente: CORREA, Fabián. ANÁLISIS MICROGRÁFICO DE UNA UNIÓN SOLDADA CON POSTCALENTAMIENTO EN UN ACERO AISI/SAE 1045 en doble fase.

La ZAC está compuesta a su vez de tres zonas: zona de grano parcialmente refinado (ZGM), zona de grano refinado (ZGF) y zona de grano grueso (ZGG). El crecimiento del grano no es equilibrado y este no recristaliza ordenadamente, sino que los granos que tienen un tamaño mayor comenzarán a consumir a los granos más pequeños. [9]

Figura 3. Temperaturas y estructuras en función de la distancia al eje de soldadura, con un contenido específico de carbono

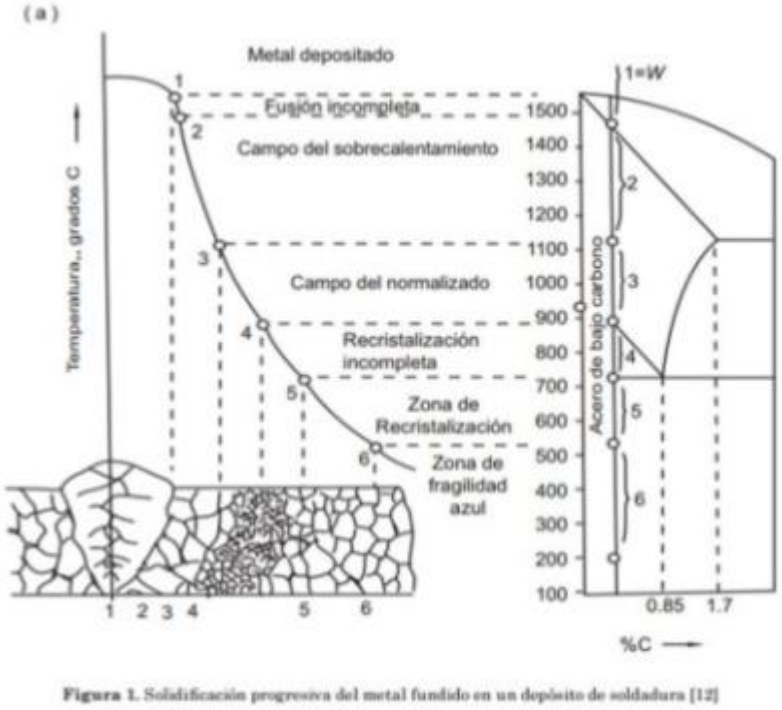


Figura 1. Solidificación progresiva del metal fundido en un depósito de soldadura [12]

Fuente: Metalurgía de la soldadura, Jorge Perozo.

2.2.2 Parámetros de soldadura

La corriente de soldadura adecuada se basa en el diámetro del electrodo revestido. Cuando se utilizan dentro de los rangos de corriente sugeridos, los electrodos deben mostrar buenas características de arco con un mínimo de salpicaduras. El uso de una corriente excesiva puede provocar el sobrecalentamiento del electrodo, la reducción de la estabilidad del arco, el desprendimiento del revestimiento del electrodo y la porosidad del metal de soldadura. Las salpicaduras excesivas son una indicación de que la longitud del arco es demasiado larga, la corriente de soldadura es demasiado alta, la polaridad no está invertida o ha habido absorción de humedad por el revestimiento del electrodo. La velocidad de desplazamiento sugerida para SMAW es de 3 a 6 pulgadas por minuto (ipm) / 75 a 150 mm/min. [10]

Tabla 1. Parámetros para el proceso de soldadura SMAW

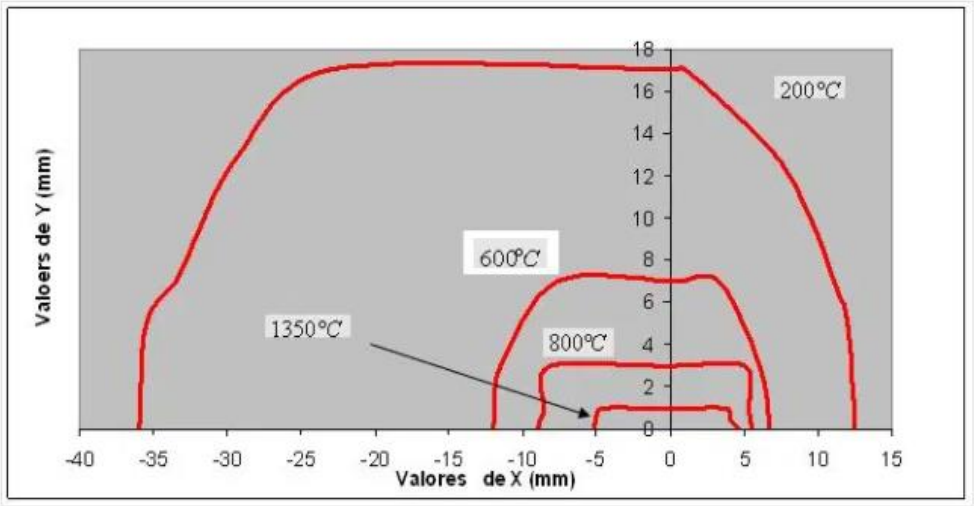
Parámetro	Valor	Unidad
Voltaje	17-40	V (AC)
Intensidad	60-200	A (AC)
Eficiencia	60%	
Velocidad	75-150	mm/min

Fuente: RODRÍGUEZ, Matías. Proceso de soldadura [11]

2.2.3 Ciclo térmico

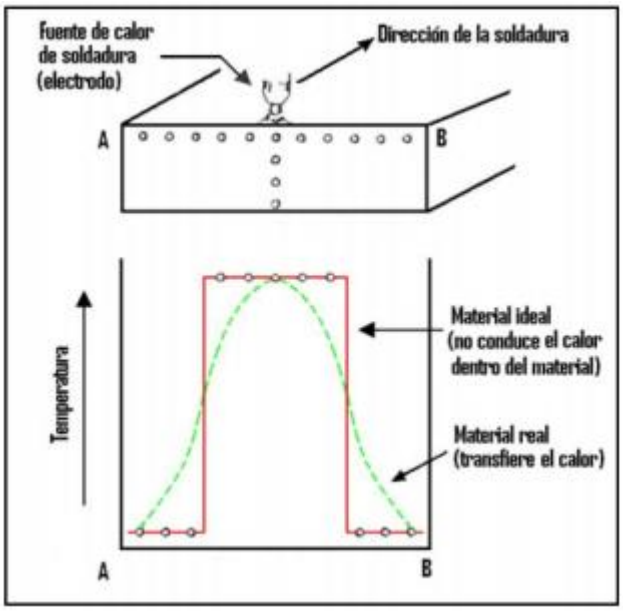
Para determinar la temperatura ejercida durante el proceso de soldadura, hay diversos factores que influyen en su obtención, tales como el voltaje, la corriente y la eficiencia del electrodo; de igual manera, la temperatura presenta un cambio de acuerdo a la distancia de aplicación del calor (véase figura 4). El acero 1045 al ser un buen conductor permite distribuir la temperatura a lo largo de la junta, se puede evidenciarse su comportamiento en la figura 5 lo que permite identificar en un momento determinado la temperatura en diferentes nodos de la junta, así mismo, es posible predecir la zona afectada por el calor y su grado de distorsión.

Figura 4. Distribución de la temperatura a lo largo de una unión



Fuente: WELDG. Teoría y cálculos de soldadura. Agosto, 2013. (Grafica) [10]

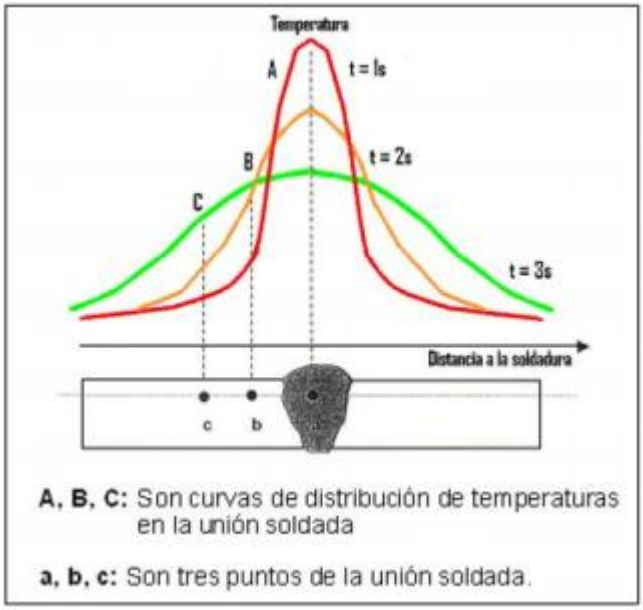
Figura 5. Comportamiento grafico de distribución de temperaturas para un material real



Fuente: Fosca Carlos, “Introducción a la Metalurgia de la Soldadura, Quinta Edición”, (2005)

Cada punto del material experimenta una variación de temperatura en función del tiempo y distancia. Para un instante de tiempo uno (1 s), en un *nodo (a)* sobre el cordón de soldadura se contempla la máxima temperatura y en un *nodo (c)* se observa un incremento térmico producido por la temperatura aplicada en la unión, pero en una magnitud menor, debido a la distancia de aplicación. En un instante de tiempo tres (3 s) el *nodo a* presenta una disminución de temperatura mientras que el *nodo (c)* tiene aumento de temperatura. Véase figura 6

Figura 6. Distribución de temperatura de una sección cualquiera a lo largo del eje x



Fuente: Fosca Carlos, “Introducción a la Metalurgia de la Soldadura, Quinta Edición”, (2005)

2.3 Acero 1045

SAE 1045 es un acero grado ingeniería de aplicación universal que proporciona un nivel medio de resistencia mecánica y tenacidad a bajo costo con respecto a los aceros de baja aleación. Frecuentemente se utiliza para elementos endurecidos a la llama o por inducción. Este acero puede ser usado en condiciones de suministro; laminado en caliente o con tratamiento térmico (templado en aceite y revenido; o templado en agua y revenido).

2.3.1 Soldabilidad

El acero SAE 1045 está cerca al límite superior de aceros con porcentaje de carbono que pueden ser soldados satisfactoriamente por todos los métodos comunes. Sin embargo, precalentamiento y postcalentamiento pueden ser necesarios en función del espesor. Usualmente hay menos necesidad de precalentamiento y postcalentamiento con procesos de soldadura con gas que con métodos de soldadura por arco debido a que el proceso de soldadura por gas genera una zona afectada por el calor mayor que el proceso de arco eléctrico y por tal razón el enfriamiento es más lento. [12]

2.3.2 Propiedades

Tabla 2. Propiedades específicas de un acero SAE 1045

Propiedad	Valor	Unidad
Densidad	7.85	g/cm^3
Módulo de elasticidad	200	GPa
Límite de fluencia	310	MPa
Conductividad térmica	52	W/m°c
Calor específico	460	J/Kg°K
Coeficiente de Poisson	0.3	

Fuente: CIA. GENERAL DE ACEROS S.A. SAE 1020 Y SAE 1045 Aceros ingeniería al carbono. [12]

2.3.3 Composición química

Tabla 3. Porcentaje de cada elemento presente químicamente en un acero SAE 1045

Elemento	Porcentaje
C	0.429
Mn	0.771
P	0.002
S	0.016
Si	0.192
Al	0.002
Nb	0.002
Cu	0.174
Ni	0.072
Cr	0.052
V	0.001
Mo	0.019
Ti	0.001

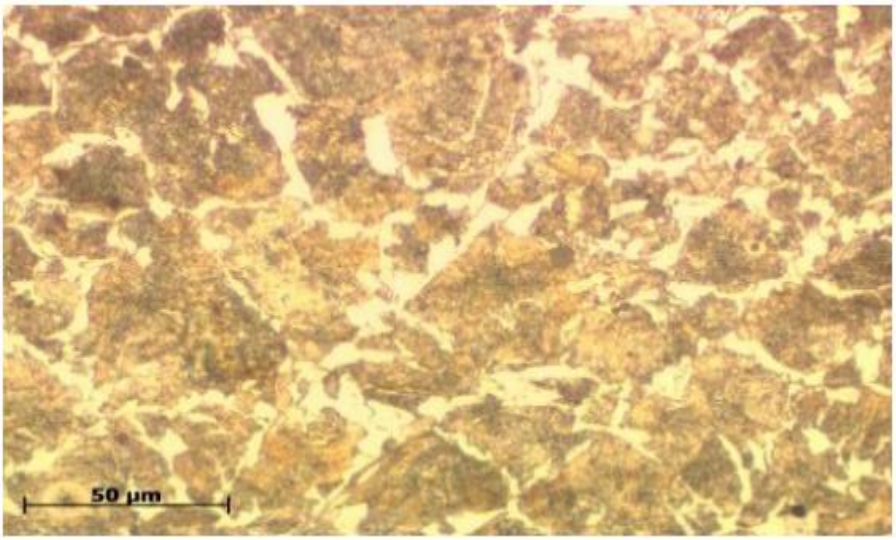
Fuente: BOHORQUEZ, Carlos et al. CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE UN ACERO AISI/SAE 1045. [13]

2.3.4 Microestructura

El acero AISI 1045 presenta una clara formación de perlita (manchas oscuras) y ferrita (manchas claras) cuando el material no ha sido

sometido a ningún tipo de tratamiento térmico; también se puede apreciar fácilmente los límites de grano en diferentes acercamientos (véase figura 7 y 8)

Figura 7. Microestructura del acero AISI/SAE 1045 sin tratamiento térmico 500X



Fuente: ORTIZ, Jhon. INFLUENCIA DEL TEMPLE DESDE TEMPERATURAS INTERCRÍTICAS Y EL REVENIDO EN LA RESISTENCIA A LA FATIGA DE UN ACERO SAE 1045.

Figura 8. Microestructura del acero AISI/SAE 1045 sin tratamiento térmico 100X



Fuente: BOHORQUEZ, Carlos et al. CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE UN ACERO AISI/SAE 1045. [13]

2.3.4.1 Ferrita

Es una solución sólida de carbono en hierro alfa, por esto se considera como hierro puro. Es el constituyente más blando de los aceros, pero es el más tenaz y dúctil. Su solubilidad a la temperatura ambiente es de 0,008% de carbono; la máxima solubilidad de carbono en el hierro alfa es de 0,02% a 723 °C. Cristaliza en una estructura cúbica de cuerpo centrado (BCC). [14]

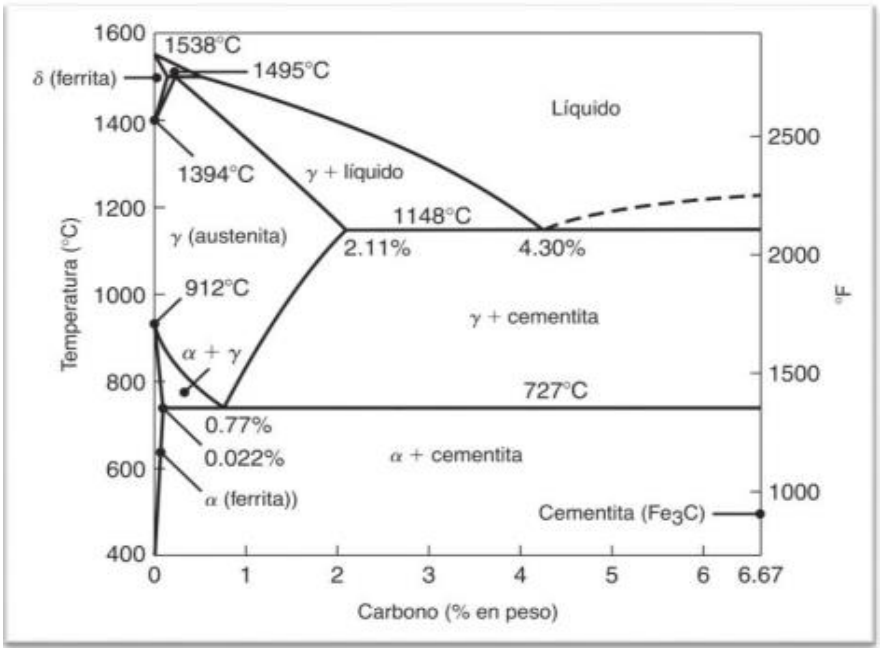
2.3.4.2 Perlita

La perlita es un constituyente compuesto aproximadamente por el 86,5 % de ferrita y el 13,5 % de cementita. Su microestructura está formada por capas o láminas alternas de las dos fases (ferrita y cementita) durante el enfriamiento lento de un acero a temperatura eutectoide. Se le da este nombre porque tiene la apariencia de una perla al observarse microscópicamente a pocos aumentos. [14]

2.4 Fases presentes después de la soldadura

La temperatura de soldadura afecta la microestructura del material y las fases presentes en el mismo, el AISI 1045 al ser un metal hipoeutectoide con contenido de carbono menor a 0,77%, al aumentar la temperatura aparece una doble fase austenita-ferrita, la austenita va aumentando su proporción de acuerdo a la temperatura, así mismo la ferrita disminuye. (Ver figura 9)

Figura 9. Diagrama hierro carbono



Fuente: SALGADO Andres y RODRIUEZ Andres**,** Digitalización de la estructura metalográfica de un hacer simplemente aleado tratado intercríticamente**.** Diagrama a hierro carbono**.** Bogotá D.C, 2017, pág. 9

2.4.1 Austenita

Es una solución sólida de carbono en hierro γ. Esta fase se extiende sobre una gran sección del diagrama Fe-Fe3C, con la solubilidad del carbono aumentando con la temperatura a un máximo de 2.11% a 1148 °C. Del mismo diagrama se puede observar que la austenita no existe a

temperatura ambiente, para aceros al carbono, bajo condiciones de equilibrio. En ciertos aceros aleados, como en el caso de los aceros para herramientas, una pequeña porción de austenita puede retenerse en la estructura final, o en los aceros inoxidables austeníticos. [14]

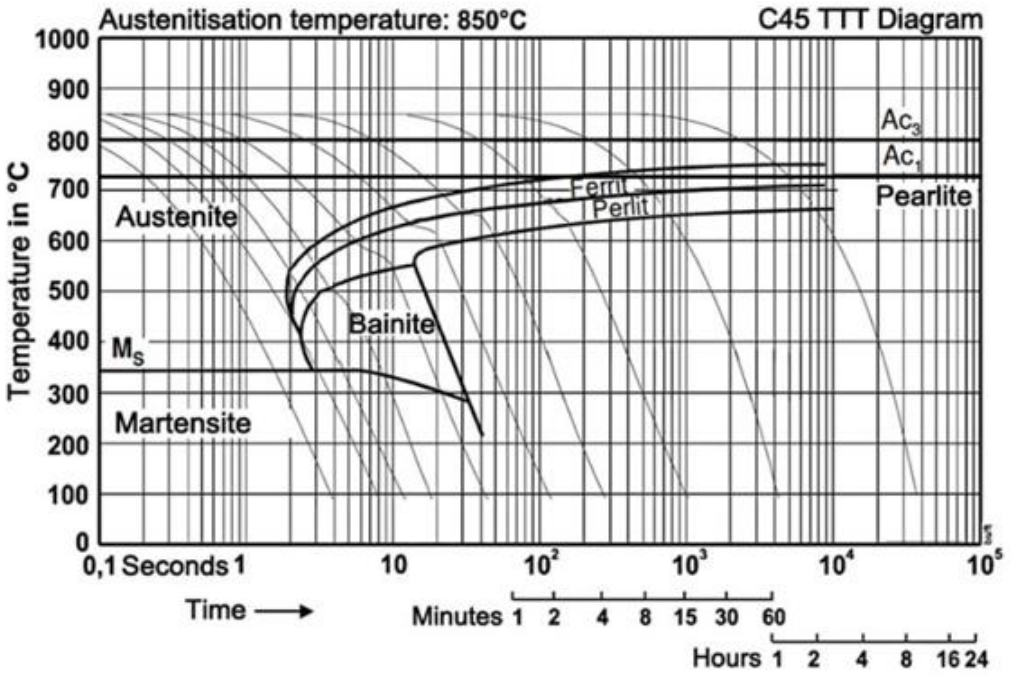
2.4.1.1 Austenita retenida

Es la austenita que se encuentra a temperatura ambiente, ya que no se alcanza a transformar completamente a martensita durante el enfriamiento, en los casos en que la transformación martensítica es altamente eficiente, siempre queda aproximadamente 1 % de austenita. Tanto la austenita retenida como la martensita quedan fuertemente tensionadas; se comprimen mutuamente y la compresión será mayor cuanto mayor sea el tamaño que alcance el cristal de martensita. Se presenta muchas veces como una malla fina en torno de los listones martensíticos. Para fines prácticos es frecuente definir el punto donde el 95% de la transformación se ha alcanzado como una transformación martensítica completa. [9]

2.4.2 Transformación de fases

Durante el enfriamiento, la austenita en esta zona afectada por el calor se transforma en una nueva estructura, la cual depende de la rapidez de enfriamiento y del diagrama CCT, este estudia el comportamiento del material cuando presenta un enfriamiento continuo y conlleva a la transformación de la austenita.

Figura 10. Diagrama *continuous cooling transformation para acero 1045*

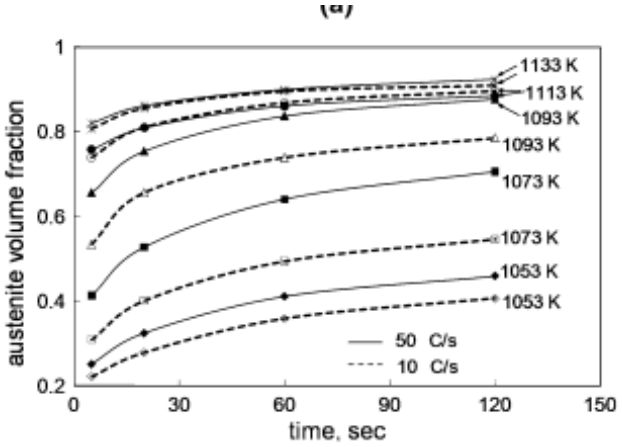


Fuente: The world material. European EN Standards. Material C45 Steel Equivalent, Properties, Composition. (Consultado mayo de 2021). Recuperado de https://www.theworldmaterial.com/1-0503-material-c45-steel/

2.4.2.1 Fracción volumétrica de austenita

Cuando el material es sometido a mayor temperatura, la ferrita tiene menos presencia en la microestructura y la austenita va tomando ese lugar, no es hasta antes de Ac3 que la austenita presenta 100% de transformación, es por eso que, en esta zona, se debe tener en cuenta la fracción de volumen de la fase austenítica, la cual se aprecia en la siguiente figura

Figura 11. Fracción volumétrica de austenita antes de la austenización [21]



Fuente: Olga Girina et al. Effect of Heating Rate on the Austenite Formation in Low-Carbon High-Strength Steels Annealed in the Intercritical Region

2.4.2.2 Martensita

Es el constituyente estructural de temple de los aceros: sobresaturación de carbono o Fe3C en ferrita obtenido a partir de la austenita. Es fundamental para su aparición una velocidad de enfriamiento alta que impida la difusión. Su estructura cristalina es tetragonal centrada (BCT), presenta por tanto una red distorsionada, responsable de su dureza. Su elevada dureza, así como el grado de tetragonalidad aumenta con el porcentaje de carbono; no obstante, cuando se supera el 0,75% C queda algo de austenita sin transformar, y el promedio de dureza decrece ligeramente. No requiere superar una barrera de energía térmica (transformación atérmica) y no lleva a cambios de composición en el paso de austenita a martensita, evitándose la migración del carbono. [9]

2.4.2.3 Temperatura de Inicio (Ms) y fin de martensita (Mf)

La transformación de la austenita en martensita empieza a una temperatura llamada de inicio de transformación de la martensita ($Ms\ martensite\ start$), Ms no depende de la velocidad de enfriamiento sino del contenido de elementos aleantes en el acero en particular. Existen varias expresiones para su cálculo aquí se presenta la elaborada por Andrews. Así mismo, a partir de la temperatura de inicio se puede calcular la temperatura final, la cual se da con la ecuación de Steven. [16]

Ecuación 1. Temperatura de inicio para la formación de martensita

$$M_s = 512 - 453\,C - 16.9\,Ni - 9.5\,Mo + 217\,C^2 - 71.5\,C\,Mn + 15\,Cr - 67.6\,C\,Cr$$

Ecuación 2. Temperatura de final de la martensita

$$M_f = \frac{(((1.8M_s+32)-387)-32)}{1.8}$$

2.4.2.4 Temperaturas críticas

Ac1 La temperatura AC1 es punto de la curva deformación vs temperatura, en donde la deformación se desvía de su comportamiento lineal y empieza a descender; corresponde al inicio de la formación de la austenita (temperatura AC1). Para calcularla se tienen en cuenta las siguientes expresiones con las cuales se obtienen dichas temperaturas en grados Celsius.

Ecuación 3. Inicio de formación de la austenita [13]

$$\begin{aligned} Ac1(°C) = {} & 723 - 7{,}08\,Mn + 37{,}7\,Si + 18{,}1\,Cr + 44{,}2\,Mo + 8{,}95\,Ni + 50{,}1\,V + 21{,}7\,Al \\ & + 3{,}18\,W + 297\,S - 830\,N - 11{,}5\,C\,Si - 14{,}0\,Mn\,Si - 3{,}10\,Si\,Cr - 57{,}9\,C\,Mo \\ & - 15{,}5\,Mn\,Mo - 5{,}28\,C\,Ni - 6{,}0\,Mn\,Ni + 6{,}77\,Si\,Ni - 0{,}80\,Cr\,Ni - 27{,}4\,C\,V \\ & + 30{,}8\,Mo\,V - 0{,}84\,Cr^2 - 3{,}46\,Mo^2 - 0{,}46\,Ni^2 - 28\,V^2 \end{aligned}$$

Ac3 Es aquella en la que toda la masa de acero se ha transformado ya en austenita (entre 723 °C y 1.148 °C); los valores concretos de estas temperaturas varían según la proporción de carbono que contiene el acero. Para calcularla se tienen en cuenta las siguientes la siguiente ecuación

Ecuación 4. Temperatura de la máxima formación de la ausentita [13]

$$\begin{aligned} Ac3(°C) = {} & 912 - 370\,C - 27{,}4\,Mn + 27{,}3\,Si - 6{,}35\,Cr - 37{,}2\,Ni + 95{,}2\,V + 190\,Ti \\ & + 72{,}0\,Al + 64{,}5\,Nb + 5{,}57\,W + 332\,S + 276\,P + 485\,N - 900\,B + 16{,}2\,C\,Mn \\ & + 32{,}3\,C\,Si + 15{,}4\,C\,Cr + 48{,}0\,C\,Ni + 4{,}32\,Si\,Cr - 17{,}3\,Si\,Mo - 18{,}6\,Si\,Ni \\ & + 4{,}80\,Mn\,Ni + 40{,}5\,Mo\,V + 174\,C^2 + 2{,}46\,Mn^2 - 6{,}86\,Si^2 + 0{,}322\,Cr^2 \\ & + 9{,}90\,Mo^2 + 1{,}24\,Ni^2 + 60{,}2\,V^2 \end{aligned}$$

2.4.2.5 Fracción volumétrica de martensita

A diferencia de la transformación perlítica, la martensita no tiene un periodo de incubación, sino que cierta cantidad de martensita se transforma instantáneamente por debajo de Ms. Para el cálculo de la fracción volumétrica de la martensita que se forma a partir de la austenita se obtuvo una expresión por parte de Koistinen y Marburger (Ecuación 5) [22]

Ecuación 5. Fracción volumétrica de martensita [22]

$$\xi_m = \xi_\gamma \left(1 - exp\left(-\Omega(M_s - T)\right)\right)$$

2.4.2.6 Temperaturas para el porcentaje martensita

De acuerdo a Steven y Haynes el porcentaje de martensita varía según la temperatura final del nodo a analizarse, por lo tanto, presenta las siguientes ecuaciones (6) que dependen de la temperatura *Ms* (inicio de la martensita). [16]

Ecuaciones 6. Temperatura necesaria para x porcentaje de martensita [16]

$$M_{10} = Ms - 18$$

$$M_{50} = Ms - 85$$

$$M_{90} = Ms - 185$$

$$M_{100} = Ms - 387$$

2.5 Esfuerzos residuales

Los esfuerzos residuales son aquellos que se presentan en un componente que está estático y en equilibrio con su entorno, es decir, son esfuerzos internos que tiene una pieza que no está siendo sometida a fuerzas externas, estos pueden tener origen en la manufactura como consecuencia de deformaciones no uniformes entre diferentes zonas de las piezas o como producto de procesos térmicos. En particular, los procesos de soldadura se caracterizan por generar esfuerzos residuales en la junta con magnitudes cercanas al límite elástico del material, esto se debe a diferencias considerables en las velocidades de calentamiento

y enfriamiento de las regiones cercanas a la unión. Los esfuerzos residuales son entre otros, uno de los parámetros que más influye en el comportamiento mecánico de las soldaduras. [17]

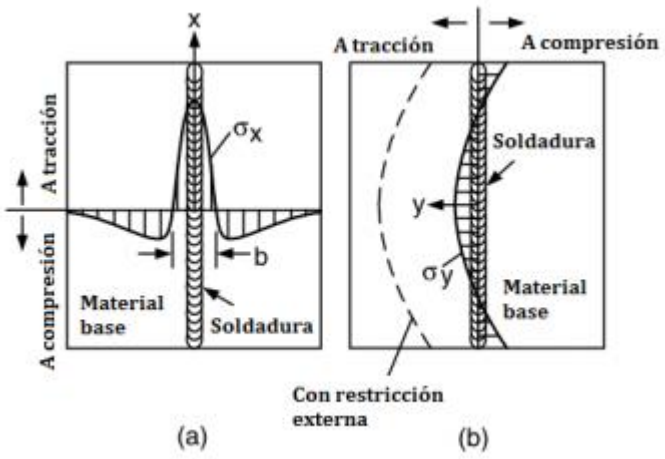
2.5.1 Esfuerzos residuales en soldadura

Los procesos de soldadura de materiales metálicos involucran la aplicación de calor localizado y cambios de temperatura en la zona de la unión. Estos cambios de temperatura generan expansión o contracción en la junta y sus alrededores; siendo estos fenómenos los encargados de restringir las deformaciones ocasionadas por el cambio de volumen, generando esfuerzos a compresión o a tracción según la distancia a la fuente de calor de la región analizada [18].

Los esfuerzos residuales en la dirección longitudinal de una junta soldada mediante procesos convencionales por fusión, es decir en la dirección de avance del cordón de soldadura, presentan la distribución de la Figura 12 a en la cual el material del centro de la junta se encuentra sometido a esfuerzos a tracción mientras que el metal base presenta esfuerzos a compresión. Por otro lado, en la dirección transversal de la junta los esfuerzos residuales presentan la distribución observada en la Figura 12 b, en donde los esfuerzos a tracción más elevados se encuentran hacia la longitud media del cordón, mientras que en los extremos los esfuerzos son a compresión.

Comparando los esfuerzos residuales obtenidos en ambas direcciones, se observa que aquellos presentados en la dirección longitudinal alcanzan valores más elevados en la junta debido a que el gradiente térmico es mayor en esa dirección y por ende las deformaciones generadas en esa dirección también lo son, mientras que los esfuerzos en la dirección transversal se presentan debido a que el material perpendicular a la dirección de la soldadura (ancho de la placa), se encuentra a temperatura ambiente o muy cercana a ésta, impidiendo la expansión libre del material en la zona de alta temperatura. [19]

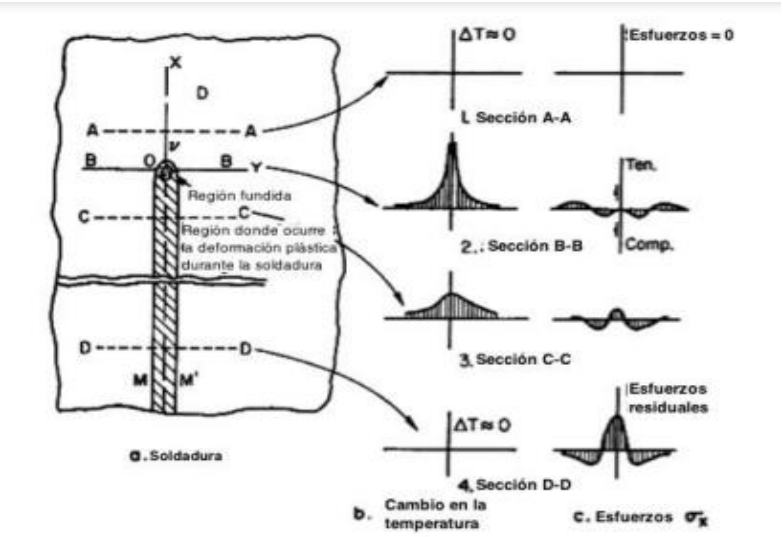
Figura 12. Distribución de esfuerzos residuales presentes en una soldadura para junta a tope (longitudinal y transversal)



Fuente: KOU, Sindo. Residual Stresses, Distortion, and Fatigue. En: Welding metallurgy. 2 ed. New Jersey: John Wiley, 2003.

La Figura 13 muestra los cambios de temperatura (ΔT) y la evolución de los esfuerzos residuales (σx) durante la obtención de una soldadura por métodos convencionales. En esta se pueden observar diferentes etapas durante las cuales está cambiando el estado de esfuerzos en la dirección longitudinal.

Figura 13. Estados transitorios y finales durante la soldadura



Fuente: Metal Univers. (2006). Publicación de Metal Univers (Nº 38). España: Nova Ágora, S

En la sección A-A el material no es afectado por la fuente de calor, por lo que los esfuerzos residuales son iguales a cero. En la sección B-B la fuente de calor se encuentra justo sobre la soldadura, generando que el

material en esta región (el cual se encuentra fundido), presente esfuerzos longitudinales iguales a cero debido a la poca resistencia que presenta el material en este estado. Por otro lado, el material ligeramente más alejado de la región de la soldadura que se encuentra afectado por la fuente de calor (Zona afectada por el calor - ZAC), se expande por el aumento de la temperatura y es restringido por el material alrededor que no es afectado por la fuente de calor (material base), presentando ligeros esfuerzos a compresión que son balanceados por esfuerzos a tracción en el material base. Cuando la fuente de calor se encuentra alejada de la soldadura (secciones C-C y D-D), el material de la junta comienza un proceso de solidificación que lo obliga a contraerse a medida que disminuye la temperatura, de esta forma el material del centro de la junta y sus alrededores (ZAC) presentan esfuerzos a tracción debidos a la contracción que genera una disminución en el volumen ocupado, mientras que el material más alejado (metal base), queda permanentemente sometido a compresión debido al equilibrio que busca alcanzar el cuerpo.

La existencia de tensiones residuales en un elemento, estructural o mecánico, por lo general tiene un efecto negativo sobre su vida útil. En primer lugar, se debe tener en cuenta que el material en un estado inicial tiene menos esfuerzos residuales, que después de un tratamiento térmico transitorio.

Por otro lado, si las tensiones residuales son de tracción, si se somete la pieza a esfuerzos de naturaleza cíclica, la existencia de un estado tensional de tipo estático, hace que el esfuerzo alternante que garantiza vida infinita sea menor, y en el escenario de considerar el caso de vida finita, el número de ciclos de vida útil se hace menor. Además del punto de vista de resistencia del material, la existencia de tensiones residuales puede estar asociada a fenómenos de tipo físico-químico, como son el de corrosión bajo tensión y el de fisuración en frío. En ambos, el fallo se produce por propagación de grietas, pudiéndose entonces decir que se trata de un caso particular de mecánica de la fractura.

2.5.2 Ley de Hooke

Los esfuerzos a los que se encuentra sometida una pieza se determinan a partir de las deformaciones máximas en el material, haciendo uso de la ley de Hooke, la cual relaciona los esfuerzos (σ), con las deformaciones (ε), mediante la Ecuación (6), donde E : representa el módulo de elasticidad del material.

Ecuación 7. Ley de Hooke

$$\sigma = E\varepsilon$$

2.5.2.1 Deformación en las transformaciones de fase

Una forma de obtener la deformación de un material es a través de las transformaciones de fase que ha experimentado, según Krauss, es posible hacerlo a partir del porcentaje de carbono presente de la pieza. La ecuación puede cambiar según la transformación que se busque, en el caso de austenita a martensita, se puede determinar mediante la ecuación (7). [20]

Ecuación 8. Cambio de unidad de longitud de austenita a martensita

$$\varepsilon = 0{,}0155 - 0{,}0018\,C$$

2.5.2.2 Modelo plástico de transformación bilineal

Cuando el material se somete a un esfuerzo superior al de su límite para la fluencia las deformaciones serán permanentes; es decir, el material seguirá deformado así la carga sea retirada. Esto se conoce como comportamiento plástico. Además, a diferencia de la región elástica donde se requiere grandes incrementos en el esfuerzo para que la deformación tenga cambios muy pequeños, en la zona plástica cualquier variación en el esfuerzo causara grandes deformaciones. El modelo que se usó para predecir el esfuerzo plástico σ en relación con la deformación verdadera de ε para cada una de las fases presentes en el material se basa en la teoría de dislocación y en el endurecimiento por deformación, el cual desarrollado por (Rodríguez y Gutiérrez, 2003) en su investigación

Ecuación 9. Fórmula para predecir el esfuerzo plástico [23]

$$\sigma = \sigma_0 + \Delta\sigma_0 + \alpha \times M \times \mu \times \sqrt{b} \times \sqrt{\frac{1-\exp(-\mathrm{M}k_t\varepsilon)}{k_r \times L}}$$

Donde $\sigma 0$ es el esfuerzo de Peierl's, el cual depende de la composición química del material y es el siguiente:

Ecuación 10. Fórmula para obtener el esfuerzo de Peierl's[23]

$$\sigma 0 = 77 + 80\%Mn + 750\%P + 60\%Si + 80\%Cu + 45\%Ni + 60\%Cr + 11\%Mo + 5000\%N$$

Se tiene que $\Delta\sigma$ es el endurecimiento estimado del material basado en el contenido de carbono, el cual es calculado para la martensita mediante la ecuación 11

Ecuación 11. Fórmula para obtener el endurecimiento basa en el contenido de carbono [23]

$$\Delta\sigma(Mpa) = 3065 \times (\%Cssm) - 161$$

Los demás términos son: α (Constante) = 0.25
M (Factor de Taylor) = 3
μ (Módulo de corte) = 80000
b (Vector Burger) = 2.5×10−10
L (Trayecto libre medio de dislocación) = (3.8×10−8)
K (índice de recuperación) = (41)

El contenido de carbón de la martensita (Cm) se calcula considerando el balance de masa del carbono y la siguiente relación (ecuación 12)

Ecuación 12. Fórmula para obtener el contenido de martensita [23]

$$C_{DP} = C_\alpha V_\alpha + C_m V_m$$

Donde $V\alpha$ y Vm es la fracción de volumen de la ferrita y martensita. CDP Es la composición nominal de carbono en el acero. Siendo CDP = 0.45, $C\alpha$ = 0.025 (máxima cantidad de carbono en la ferrita) y $V\alpha$, Vm los respectivos porcentajes de fase de cada uno de los tratamientos.

2.5.2.2.1 Esfuerzo con deformación plástica bilineal

El comportamiento en la región plástica se puede analizar de forma incremental utilizando la ecuación 13. Donde a partir de las gráficas obtenidas por el proceso del numeral 2.5.2.2 es posible calcular el módulo tangente $E\ ep$, este módulo representa la razón de cambio entre el esfuerzo y la deformación en la zona plástica y se calcula con la

ecuación (14). E es el módulo de Young y H es la pendiente de la gráfica en dicha región.

Ecuación 13. Fórmula para obtener el esfuerzo plástico [23]

$$\sigma = E^{ep} * \varepsilon$$

Ecuación 14. Fórmula para obtener el módulo tangente [23]

$$E^{ep} = \frac{HE}{H + E}$$

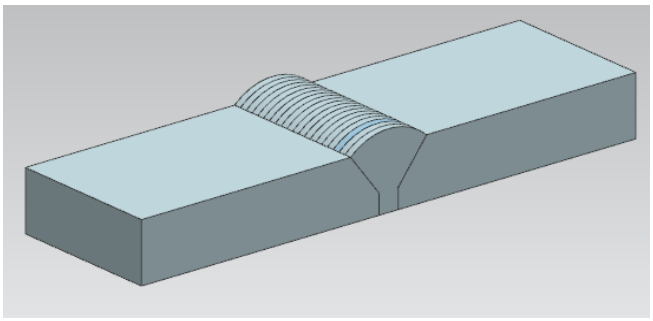
3. DESARROLLO

3.1 Simulación del proceso de soldadura

3.1.1 Modelamiento de la pieza

Se realizó un modelado en 3D, el cual fue hecho en NX Siemens, está compuesto por una junta tipo V y un cordón de soldadura dividido en 20 partes; las dimensiones de la unión fueron diseñadas con la idea de no poseer longitudes innecesarias o excesivas para analizar la zona afectada por el calor. El modelo y dimensionamiento es el siguiente:

Figura 14. Modelo geométrico usado para la simulación



Fuente: Elaboración propia

Figura 15. Dimensiones en mm del plano frontal

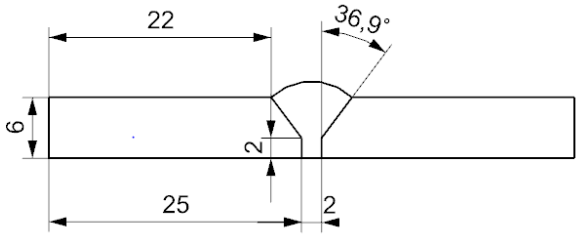
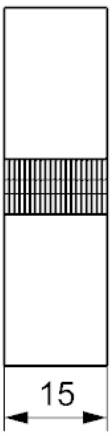


Figura 16 Dimensiones en mm del plano superior



Fuente: Elaboración propia

3.1.2 Análisis térmico transitorio de la transferencia de calor

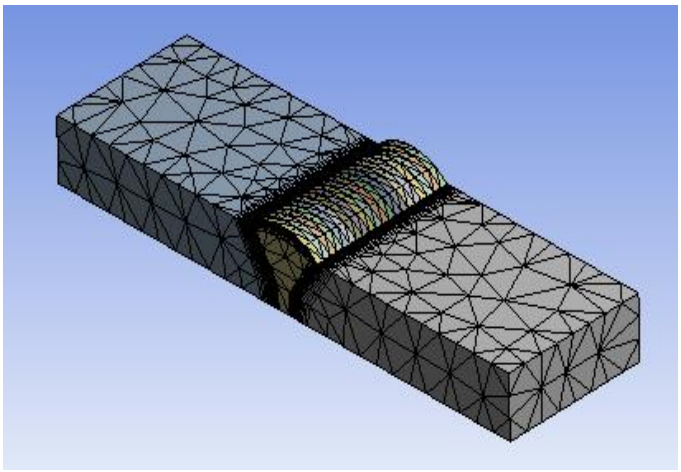
3.1.2.1 Datos iniciales

Para el desarrollo del siguiente análisis, se implementó el uso del software Ansys 17.2 por medio de la herramienta Workbench, de acuerdo a las necesidades del proceso, se empleó el método de *transient therma*l. El primer paso una vez iniciado el método es definir el material de trabajo para la pieza en la biblioteca ya presente del sistema, luego el modelo es exportado.

3.1.2.2 Enmallado

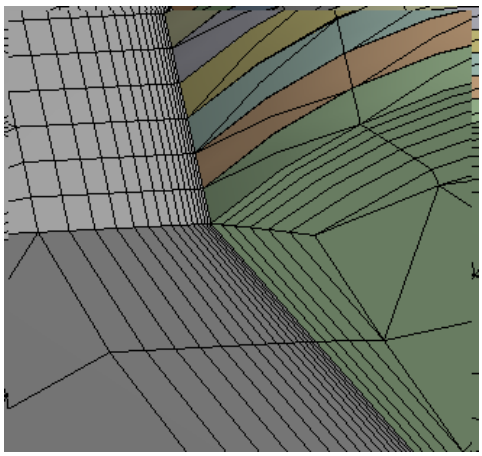
El programa cuenta con el método de evaluación de parámetros por elementos finitos, el cual discretiza el modelado; se realizó por medio de tetraedros, además, se utiliza un enmallado más fino en la zona de mayor afectación (inflation), para obtener la mayor exactitud en el análisis a lo largo del cordón de soldadura. El enmallado se puede apreciar en la siguiente figura (véase figura 17 y 18)

Figura 17. Enmallado tetraédrico de la junta en software Ansys



Fuente: Elaboración propia

Figura 18. Detalle de enmallado fino (inflatión)

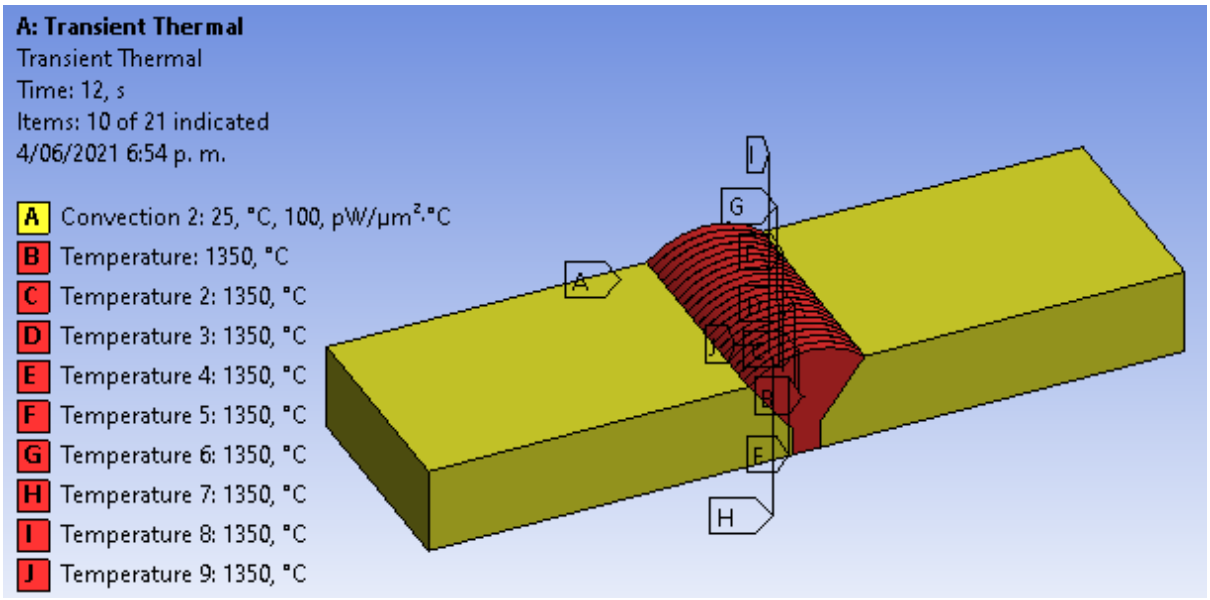


Fuente: Elaboración propia

3.1.2.3 Variables térmicas

El modelo térmico realiza un análisis de transferencia de calor transitoria, se consideró una temperatura ambiente de 25°C y un coeficiente de convección del aire de 100 $pW/um^2\,°C$ además, teniendo en cuenta las dimensiones de la pieza, se elaboró una imposición del ciclo térmico directamente en la zona de fusión de la soldadura, realizada mediante fuentes puntuales de temperatura de 1350 °C (véase figura 19) en cada una de las divisiones del cordón, simulando así el desplazamiento del calor a lo largo de la unión; el tiempo de aplicación de la temperatura de fusión por cada sección del cordón fue de 0,25 s, y con base al numeral 2.2.2, la velocidad de avance fue 3 mm/s, finalmente, el tiempo total de la simulación es de 35 s.

Figura 19. Temperatura aplicada en cada punto del cordón de soldadura

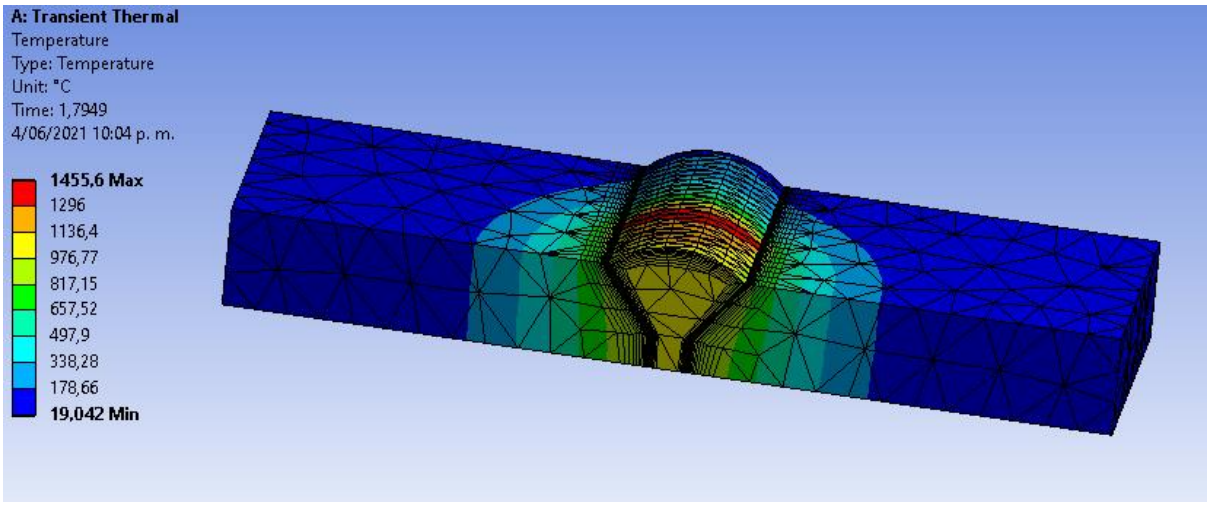


Fuente: Elaboración propia

3.1.2.4 Resultados en el campo térmico

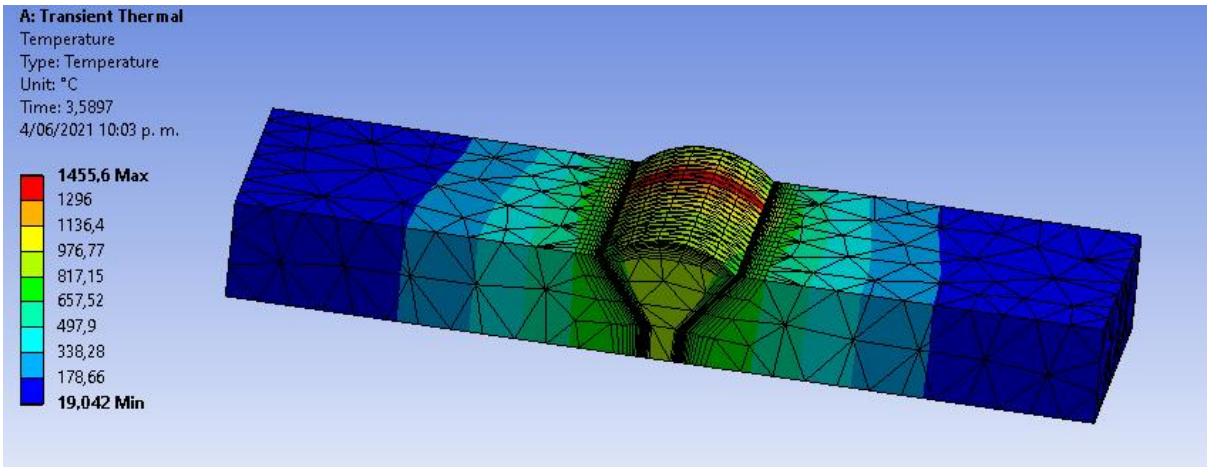
Una vez realizado el proceso y definición de variables térmicas, se utilizó un comando del software el cual se encarga de mostrar el estado térmico de toda la pieza y sus cambios presentes a lo largo del tiempo, los resultados demuestran la transición térmica del proceso de soldadura efectuada por el electrodo y a su vez, se representa cómo el calor es transferido hasta cierto punto de la junta para luego volver a su estado inicial (véase imagen 20 y 21). Con los resultados obtenidos, el software proporciona una gráfica (véase figura 22) dada en función de la temperatura y el tiempo.

Figura 20. Resultados de simulación de campo térmico para la unión soldada en V, en momento (a)



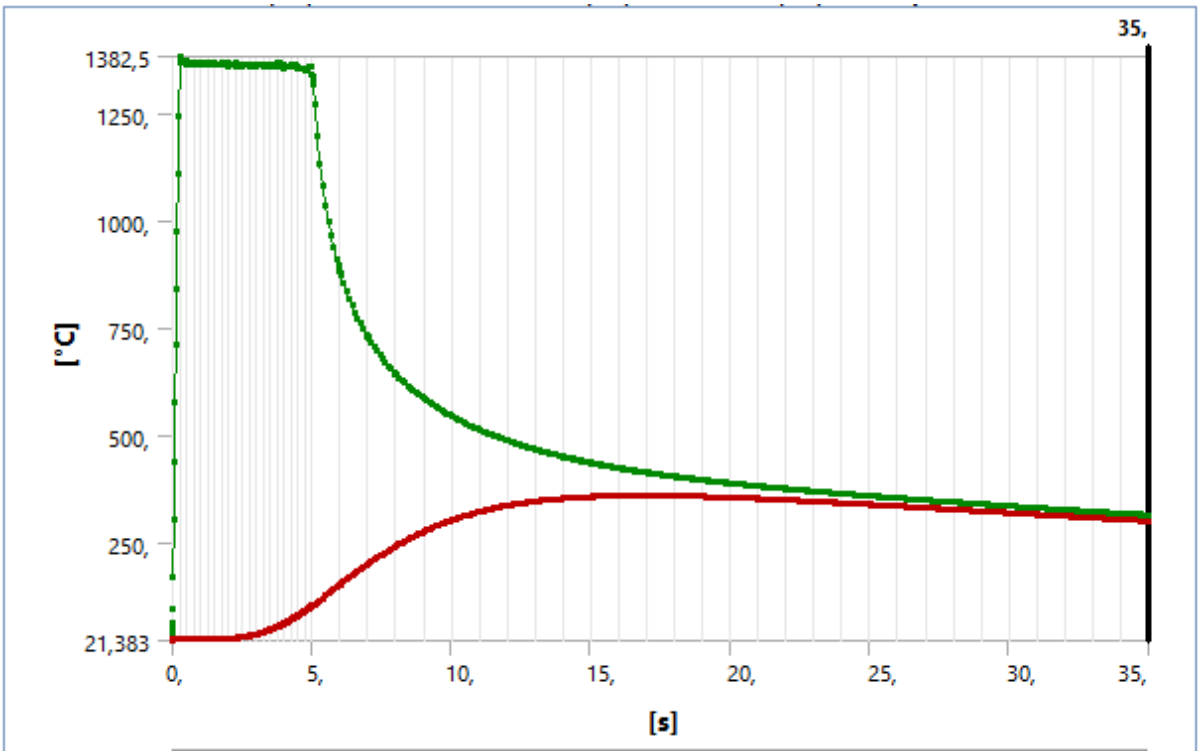
Fuente: Elaboración propia

Figura 21. Resultados de simulación de campo térmico para la unión soldada en V, en momento (b)



Fuente: Elaboración propia

Figura 22. Curvas de máxima y mínima de la temperatura de la simulación completa

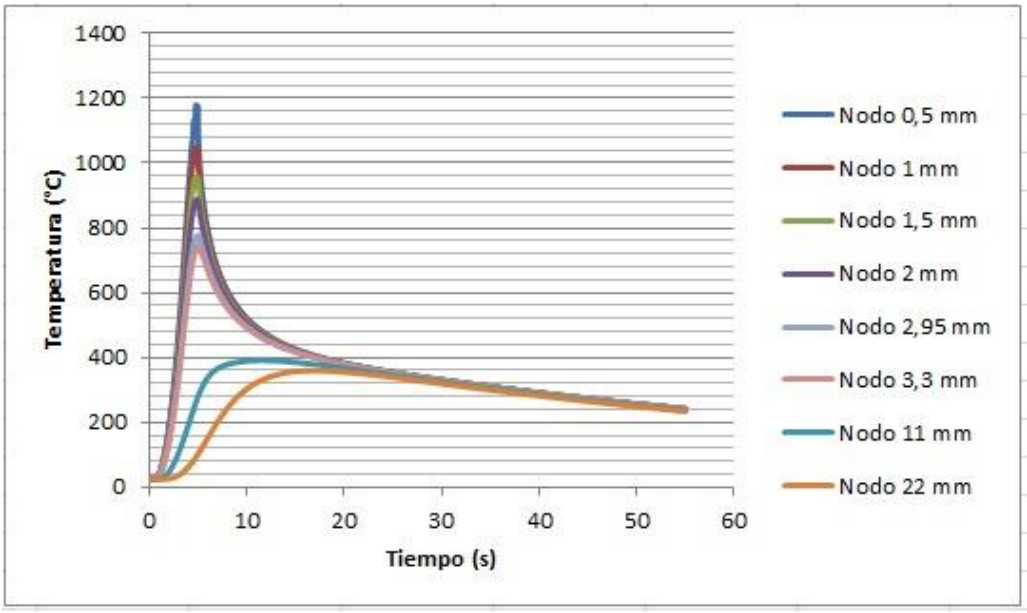


Fuente: Elaboración propia por medio del software Ansys.

3.1.2.5 Temperatura en nodos

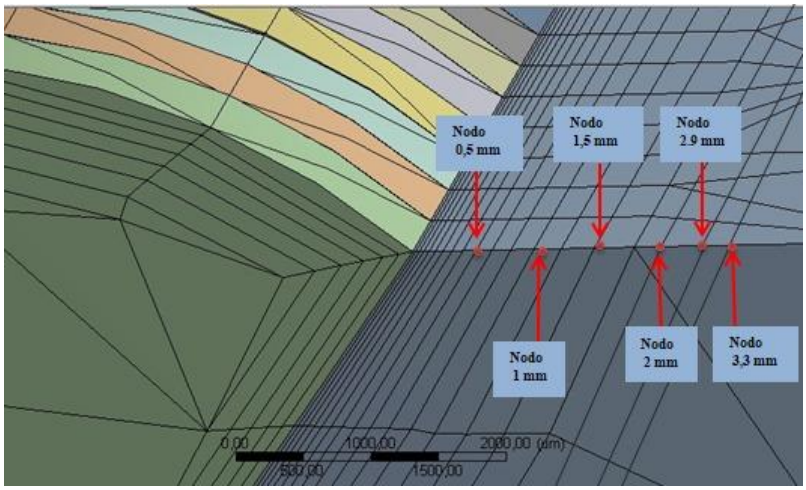
Con la idea de tener el cambio térmico a través del tiempo en diversos puntos específicos de la pieza, fue necesario definir varios nodos que tuvieran como característica principal seguir el mismo eje, para evaluar la evolución de la temperatura en función del tiempo (véase figura 24), dicha temperatura de cada nodo fue proporcionada por el software. De acuerdo a los resultados térmicos obtenidos en cada uno de los nodos, se puede notar que el diferencial de temperatura es mucho mayor en los primeros instantes del proceso, y al pasar la zona afectada por el calor, la temperatura toma una tendencia prácticamente constante; de igual manera, también, es posible apreciar que, de acuerdo a la distancia existente entre el nodo y el cordón, cambia la velocidad de enfriamiento. (Véase figura 23).

Figura 23. Temperatura en diferentes nodos a lo largo del eje transversal de la junta



Fuente: Elaboración propia

Figura 24. Detalle de la ubicación de uno de los nodos



Fuente: Elaboración propia

3.2 Transformaciones de fase

3.2.1 Velocidades de enfriamiento

La junta tiene un comportamiento similar al proceso real de una unión soldada, en el cual se puede identificar que la velocidad de enfriamiento cerca al cordón (ZAC) es mayor que en el extremo de la pieza. Para validar los datos, y hallar las velocidades se realizó el proceso

mencionado en el numeral 3.1.2.5, ubicando cuatro nodos próximos a la aplicación de la temperatura y dos en una parte más alejada a la aplicación. Adicionalmente, para poder calcular las velocidades en cada nodo, se tomaba el delta de temperatura y el tiempo en el que el mismo ocurría, así mismo, para hallar T1 CCT y T2 CTT se tomó como punto de inicio una temperatura de 850° C que es donde ocurre la austenización y se mantienen las velocidades de enfriamiento en cada intervalo de tiempo para obtener el mismo comportamiento. Por último, en los últimos dos nodos no se realizó el proceso de T1 CCT y T2 CCT porque están debajo de A3.

Tabla 4. Cálculo de las velocidades de enfriamiento por rangos en el primer nodo.

Rangos	Nodo 0,5mm					
	T1 (°c)	T2 (°c)	ΔT	T1 CCT	T2 CCT	Velocidad (°c/s)
1 (4,8-5,8seg)	1179,1	802,19	376,91	850	473,09	376,91
2 (5,88 -12,8seg)	802,19	456,74	345,450	473,09	127,640	49,350
3 (12,8- 35 seg)	456,74	310,61	146,130	127,64	100,000	6,582
					Total	28,75794702

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Cálculo de las velocidades de enfriamiento por rangos en el segundo nodo

Rangos	Nodo 1mm					
	T1 (°c)	T2 (°c)	ΔT	T1 CCT	T2 CCT	Velocidad (°c/s)
1 (4,82-5,8seg)	1048	787,17	260,83	850	589,17	260,83
2 (5,8-12,8seg)	787,17	453,94	333,2	589,17	255,940	47,604
3 (12,82- 35seg)	453,94	310,2	143,74	255,940	112,200	6,481
					Total	24,44665341

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6. Cálculo de las velocidades de enfriamiento por rangos en el tercer nodo

Rangos	Nodo 1,5mm					
	T1 (°c)	T2 (°c)	ΔT	T1 CCT	T2 CCT	Velocidad (°c/s)
1 (4,8-5,8seg)	957,3	763,68	193,62	850	656,38	193,62
2 (5,8-12,8seg)	763,68	451,28	312,4	656,38	343,980	44,629
3 (12,84-35seg)	451,28	309,3	141,9800	343,980	202,000	6,407
					Total	21,49966821

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7. Cálculo de las velocidades de enfriamiento por rangos en el cuarto nodo

Rangos	Nodo 2mm					
	T1 (°c)	T2 (°c)	ΔT	T1 CCT	T2 CCT	Velocidad (°c/s)
1 (4,86-5,88seg)	886,87	740,14	146,73	850	703,27	146,73
2 (5,88-12,86seg)	740,14	448,59	291,5500	703,27	411,720	41,650
3 (12,86-35seg)	448,59	309,6	138,9900	411,720	272,730	6,278
					Total	19,15295289

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8. Cálculo de las velocidades de enfriamiento por rangos en el quinto nodo

Rangos	Nodo 2,95 mm					
	T1 (°c)	T2 (°c)	ΔT	T1 CCT	T2 CCT	Velocidad (°c/s)
1 (5,02-6,02seg)	778	682,26	95,74	NA	NA	95,74
2 (6,02-13,06seg)	682,26	440,35	241,9100	NA	NA	34,559
3 (13,06-35seg)	440,35	309	131,3500	NA	NA	5,970
					Total	15,6333

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9. Cálculo de las velocidades de enfriamiento por rangos en el sexto nodo

Rangos	Nodo 3,3 mm					
	T1 (°c)	T2 (°c)	ΔT	T1 CCT	T2 CCT	Velocidad (°c/s)
1 (5,03-6,03seg)	744,15	666,46	77,69	NA	NA	77,69
2 (6,03-13,03seg)	666,46	438,81	227,6500	NA	NA	32,521
3 (13,06-35seg)	438,81	309	129,8100	NA	NA	5,900
					Total	14,505

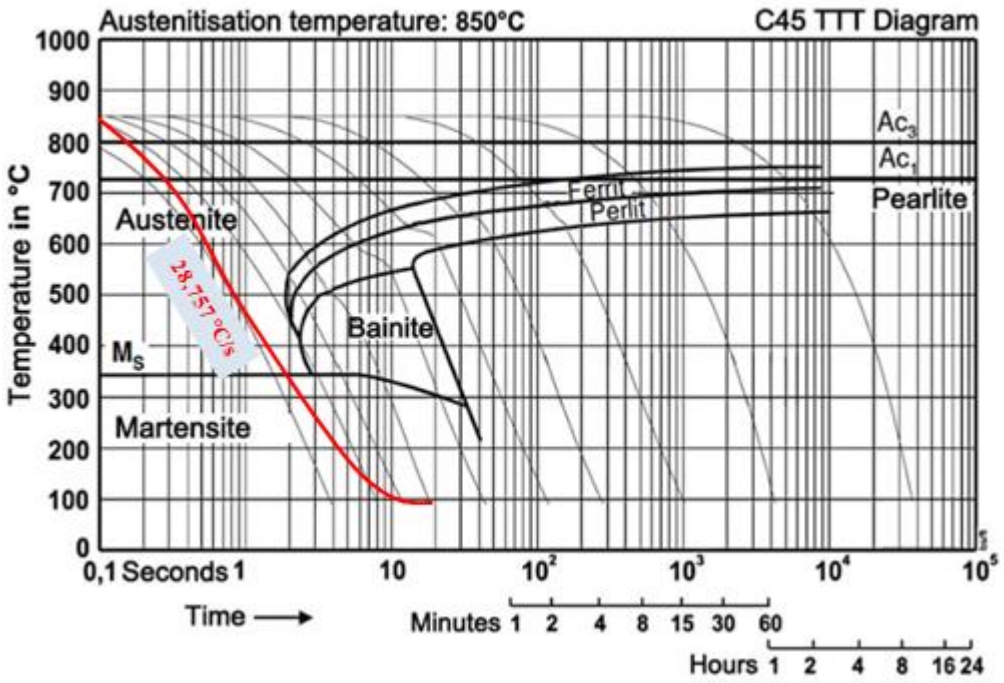
Fuente: Elaboración propia

3.2.2 Curvas de enfriamiento

El diagrama CCT permite ubicar las velocidades de enfriamiento mencionadas anteriormente en el numeral 3.2.1 y con las mismas, se puede identificar las fases presentes después de la aplicación de la temperatura. Con las curvas trazadas (véase figuras 25-30) es posible notar la presencia de martensita en la mayoría de los nodos, lo cual se debe al rápido enfriamiento en cada una de las zonas para el intervalo de tiempo definido.

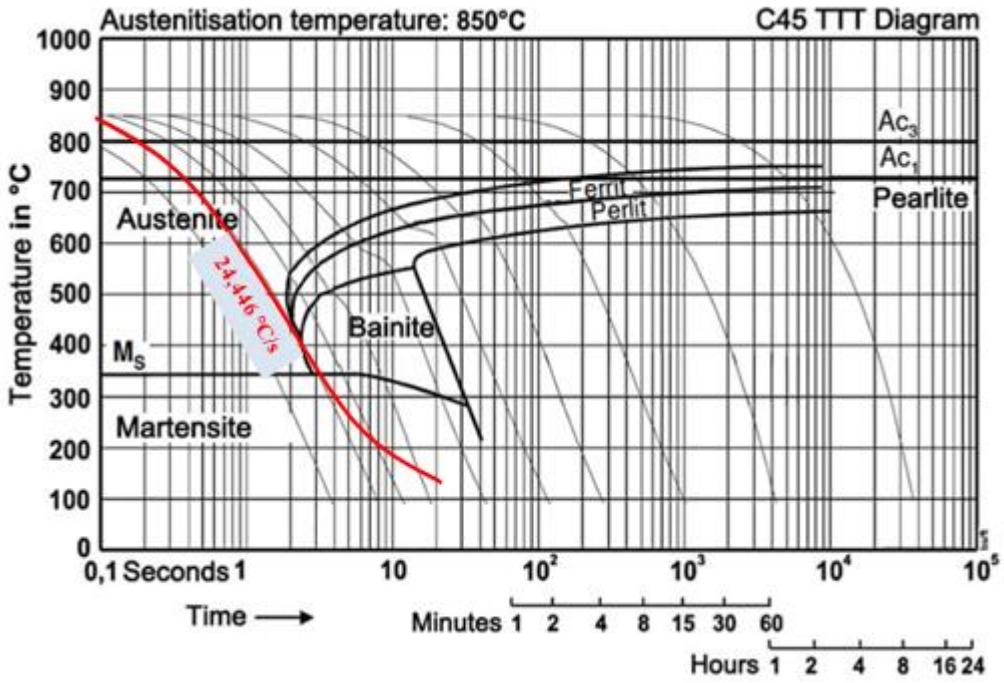
Teniendo en cuenta el diagrama de hierro- carbono, a medida que se le incrementa la temperatura al material este cambia su microestructura, para este caso en específico se mantiene una temperatura de aplicación de 1350°C lo que evidencia formación de fase austenita en su totalidad en los primeros cuatro nodos.

Figura 25. Curva de velocidad de enfriamiento para nodo a 0,5 mm



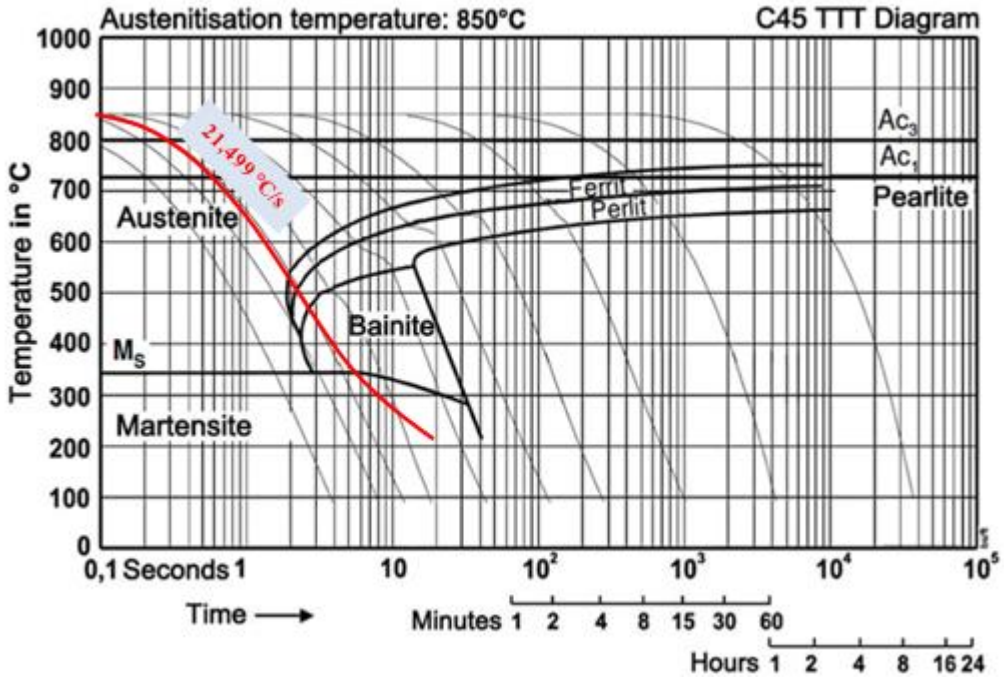
Fuente: Elaboración propia

Figura 26. Curva de velocidad de enfriamiento para nodo a 1 mm



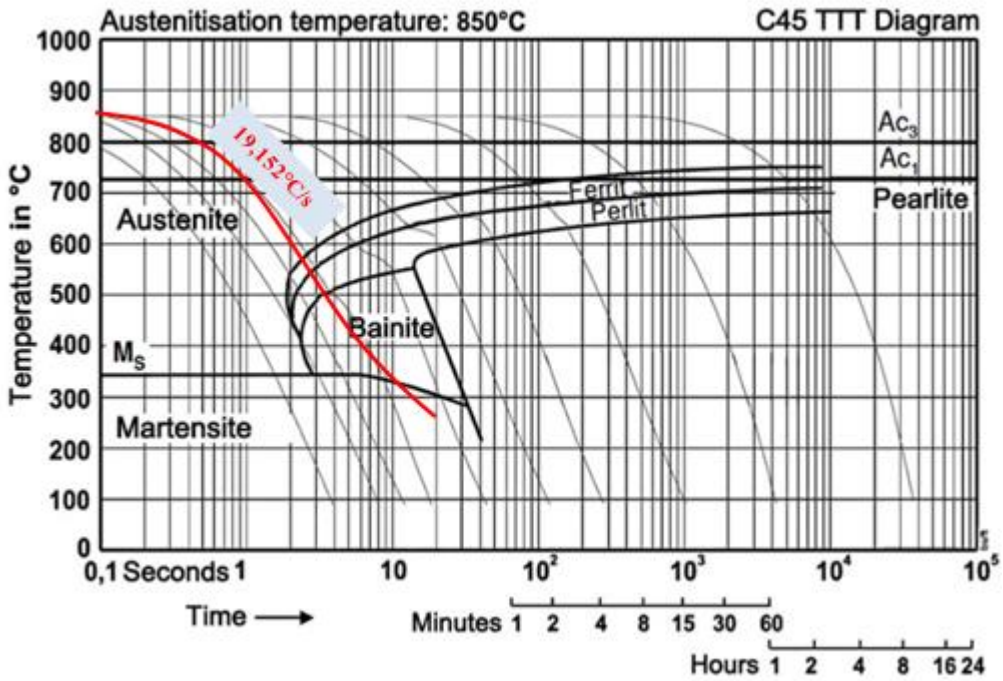
Fuente: Elaboración propia

Figura 27. Curva de velocidad de enfriamiento para nodo a 1,5 mm



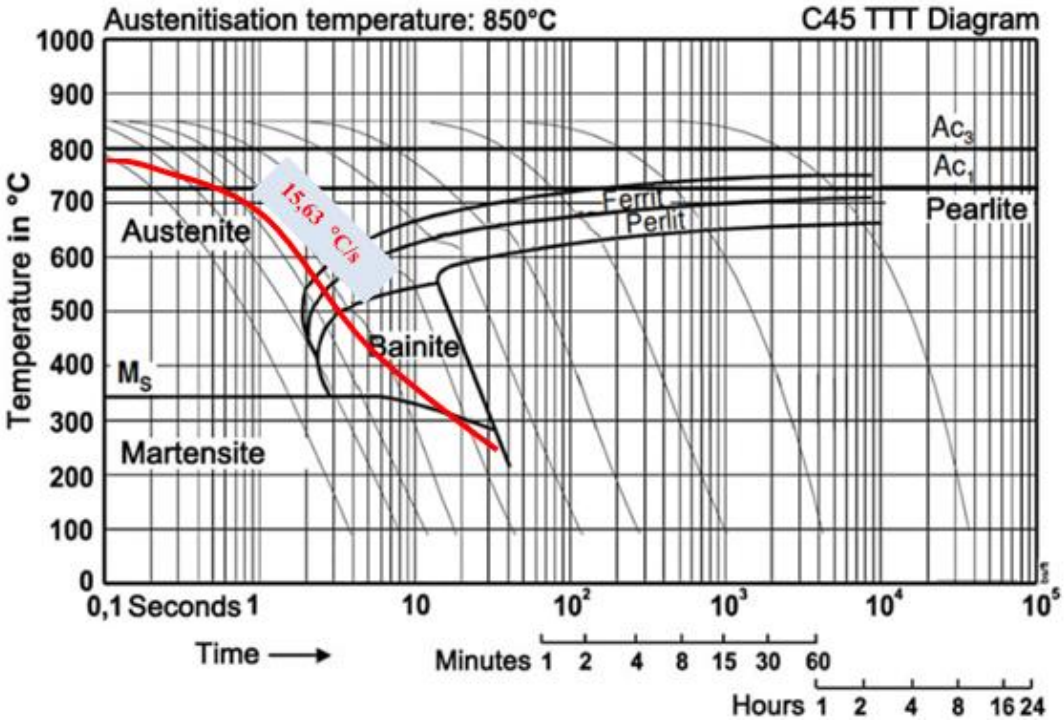
Fuente: Elaboración propia

Figura 28. Curva de velocidad de enfriamiento para nodo a 2 mm



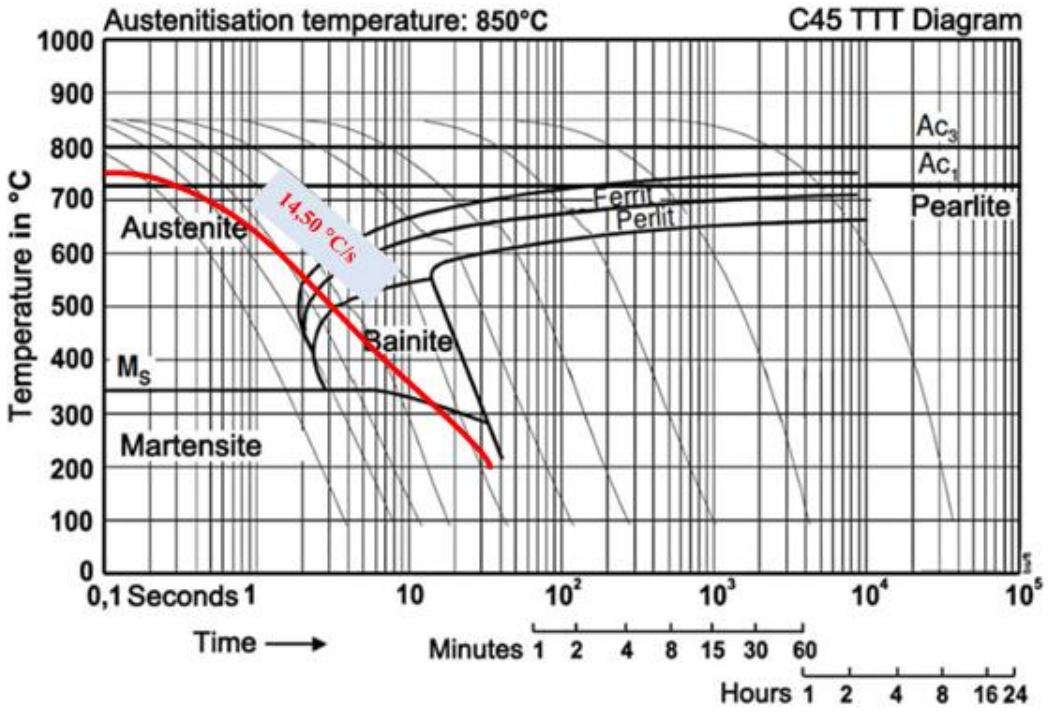
Fuente: Elaboración propia

Figura 29. Curva de velocidad de enfriamiento para nodo a 2,95 mm



Fuente: Elaboración propia

Figura 30. Curva de velocidad de enfriamiento para nodo a 3,3 mm



Fuente: Elaboración propia

3.2.2.1 Parámetros curva de enfriamiento

Con el fin de obtener los valores necesarios en el análisis de las curvas de enfriamiento, se debe calcular la temperatura Ac1 con la ecuación (3) y para Ac3 se usa la ecuación (4). Para evidenciar en dónde inicia la martensita y donde finaliza se usan las ecuaciones del numeral 2.4.2.3

$$Ac1 = 727\,°C$$

$$Ac3 = 788\,°C$$

$$M_s = 332\,°C$$

$$M_f = 117\,°C$$

3.2.3 Porcentaje de cada fase

La cantidad de cada fase durante el enfriamiento va determinar el valor de la deformación presente en ese nodo de la unión, está se verifica mediante el diagrama CCT, las velocidades de enfriamiento y las ecuaciones de Steven y Haynes (5). Teniendo en cuenta que la temperatura de austenización del acero 1045 es de 850°C y las temperaturas mencionadas en el numeral 2.4.2.3 se puede identificar que los nodos de 0,5mm a 2mm están por encima de la temperatura Ac3 y se encuentran en una fase completa de austenita, realizando las curvas respectivas y se identifica el trayecto de la curva y el final de su temperatura para el mismo rango de tiempo.

Debido a que las ecuaciones del numeral 2.4.2.6 se encuentran en grados Fahrenheit es necesario hacer la conversión a grados Celsius y se obtiene que:

$$M_{10} = 322\,°C$$

$$M_{50} = 285\,°C$$

$$M_{90} = 229\,°C$$

$$M_{100} = 117\,°C$$

Teniendo en cuenta las temperaturas obtenidas de M10, M50, M90 y M100, se realiza un proceso de interpolación para calcular las cantidades exactas de martensita en cada nodo analizado, las cuales son las siguientes:

Tabla 10. Cálculo del porcentaje de martensita en el enfriamiento

Distancia nodo (mm)	% Martensita	% Martensita corregido
0,5	100	100
1	100	100
1,5	92,41071	92
2	59,28571	59
2,95	24,054	24

Fuente: Elaboración propia

3.2.4 Fracción volumétrica de cada fase

Con base a los nodos que se tomaron en cuenta, se observó que hay dos fases presentes, cuando se supera Ac3 hay una transformación completa de austenita, la cual se transforma en martensita completa o parcialmente. En caso de que la temperatura esté por debajo de Ac3 hay una fracción volumétrica de austenita y, por ende, la presencia de martensita en este intervalo es menor. En el primer caso, se calcula la fracción de volumétrica de martensita con la ecuación 5 y en el segundo, se analiza la figura 11 por lo tanto, se obtiene lo siguiente:

Tabla 11. Cálculo de la fracción volumétrica de martensita en el enfriamiento

Distancia nodo (mm)	Fracción volumétrica martensita
0,5	0,92
1	0,91
1,5	0,76
2	0,47
2,95	0,3

Fuente: Elaboración propia

3.3 Esfuerzos residuales

3.3.1 Cálculo de esfuerzos

Después de haber realizado el proceso pertinente para determinar las fases presentes, sus porcentajes y fracciones volumétricas en la pieza luego de realizar el proceso de soldadura, es posible calcular los esfuerzos residuales en cada uno de los nodos expuestos anteriormente. Los esfuerzos a calcular en este caso son los transversales y se calcularán a partir del cambio dimensional ocurrido en la junta, es decir, se tendrá en cuenta la deformación y, por ende, se usará la ecuación de la ley de Hooke (7) mencionada en el numeral 2.5.2 y para el módulo de elasticidad, se utilizará el nombrado en el numeral 2.3.2

De igual manera, se debe tener en cuenta el porcentaje de martensita de cada nodo y su fracción volumétrica, los cuales fueron obtenidos en el numeral 3.2.3 y 3.2.4 respectivamente; en cada nodo se debe multiplicar la ley de Hooke por el respectivo porcentaje y fracción volumétrica. Fue necesario tener en cuenta que la cantidad de carbono es la misma en la austenita que en la martensita según Correa (numeral 2.4.1.1), también se debe suponer que una vez empiezan las transformaciones de fase en el material, no queda austenita retenida debido a la pequeña cantidad restante según el numeral 2.4.1.
Debido a la presencia de esfuerzos residuales en la zona intercrítica, se realiza el mismo procedimiento anterior, pero a diferencia de los nodos en la zona critica, se debe tener en cuenta la fracción volumétrica de austenita mencionada en 2.4.2.1 y no la fracción volumétrica generada por martensita, que de acuerdo con el trabajo realizado por Bohorquez la ecuación de Marburger solo es válida en temperaturas mayores a Ac3, para realizar el nuevo calculó se usa la figura 11, la cual comprende la fracción volumétrica de austenita para diferentes temperaturas y velocidades de calentamiento.

Para calcular la deformación, se usó la ecuación (8) y el porcentaje de carbono de la composición química, se obtiene que:

$$\varepsilon = 0{,}0155 - 0{,}0018(0{,}429)$$

$$\varepsilon = 0{,}0147278$$

Una vez calculada la deformación, se procede a calcular los esfuerzos con el módulo de elasticidad en pascales (Pa) y luego se hace la conversión pertinente para obtener el esfuerzo en mega pascales (Mpa), se obtiene que:

Tabla 12. Constantes para la aplicación de la ley de Hooke

Modulo de elasticidad	2,E+11	Pa
Deformación	0,0147278	

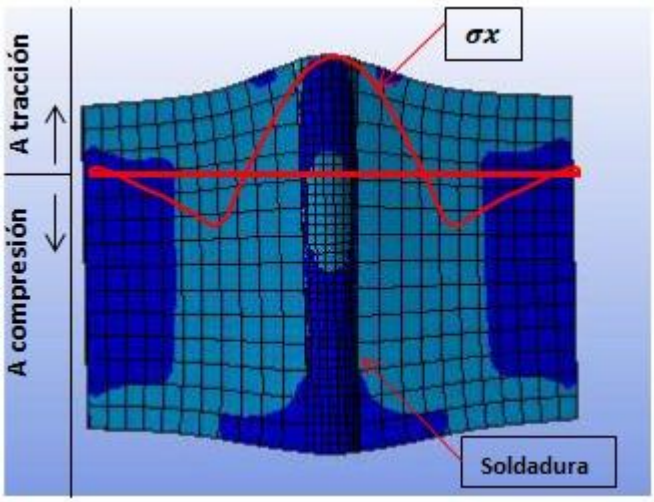
Fuente: Elaboración propia

Tabla 13. Cálculo de los esfuerzos residuales transversales en la junta

Distancia nodo (mm)	% Martensita	Fracción volumétrica	Esfuerzo	Unidades
0,5	1	0,92	2709,9152	Mpa
1	1	0,91	2680,4596	Mpa
1,5	0,92	0,76	2059,535552	Mpa
2	0,59	0,47	816,803788	Mpa
2,95	0,24	0,3	212,08032	Mpa

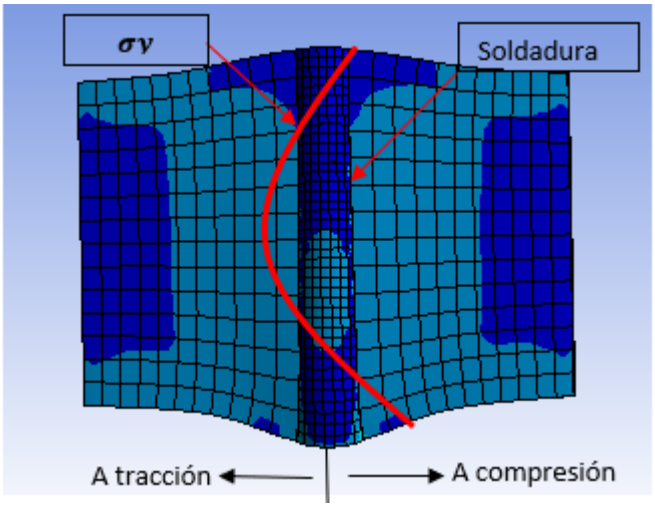
Fuente: Elaboración propia

Figura 31a. Esfuerzos longitudinales por el software Ansys



Fuente: Elaboración propia

Figura 31b. Esfuerzos transversales por el software Ansys



Fuente: Elaboración propia

En la figura 31a y 31b se muestra el posible estado final de la junta una vez realizado el choque térmico, donde se puede evidenciar una deformación del material tanto longitudinal como transversal respectivamente, esto debido a los esfuerzos residuales generados por el choque térmico, para ello se utilizó el software como referencia y predicción para el resultado físico y visual.

3.3.2 Cálculo de esfuerzos residuales por modelo plástico

Los esfuerzos residuales hallados entre el nodo a 0,5 mm y el nodo a 2,0 mm de la zona de fusión de la soldadura poseen esfuerzos por encima del límite de fluencia, el modelo citado en el numeral 2.5.2.2 se basa en la teoría de dislocación en el endurecimiento por deformación, este método es usado para predecir la curva de flujo de cada fase, además es implementado para estimar la relación esfuerzo-deformación en las fases simples, en este caso se va analizar la fase martensita la cual genera los esfuerzos residuales en la soldadura.

Para encontrar los esfuerzos residuales (σ) por medio de este método bilineal, es necesario hallar el esfuerzo de Peierl`s, ($\sigma 0$), con la ecuación (10), además, el endurecimiento estimado del material ($\Delta\sigma$) para martensita mediante la ecuación (11), y los valores constantes del numeral 2.5.2.2. Para poder determinar el porcentaje de carbono en la martensita, es necesario tener en cuenta CDP, y %Cm. Los valores calculados se presentan en la tabla (13).

Tabla 14. Cálculo de los esfuerzos residuales con modelo plástico

	Vm	Cm (%)	$\Delta\sigma$	
Nodo 0,5 mm	0,92	0,48913043	1338,184783	MPa
Nodo 1 mm	0,91	0,49450549	1354,659341	MPa
Nodo 1,5 mm	0,76	0,59210526	1653,802632	MPa
Nodo 2mm	0,47	0,95744681	2773,574468	MPa
$\sigma 0$	172,189	Mpa		

Fuente: Elaboración propia

La ecuación (9) queda en término de la deformación del material (ε), por lo tanto, este parámetro va depender de los valores obtenidos en la simulación, los cuales tienen un rango de valores específicos para cada nodo de la junta, estos se pueden apreciar en las tablas 14,15, 16 y 17.

Tabla 15. Cálculo de deformaciones y esfuerzos primarios para nodo 0,5 mm

ε	σ (Mpa)
0,000,E+00	1510,369
5,188,E-04	1699,339
1,038,E-03	1773,450
1,887,E-03	1856,238
3,144,E-03	1940,801
4,837,E-03	2019,325
6,910,E-03	2085,478
9,214,E-03	2136,203
1,152,E-02	2171,850
1,219,E-02	2180,263
1,287,E-02	2187,912
1,355,E-02	2194,873

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16. Cálculo de deformaciones y esfuerzos primarios para nodo 1 mm

ε	σ (Mpa)
0,00,E+00	1526,189
3,08,E-04	1672,706
1,03,E-03	1787,926
1,87,E-03	1870,382
3,11,E-03	1954,697
4,78,E-03	2033,110
6,84,E-03	2099,302
9,11,E-03	2150,179
1,14,E-02	2186,024
1,21,E-02	2194,500
1,27,E-02	2202,211
1,34,E-02	2209,235

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17. Cálculo de deformaciones y esfuerzos primarios para nodo 1,5 mm

ε	σ(Mpa)
0,000,E+00	1825,189
4,286,E-04	1997,415
8,571,E-04	2065,606
1,558,E-03	2142,621
2,597,E-03	2222,647
3,996,E-03	2298,793
5,708,E-03	2365,020
7,611,E-03	2417,767
9,514,E-03	2456,391
1,007,E-02	2465,767
1,063,E-02	2474,397
1,119,E-02	2482,350

Fuente: Elaboración propia

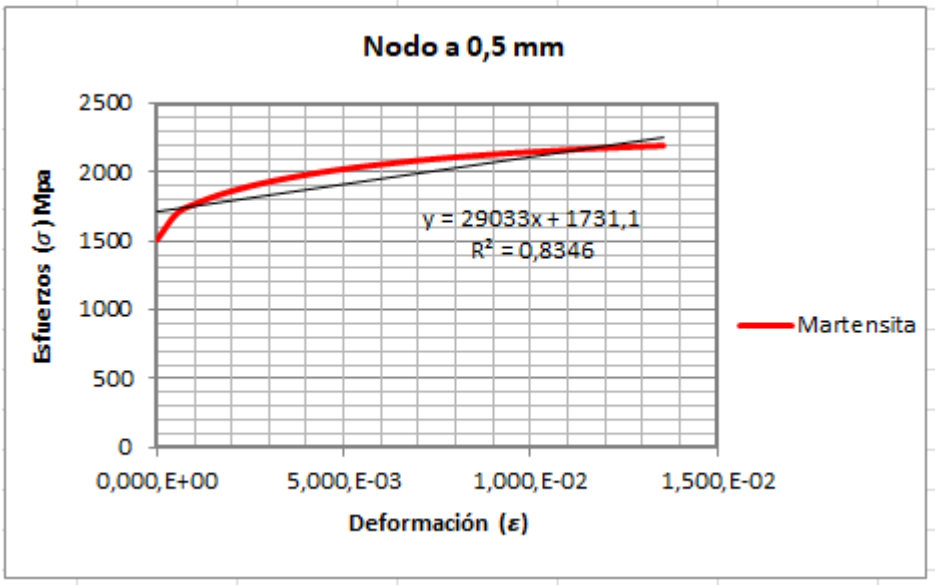
Tabla 18. Cálculo de deformaciones y esfuerzos primarios para nodo 2 mm

ε	σ (Mpa)
0,00,E+00	2945,76347
2,59,E-04	3080,447
5,19,E-04	3134,733
9,43,E-04	3197,316
1,57,E-03	3264,455
2,42,E-03	3331,305
3,46,E-03	3392,973
4,61,E-03	3445,643
5,76,E-03	3487,219
6,10,E-03	3497,836
6,44,E-03	3507,831
6,77,E-03	3517,254

Fuente: Elaboración propia

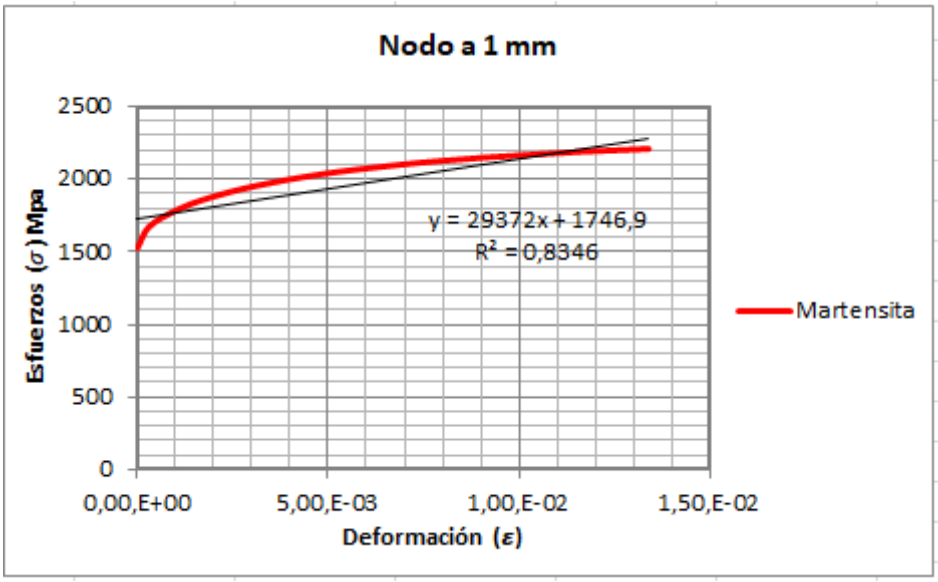
Con cada una de las tablas, se realizó la respectiva gráfica donde se puede apreciar la pendiente necesaria para calcular el esfuerzo plástico (véase figuras 32-35):

Figura 32. Gráfica esfuerzo -deformación nodo 0,5 mm



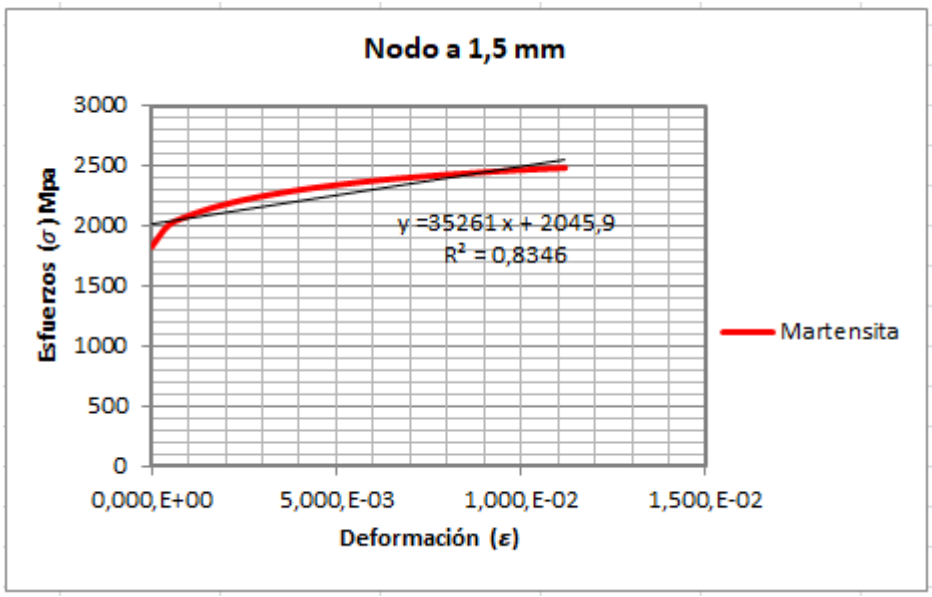
Fuente: Elaboración propia

Figura 33. Gráfica esfuerzo -deformación nodo 1 mm



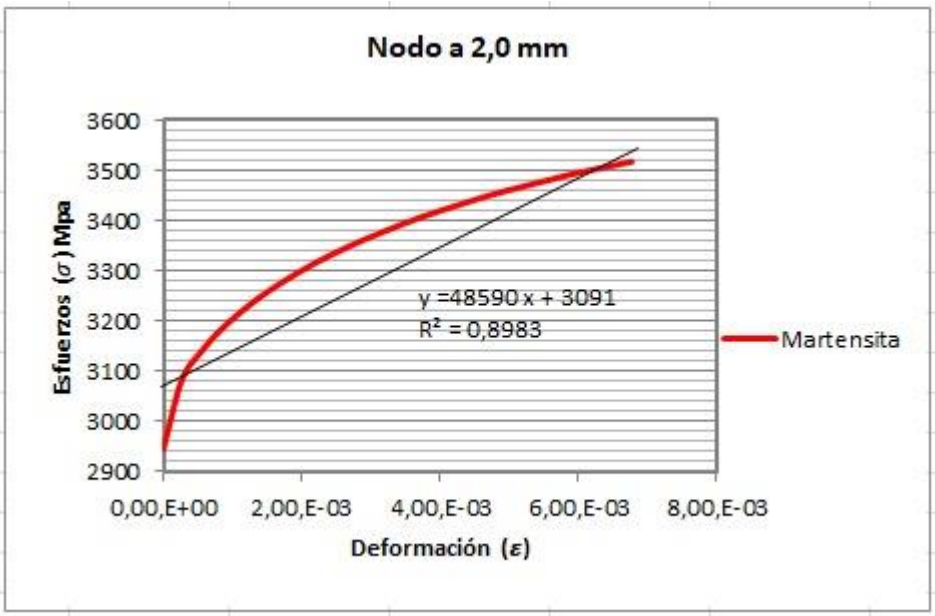
Fuente: Elaboración propia

Figura 34. Gráfica esfuerzo -deformación nodo 1,5 mm



Fuente: Elaboración propia

Figura 35. Gráfica esfuerzo -deformación nodo 2 mm



Fuente: Elaboración propia

Con la pendiente de cada nodo, es posible calcular el esfuerzo plástico dado por la deformación, para ello, se usó la ecuación 13 y 14, se obtuvo lo siguiente:

Tabla 19. Valores de esfuerzos finales

H (Pendiente)	E^{ep}	Esfuerzo	Unidades
29033	25352,6784	343,518043	Mpa
29372	25610,7982	343,243549	Mpa
35261	29976,0691	335,525979	Mpa
48590	39092,4816	270,600738	Mpa

Fuente: Elaboración propia

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez realizado todo el proceso, es pertinente analizar los resultados que ha arrojado la simulación, para ello, se hablará específicamente de algunos puntos, tales como el ciclo térmico y su comportamiento, los cambios en la microestructura y cómo los esfuerzos residuales producen alteraciones en la pieza ante una posible operación.

En primer lugar, en el ciclo térmico se evidencia que cada nodo del material base para un mismo intervalo de tiempo presenta una temperatura diferente, es decir, que la temperatura máxima alcanzada por cada nodo debido al proceso de soldadura se obtiene en diferentes instantes; así mismo, la temperatura máxima alcanzada es menor a medida que se aleja del foco calorífico. Adicionalmente, aproximadamente a los 20 segundos de iniciada la simulación, se presenta una convergencia de todas las temperaturas de los nodos, es en ese instante donde todos los nodos empiezan a tener el mismo comportamiento, debido a que en ese momento el calor producido por el electrodo mientras se hace el cordón ya fue transferido por toda la pieza y también, en ese instante todos los nodos ya alcanzaron su temperatura máxima para terminar en una temperatura muy similar a los 55 segundos.

Durante el enfriamiento se puede apreciar que al no haber presencia de ningún tratamiento térmico, la pieza logra alcanzar una temperatura estable en los extremos de las secciones, pero esta sigue siendo muy alta varios segundos después de haberse realizado la soldadura (35 segundos, 310°C), el coeficiente de convección no es suficiente para lograr un enfriamiento a una temperatura cercana a la ambiente de manera natural y acelerada.

Como se mencionó anteriormente, la temperatura ambiente que posee la pieza al comienzo del proceso permite la existencia de un diferencial térmico entre el cordón de soldadura y el extremo de la pieza, así mismo, la presencia del coeficiente de convección a lo largo de toda la simulación, incrementan los procesos de dilatación y contracción sin control alguno, dando paso a una zona afectada por la temperatura de austenización de un 30% del volumen de la junta.

La temperatura de aplicación de la soldadura provoca que la presencia de austenita sea mayor mientras la pieza va adquiriendo mayor temperatura, de tal manera que la ferrita termine siendo básicamente inexistente en algunas partes, a partir de las velocidades de enfriamiento que tienen como característica un descenso muy pronunciado durante su primer segundo (nodo 0,5 mm tiene una velocidad de enfriamiento de 376,91 °C/s en un segundo), se

logra obtener el cambio de fase producido por la austenización. La martensita es la principal fase que se obtiene una vez enfriada la pieza, las curvas de enfriamiento evidencian que entre más lejos se encuentre del cordón, menos porcentaje de martensita habrá, pero se observa que dicho porcentaje conserva cierta estabilidad hasta un alrededor de 1,5 mm luego de la temperatura de aplicación, después de esto la martensita pierde presencia drásticamente.

Durante las transformaciones de fase, también se demuestra que, a pesar que después de cierto punto la temperatura obtenida no supera Ac1, también hay un cambio presente en el material, ya que este tiende a ablandarse por dicha temperatura a la que es expuesto. La alta presencia de martensita también puede explicarse partiendo de la nula existencia de un enfriamiento forzado, puesto que, si se observa el diagrama CCT, es posible notar que, si hubiese un proceso donde el enfriamiento estuviera controlado, habría mayor porcentaje de perlita o quizás, perlita en su totalidad.

Al realizar el procedimiento con un caso crítico, es decir, una unión con un espesor de 6 mm y dos placas de 22 mm de largo genera una zona afectada por el calor con mayor concentración térmica, lo que ocasiona calentamiento desigual alrededor de toda la pieza y esto aumenta dramáticamente los esfuerzos residuales y deformaciones en la zona cercana al foco calorífico, por ende, si se cuenta con una pieza de mayor dimensiones habrá una mejor distribución de calor que como consecuencia tendrán esfuerzos residuales más bajos.

Después de obtener los esfuerzos residuales por medio de la ley de Hooke se puede afirmar que los más críticos, donde se supera el límite de fluencia están en la zona afectada por el calor, la cual, según el estudio térmico, es de 3,3 mm. En esta parte del material se pueden originar grietas, las cuales provocan una afectación en el funcionamiento de toda la pieza, es necesario afirmar que a pesar del pequeño tamaño de esta zona podría ser algo drástico y totalmente crítico, por lo tanto, debe ser controlado con cualquier tipo de tratamiento térmico.

La aplicación de la temperatura de soldadura en el acero 1045 origina cambios en la microestructura del material, de acuerdo a los resultados obtenidos, es notable la presencia de martensita la cual no se encontraba en el material antes de la aplicación del calor, lo que permite una afectación en las propiedades mecánicas de la junta, puesto que, cada fase presenta características específicas. La martensita es una microestructura dura y frágil, por lo que su efectividad y prestaciones dependerá de la aplicación de la

soldadura, es decir, si se requiere una operación con mayor dureza y poco movimiento es deseable velocidades de enfriamiento rápidas para tener un alto porcentaje de martensita.

Los esfuerzos, cuando no son iguales, pueden ocasionar deformaciones del material. Grandes esfuerzos en un lado de la pieza provocan movimiento o deformación. Si los esfuerzos son iguales a lo largo de toda la pieza, se compensan y no hay deformación.

En la zona de temperaturas Intercríticas debido a que la austenita tiene menor fracción volumétrica, se genera un menor porcentaje de martensita al realizar la curva de velocidades de enfriamiento, lo que da a lugar a esfuerzos residuales por debajo del límite de fluencia, evidenciando que la martensita es directamente proporcional a los esfuerzos residuales producidos por el choque térmico.

Es importante tener en cuenta el valor de esfuerzo para determinar si será elástico o plástico, debido a que, para hallar los esfuerzos plásticos se deben contar con un nuevo módulo de Young el cual depende de la pendiente obtenida a partir de la fracción volumétrica de las fases y, por ende, de la temperatura de aplicación. La obtención correcta de estos esfuerzos es necesaria para conocer los límites del material, con ello, es posible evitar roturas y también, se pueden tomar las medidas pertinentes en cuestiones de seguridad. Los esfuerzos residuales reales, permiten evidenciar ampliamente el comportamiento de la junta por la presencia de martensita, reduciéndose significativamente a comparación del modelo elástico, sin embargo, estos esfuerzos siguen siendo críticos, pues superan el límite de fluencia.

5. CONCLUSIONES

-El software de simulación Ansys cuenta con sistemas analíticos como el térmico transitorio, lo que permitió realizar la simulación satisfactoriamente, a partir del modelado del ciclo térmico, se obtuvieron los datos necesarios de temperatura a través del tiempo y en lugares específicos de la junta para hacer el análisis adecuado de las velocidades de enfriamiento y posteriormente, hallar los esfuerzos residuales en el material. No obstante, el software permite realizar un proceso ideal de soldadura y no tiene en cuenta el porcentaje de error de un tratamiento real.

-Las curvas de velocidades de enfriamiento en el diagrama CCT permitieron obtener las fases después de realizar la soldadura, se evidencia la presencia total de austenita como consecuencia de la temperatura de aplicación de 1350°C y una transformación a martensita debido al enfriamiento rápido y desigual de la pieza, aunque la presencia de martensita se ve altamente definida por la distancia entre el nodo y la aplicación de temperatura, e igualmente por el tiempo que toma dicho enfriamiento, es decir, si la junta toma más de 10 segundos en enfriarse surge la posibilidad de que una fracción de la misma se transforme en perlita.

-El cambio térmico sufrido por la pieza da paso a los esfuerzos residuales, estos esfuerzos fueron obtenidos por los cambios dimensionales en la junta los cuales se reflejan en deformaciones, que, en conjunto con la ley de Hooke y el modelo plástico de transformación bilineal, fue posible calcular. Se demostró que la ZAC de la pieza es crítica y el material en esa parte sufre alteraciones plásticas, teniendo en cuenta las dimensiones limitadas del material estos esfuerzos deberían considerarse determinantes, por lo tanto, en una aplicación real deben tenerse en cuenta en el proceso de diseño para garantizar una mejor vida útil de la unión y aumento de la confiabilidad.

BIBLIOGRAFÍA

1. BELLO, Elisa y MARCHENA, María Angélica. Determinación de los esfuerzos residuales en uniones soldadas a tope a través de la teoría de Masubushi. Trabajo de grado Ingeniero mecánico. Valencia. Universidad de Carabobo. Facultad de ingeniería. Escuela de ingeniería mecánica, 2008. 105p.

2. 8° CONGRESO IBEROAMERICANO DE INGENIERÍA MECÁNICA. (3: 23-25, octubre de 2007: Cusco, Perú). Simulación de un proceso de soldadura mediante un modelo termo-mecánico considerando el efecto de esfuerzos residuales utilizando el método de los elementos finitos. Cusco. Pontificia Universidad Católica del Perú, 2007. 13 p.

3. BATE, SK, et al. MEASUREMENT AND MODELLING OF RESIDUAL STRESSES IN THICK SECTION TYPE 316 STAINLESS STEEL WELDS. Enero, 2000. 9 p.

4. 7th International Conference on Fatigue Design, Fatigue Design 2017. (2: 29-30, noviembre de 2017: Senlis, Francia). Modeling and simulation of weld residual stresses and ultrasonic impact treatment of welded joints. Senlis. Universidad de Purdue y Universidad de Concordia, 2017. 12 p.

5. LAUNERT, Benjamin et al. Measurement and numerical modeling of residual stresses in welded HSLA component-like I-girders. Diciembre 2016. No 61, p. 223-229.

6. RAMOS, Vega. Análisis mediante Simulación del Efecto de las Reparaciones en las Tensiones Residuales de Soldeo. Trabajo de grado ingeniería naval y oceánica. Universidad politécnica de Cartagena. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Naval y Oceánica. Tecnología naval, 2013. 109 p.

7. RUIZ, Edward y ARIAS, Christian. MODELACIÓN POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF), MEDIANTE EL SOFTWARE ANSYS DEL ELEMENTO PLACA. Trabajo de grado Ingeniero civil. Bogotá DC. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad tecnológica. Ingeniería civil, 2019. 116 p.

8. KOU, Sindo. Fusion Welding Processes. En: Welding metallurgy. 2 Ed. New Jersey: John Wiley, 2003. p. 3-36.

9. CORREA, Fabián. ANÁLISIS MICROGRÁFICO DE UNA UNIÓN SOLDADA CON POSTCALENTAMIENTO EN UN ACERO AISI/SAE 1045 EN DOBLE FASE. Trabajo de grado tecnólogo mecánico. Bogotá DC. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad tecnológica. Tecnología e ingeniería mecánica, 2018. 58 p.

10. WELDG. TEORÍA Y CÁLCULOS DE SOLDADURA. Agosto, 2013. [Disponible]. Tomado de: https://metfusion.wordpress.com/2013/08/08/teoria-de-los-procesos-de-soldadura/

11. RODRÍGUEZ, Matías. Proceso de soldadura - SMAW. [Disponible]. Tomado de: https://www.esab.com.ar/ar/sp/education/blog/proceso-soldadura-smaw.cfm

12. CIA. GENERAL DE ACEROS S.A. SAE 1020 Y SAE 1045 Aceros ingeniería al carbono [infografía]. Bogotá DC, 2013.

13. BOHORQUEZ, Carlos et al. CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE UN ACERO AISI/SAE 1045 TRATADO TÉRMICAMENTE EN EL INTERVALO INTERCRÍTICO. Bogotá DC. Universidad Libre. 2014. 6 p.

14. ORTIZ, Jhon. INFLUENCIA DEL TEMPLE DESDE TEMPERATURAS INTERCRÍTICAS Y EL REVENIDO EN LA RESISTENCIA A LA FATIGA DE UN ACERO SAE 1045. Trabajo de grado tecnólogo mecánico. Bogotá DC. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad Tecnológica. Tecnología e ingeniería mecánica, 2017. 41 p.

15. GORNI, Antonio. STEEL FORMING AND HEAT THREATING HANDBOOK. 2 ed. Sao Vicente, Brasil. Enero 2012. 131 p.

16. STEVEN, W y HAYNES, A.G. The Temperature of Formation of Martensite and Bainite in Low Alloy Steels. Journal of the Iron and Steel Institute, 183, 1956, p 349-359.

17. ZAPATA, Julio. Evaluación de los esfuerzos residuales en juntas de aluminio unidas mediante el proceso de soldadura por fricción agitación. Trabajo de grado Msc ingeniería mecánica. Medellín. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, 2013. 157 p.

18. WITHERS, P Y BHADESHIA, H. Residual stress. Part 1–measurement techniques, Materials Science and Technology, vol. 17, no. Abril 2001. p. 355–365.

19. KOU, Sindo. Residual Stresses, Distortion, and Fatigue. En: Welding metallurgy. 2 ed. New Jersey: John Wiley, 2003. p. 122-142.

20. KRAUSS, G. Steel: Processing, Structure and Performance. 2 ed. Metals Park, ASM International, 2015. 682 p.

21. GIRINA, Olga et al. Effect of Heating Rate on the Austenite Formation in Low-Carbon High-Strength Steels Annealed in the Intercritical Region. Diciembre, 2011. 11 p.

22. BOHORQUEZ, Carlos. TRANSFORMACIONES DE FASE EN TRATAMIENTOS A TEMPERATURAS INTERCRITICAS Y SU INFLUENCIA EN LA RESISTENCIA ÚLTIMA A LA TENSIÓN EN ACEROS DE BAJO Y MEDIO CARBONO. 34 p.

23. RODRIGUEZ, Daniel y ÁLVAREZ, Juan. VERIFICACIÓN DEL DIAGRAMA ESFUERZO-DEFORMACIÓN DE UN ACERO AISI 1020 TEMPLADO A TEMPERATURAS INTERCRÍTICAS USANDO LA TÉCNICA RVE POR ELEMENTOS FINITOS. Trabajo de grado tecnólogo mecánico. Bogotá DC. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad Tecnológica. Tecnología e ingeniería mecánica, 2018. 64 p.