**COMEC 2019. SIMPOSIO DE SOLDADURA**

**Título**

**Ajuste mediante simulación por elementos finitos entre las variables calor de entrada y tiempo de enfriamiento de la ZAT para soldadura GMAW sobre acero dúplex 2205**

***Heat inputs adjustment corresponding to the HAZ cooling times in GMAW on 2205 duplex steel using finite element simulation***

Juan A. Pozo-Morejón1, Luis F. Guimaraes de Souza2, Thiago Guerra3, E. V. Morales4,

Ivani De Souza Bott3, Amado Cruz-Crespo1, Osniel Rodríguez Pérez1

1 Centro de Investigaciones de Soldadura, CIS, Universidad Central ¨Marta Abreu¨ de Las Villas, Santa Clara, VC, Cuba

2 Centro Federal de Educação Tecnológica, CEFET/RJ, Río de Janeiro, RJ, Brasil

3Departamento de Ingeniería Química y de Materiales, DEQM, Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Río de Janeiro, RJ, Brasil, jpozo@uclv.edu.cu

4 Departamento de Física, Universidad Central ¨Marta Abreu¨ de Las Villas, Santa Clara, VC, Cuba,

**Resumen:** En el trabajo se realiza un ajuste de los calores de entrada que se corresponden con los tiempos de enfriamiento “t12/8” y “t8/5” de interés, en la ZAT para la soldadura GMAW de una chapa de acero inoxidable dúplex 2205, de 10 mm de espesor, empleando la simulación por elementos finitos. Para la modelación del proceso de soldadura se empleó una metodología desarrollada previamente, la cual se enriqueció con la incorporación de un factor de corrección del calor aportado, a los elementos finitos por los que pasa la fuente de calor. En el trabajo además se demuestra, que cuando se utiliza el conocido modelo teórico para análisis de los fenómenos térmicos durante la soldadura, de Rykalin 2D, son más precisos los resultados que relacionan las variables calor de entrada - tiempo de enfriamiento, empleando las propiedades promedio del acero en el rango de temperatura desde la ambiente hasta la de sólido, que los que se obtienen cuando se sustituyen las propiedades a temperatura ambiente.

***Abstract:*** *In the present paper, an adjustment of the heat inputs corresponding to the cooling times of interest "t12 / 8" and "t8 / 5" in the HAZ of the GMAW of a duplex stainless steel 2205, of 10 mm thickness, using finite element simulation is made. For simulation, a welding modeling methodology previously developed was used, and it was enriched with the incorporation of a correction factor of the heat transferred to the finite elements by which the heat source passes. In the paper is also demonstrated that the results of the relation of the heat input and cooling time variables are more accurate when using the Rykalin 2D theoretical model with the average properties of the steel in the range from room to solid temperature, than those obtained when the properties are replaced at room temperature.*

**Palabras Clave:** Acero dúplex; Calor de entrada; GMAW; Simulación de soldaduras; Tiempo de enfriamiento.

***Keywords:*** *Duplex Steel; Heat input; GMAW; Welding simulation; Cooling time.*

**1. Introducción**

Desde hace décadas se han desarrollado modelos teóricos para el análisis de la transferencia de calor en uniones soldadas y uno de los más conocido es el de Rykalin 2D, para flujo de calor bidimensional [1-4]. Este modelo presenta actualidad ya que es uno de los empleados para generar la curva del ciclo térmico, en un equipo moderno destinado a la simulación física de la zona afectada térmicamente de soldadura (ZAT), denominado Gleblee 3800 [4]. Entre otras cosas, dicho modelo permite establecer la Ecuación 1, que relaciona el calor de entrada en una soldadura con los tiempos de enfriamiento “t12/8” y “t8/5” de la ZAT, que influyen en la microestructura y las propiedades de la unión.

 $∆t= \frac{Q^{2}}{4πλρcd^{2}}\left[\frac{1}{\left(T2-To\right)^{2}}-\frac{1}{\left(T1-To\right)^{2}}\right]$ (1)

Donde “Δt” representa el tiempo de enfriamiento en un intervalo de interés definido por las temperaturas “T1” y “T2”, si se cumple que T1 > T2; “Q” el calor de entrada de la soldadura (heat input), que representa un por ciento del calor que genera el arco eléctrico, en (J/mm); “λ” representa la conductividad térmica del material (J s-1 mm-1 oC-1); “ρc” el calor específico (J mm-3 oC-1); “d” el espesor de placa (mm); “To” la temperatura inicial de la placa, temperatura de precalentamiento o temperatura entre pasadas (oC).

En ocasiones los especialistas sustituyen en la Ecuación 1 las propiedades físicas del material que se corresponden con la temperatura ambiente, ya que constituyen datos disponibles con facilidad. Por otro lado, esta Ecuación es aplicable solo en el caso que se cumpla la condición de transferencia de calor bidimensional (2D), que se asume ocurre en planos paralelos a la superficie de la placa, en direcciones longitudinal y transversal a la soldadura. En este modelo Rykalin 2D se considera que en cada instante de tiempo la distribución de temperaturas es uniforme a través del espesor de la placa, lo que significa que la configuración de isotermas es idéntica en cualquier plano paralelo a la superficie. Este modelo es utilizable cuando el espesor es inferior a un espesor crítico “dc”, que constituye la frontera de aplicación del mismo. Se considera que por encima de “dc” la transferencia de calor de la unión soldada pasa a ser tridimensional, de manera que aparece también la transferencia de calor en dirección normal a la superficie de la placa y el modelo de transferencia en dos dimensiones deja de ser aplicable.

El modelo teórico de Rykalin 2D posee limitaciones, ya que representa una solución extrema de flujo de calor bidimensional en chapa considerada “fina”, no puede considerar las variaciones de las propiedades físicas del material respecto a la temperatura y no cuantifica la pérdida de calor al medio, lo que en alguna medida se aleja de lo que acontece en las soldaduras reales.

Estas limitaciones del modelo de Rykalin pueden ser superadas a través del análisis del proceso de transferencia de calor en soldaduras empleando la simulación numérica mediante elementos finitos. Los análisis térmicos de soldaduras que se realizan en este trabajo, a través de un software de elementos finitos de aplicación general, emplean códigos en lenguaje APDL (ANSYS Parametric Design Language) que en esencia se han desarrollado previamente [5-7]. Dichos códigos debe reproducir los aspectos propios de este proceso entre los que se encuentran la geometría y movimiento de la fuente de calor sobre la pieza, el aporte de metal, la transferencia de calor al medio, así como implementar propiedades físicas termodependientes del material.

Los aceros inoxidables dúplex son ampliamente utilizados en aplicaciones de la industria moderna, por lo que la soldadura de estos tiene especial relevancia. Es conocido que en última instancia la estructura y propiedades obtenidas en la ZAT de estos aceros, producto del proceso de soldadura, depende de los tiempos de enfriamiento, “t12/8” y “t8/5”, que se producen durante el ciclo térmico, en los intervalos de temperaturas de 1200 ºC a 800 ºC y de 800 ºC a 500 ºC, respectivamente. Estos tiempos de enfriamiento dependen del calor que entra a la unión producto del proceso de soldadura, el que representa un por ciento de la potencia térmica que genera el arco, a partir de los parámetros del régimen utilizados en cada caso. Por tanto, para los especialistas que elaboran procedimientos de soldadura es importante conocer previamente la correspondencia real entre los parámetros que se enumeraron anteriormente, con vistas a conseguir uniones con las propiedades requeridas. Las herramientas con que se cuenta para establecer dicha correspondencia son los modelos teóricos, como el dado en la Ecuación 1, o la simulación mediante elementos finitos que se va imponiendo en las últimas décadas.

En este contexto, el presente estudio se propone como objetivo realizar un ajuste de los calores de entrada de una soldadura real que se corresponden con los tiempos de enfriamiento “t12/8” y “t8/5” de interés en la ZAT (que barren el rango posible que se presenta industrialmente) de la soldadura GMAW de una chapa de acero duplex 2205, de 10 mm de espesor, empleando el modelo teórico de Rykalin 2D y la simulación mediante el método de elementos finitos (MEF). Para lograr lo anterior, previamente el trabajo se propone validar el código en lenguaje APDL utilizado para simular la soldadura en este material, así como enriquecerlo con vistas a aumentar su fiabilidad y precisión en los resultados.

**2. Metodología**

**2.1. Propiedades termofísicas del acero dúplex 2205**

En la simulación mediante MEF se emplearon las propiedades físicas termodependientes del acero 2205, reportadas por Xiaojun [8] (Figura 1). Solo se introdujo como modificación el aumento del valor de la conductividad térmica por encima de la temperatura de sólido, con vistas a simular la transferencia de calor por convección que se produce en el baño de metal líquido de una soldadura real. De esta manera se logra aproximar la transferencia de calor por convección en el baño líquido utilizando el tradicional modelo sólido de elementos finitos, con transferencia de calor por conducción, mediante el aumento forzado de la conductividad térmica del material, en el rango de temperaturas por encima de la temperatura de fusión. Lo anterior evita la necesidad de simular el movimiento de un fluido, lo que aumentaría innecesariamente la complejidad. En los modelos se asumió una densidad constante del material, de 7800 kg m-3 [9], ya que su variación respecto a la temperatura no posee un peso relevante en los resultados.



Figura 1. Propiedades físicas termodependientes del acero 2205 empleadas en la simulación.

En el trabajo se utilizaron, cuando se aplica el modelo teórico (Ecuación 1), los valores de propiedades termofísicas constantes para el acero dúplex 2205, en primera instancia las promedio desde la temperatura ambiente hasta la de sólido, determinadas por el método de las áreas bajo las curvas de la Figura 1: λ ≈ 22 · 10-3 J s-1 mm-1 oC-1; ρc ≈ 5,3 · 10-3 J mm-3 oC-1 [8]. En segunda instancia, en el modelo teórico se emplearon las propiedades del material que se corresponden con la temperatura ambiente de 28 ºC, que se obtienen también a partir de dicha Figura: λ ≈ 19 · 10-3 J s-1 mm-1 oC-1; ρc ≈ 3,12 · 10-3 J mm-3 oC-1 [8]

2.2. Elaboración de modelos para la simulación de soldaduras GMAW sobre chapas de acero 2205 empleando el análisis por elementos finitos

La modelación fue ejecutada empleando una metodología de análisis térmico de soldaduras por elementos finitos desarrollada previamente [5-7], con la implementación del modelo de fuente de calor de doble elipsoide de Goldak [10,11], mediante código en lenguaje APDL. El estudio que se realizó en este trabajo partió de la validación del modelo de elementos finitos de soldadura GMAW, sobre chapa de acero duplex 2205, a través de la elaboración y corrida del mismo y el posterior cotejo de los resultados de ciclos térmicos simulados, respecto a los obtenidos durante una soldadura real. Lo anterior fue publicado por Pozo-Morejón en trabajo previo [12].

Se simuló una soldadura de ranura GMAW, que se aproxima a las condiciones del modelo teórico de Rykalin de transferencia de calor en dos dimensiones. Desde el punto de vista geométrico, de aplicación de la carga térmica, de pérdida de calor por convección al medio, así como del proceso de transferencia de calor por conducción a través del sólido, el modelo a analizar es simétrico, por lo que se simuló solo la mitad de la pieza, lo que redujo el tiempo computacional. Se construyó un modelo de chapa con dimensiones de 10 mm x 150 mm x 150 mm, que simula la mitad de la unión, aprovechando la simetría del problema. En este caso no se consideró ningún refuerzo de soldadura sobre la superficie de la placa, que solo complicaría innecesariamente el modelo. Se empleó en el mallado el elemento SOLID70 de seis caras y ocho nodos [13]. Se refinó la malla en la zona cercana a la soldadura y se hizo más basta en las zonas alejadas. Para mayor ajuste de los resultados se decidió emplear una malla fina, con elementos cúbicos en la zona de la soldadura y cercana, con una dimensión de arista de 0,81 mm. El centro de la fuente de calor de Goldak se hizo desplazar por un canto de la chapa (que representa el centro de la chapa real de 10 x 150 x 300 mm), comenzando a 5 mm del borde y desplazándose una longitud de 138 mm. Como dimensiones geométricas utilizadas en el modelo de doble elipsoide fueron establecidas para el semiancho, la profundidad y el semilargo delantero 7 mm, mientras que para el semilargo trasero se estableció 14 mm. La eficiencia térmica del proceso (η) se estableció en 85. Se utilizó un paso de tiempo de 1s, durante el tiempo de arco, con vistas a que el centro de la fuente de Goldak salte una dimensión inferior a un cuarto de su longitud, lo que cumple con recomendación de este autor [10].

Dentro del tiempo de arco, para cada paso de tiempo, el código APDL calcula la carga térmica que se aplica a cada elemento finito por el que pasa la fuente de calor a través de las expresiones de Goldak para el modelo de elipsoide delantero y trasero, a partir de la distancia del centro de este hasta el centroide de cada elemento [10,11]. En el código se aplica dicha carga térmica a partir del comando “BFE” y la etiqueta “HGEN”. Se garantizó el movimiento de la fuente de calor sobre los elementos, a través de toda la longitud de soldadura, con vistas a aplicar la carga térmica al modelo, mediante lazos “\*DO - \*ENDDO”. En cada paso del tiempo de arco se resuelve el sistema y finalizado cada uno se elimina la carga mediante comandos para tales efectos. Para concluir se resuelve un paso de tiempo final, que equivale al tiempo de enfriamiento de la placa hasta la temperatura ambiente, que contiene subpasos de tiempo variable.

Siguiendo la metodología preestablecida, fue empleado el método de solución “full” de “Newton Rapson”, un valor de convergencia de la solución de 0,1 **º**C y la carga térmica fue aplicada a saltos, en cada paso de tiempo. Como temperatura de partida de la placa, así como del medio circundante, se declaró 28 **º**C. Se estableció una pérdida de calor por convección al medio, sobre todas las áreas exteriores del modelo, declarando un coeficiente de convección de 12 W m-² **º**C-1, exceptuándose solo el área de simetría que se comporta como adiabática. Solo se consideraron las pérdidas de calor por radiación a través del ajuste del valor de eficiencia de la fuente de calor (η), como recomiendan varios autores [5-7,14]. Fue establecida una duración de 6000 s para el paso de tiempo final de enfriamiento, que garantiza el retorno del modelo a una temperatura cercana a la ambiente. De inicio en el modelo se desactivaron los elementos del cordón de soldadura para luego activarlos en el momento en que la fuente se encuentra sobre ellos, mediante comandos para tal efecto.

Como algo novedoso establecido respecto a trabajos precedentes [5-7], se utilizó en el código APDL un coeficiente de corrección del calor que se introduce al modelo por cada elemento finito. Este coeficiente de corrección se determinó mediante el cociente del calor introducido a la pieza por la soldadura real (calculado en Joule a partir de la eficiencia térmica del proceso, intensidad de corriente, voltaje y tiempo de arco) y el calor total que se introduce al modelo (suma del calor en Joule, que se aplica como carga térmica a todos los elementos del modelo, en todos los pasos del tiempo de arco). Lo anterior se logra repitiendo al inicio de la etapa de solución del programa APDL el mismo lazo “\*DO - \*ENDDO” de aplicación del calor en cada elemento y paso de tiempo, pero en este caso, sin resolver el sistema, eliminando el comando para tal efecto. Finalmente, al ejecutar la simulación definitiva de aplicación del calor al modelo y movimiento de la fuente se empleó un lazo similar al anterior, pero introduciendo el comando de la Ecuación 2, además del comando de solución del sistema en cada paso de tiempo. De esta forma se garantiza que, independientemente del tamaño y número de los elementos finitos de la malla, el calor total que finalmente se introduce al modelo coincida exactamente con el calor que se aporta en la soldadura real, eliminando una posible fuente de error en los mismos.

BFE,ELEMENTO,HGEN, ,QELEM\*COEFCOR (2)

Donde “QELEM” representa la densidad de potencia térmica calculada para cada elemento a través de expresión del modelo de doble elipsoide de Goldak [10-11] y “COEFCOR” el coeficiente de corrección referido.

Como es de esperar, debido a las simplificaciones propias del modelo de Rykalin 2D, empleando propiedades termofísicas medias del material entre la temperatura ambiente y de sólido, o simplemente las propiedades a temperatura ambiente, debe existir un error en los calores de entrada que este relacionan con los tiempos de enfriamiento de interés (t12/8 y t8/5) en la ZAT. Los tiempos de enfriamiento asumidos como de interés en el estudio, se muestran en las columnas sin resaltar de la Tabla 1 y se determinaron a través de la Ecuación 1 o modelo de Rykalin, a partir de calores de entrada seleccionados de 1000, 1500, 2000, 2500 y 3000 J mm-1,de manera que barren el rango que se presenta durante la soldadura industrial GMAW de estos. De esta forma los calores de entrada se ajustaron realizando corridas sucesivas del modelo de elementos finitos para diferentes valores de estos, hasta llegar a los que produjeron los tiempos de enfriamiento más cercanos a los de interés.

Tabla 1. Calores de entrada de soldadura ajustados, empleando la simulación por elementos finitos, que se corresponden con los tiempos de enfriamiento determinados según modelo teórico de Rykalin 2D.

|  |  |
| --- | --- |
|  | **Calor de entrada (J mm-1)** |
| R2Dm | **MEF** | R2Dm | **MEF** | R2Dm | **MEF** | R2Dm | **MEF** | R2Dm | **MEF** |
| 1000 | **920** | 1500 | **1350** | 2000 | **1800** | 2500 | **2300** | 3000 | **2900** |
| **DR (%)** |  | **8,7** |  | **11,1** |  | **11,1** |  | **8,7** |  | **3,4** |
| **t12/8 (s)** | 6,4 | **5,8** | 14,4 | **12,7** | 25,6 | **25,1** | 40,1 | **41,7** | 57,7 | **62,6** |
| **DR (%)** |  | 10,3 |  | 13,4 |  | 2,0 |  | 3,8 |  | 7,8 |
| **t8/5 (s)** | 18,9 | **21,9** | 42,5 | **50,0** | 75,5 | **80,9** | 117,9 | **116,0** | 169,8 | **156,4** |
| **DR (%)** |  | 13,7 |  | 15,0 |  | **6,7** |  | 1,6 |  | 8,6 |

*Notas: R2Dm representa el modelo teórico de Rykalin 2D, empleando propiedades termofísicas medias del material.*

*MEF representa el moldeo de elementos finitos.*

*DR representa la diferencia relativa entre el calor de entrada del modelo teórico de Rykalin 2D y el de elementos finitos ajustado, así como la diferencia entre los tiempos de enfriamiento de ZAT en ambos modelos.*

**3. Resultados y discusión**

3.1. Ajuste de los calores de entrada de soldaduras en acero 2205, que se corresponden con los tiempos de enfriamiento determinados según modelo teórico de Rykalin 2D, empleando la simulación por elementos finitos

Ya validado el modelo de elementos finitos en trabajo precedente [12], se procedió al ajuste mediante simulación numérica de los calores de entrada de soldaduras, que se corresponden con los tiempos de enfriamiento de interés descritos en epígrafe 2.2 y que se muestran en la Tabla 1. Para el ajuste de los calores de entrada se empleó el modelo de elementos finitos descrito en subepígrafe 2.2.

Los resultados obtenidos mediante MEF se resumen en la Tabla 1, en las columnas resaltadas. Se confirmó que debido a las simplificaciones del modelo de Rykalin 2D, empleando propiedades termofísicas medias del material entre la temperatura ambiente y de sólido, existe un error en los calores de entrada que este relaciona con los tiempos de enfriamiento de interés (t12/8 y t8/5) en la ZAT. Como se muestra en dicha Tabla, para un espesor de chapa a soldar de 10 mm, el calor de entrada de 1000 J/mm se ajustó a 920 J mm-1, el de 1500 J mm-1 se ajustó a 1350 J mm-1, el de 2000 J mm-1 se ajustó a 1800 J mm-1, el de 2500 J mm-1 se ajustó a 2300 y el de 3000 J mm-1 se ajustó a 2900 J mm-1. Para los tres mayores aportes de calor el ajuste de las curvas de enfriamiento de los ciclos térmicos de Rykalin 2D y MEF es alto, dado por diferencias relativas entre los tiempos de enfriamiento (t12/8 y t8/5) inferiores a 8,6 % en todos los casos. En los dos menores aportes de calor, el ajuste de las curvas del modelo de Rykalin con el de MEF no es tan alto, ya que las diferencias relativas entre los tiempos de enfriamiento se encuentran entre 10,3 y 15,0 %, lo que es un resultado lógico debido a que en estos casos la distribución de temperaturas a través del espesor de la placa se aleja de ser uniforme en la zona cercana a la soldadura y la transferencia de calor comienza a alejarse del modelo en dos dimensiones. Como se observa, todos los calores ajustaron a valores inferiores al del modelo de Rykalin, pero siempre con diferencias relativas entre el modelo teórico y el de MEF inferiores a 11,1 %, lo que indica que este modelo teórico brinda resultados con una precisión aceptable.

Este ajuste de la relación entre los tiempos de enfriamiento de la ZAT y los calores de entrada de la soldadura GMAW, de aceros dúplex 2205 de 10 mm de espesor, permitirá a los especialistas el establecimiento de regímenes de soldadura que garanticen aquellos tiempos que provocan la obtención de microestructuras y una resistencia a la corrosión y propiedades mecánicas favorables. Empleando este mismo procedimiento se podrían ajustar los calores de entrada que se corresponden con otros tiempos de los ciclos de enfriamiento, para la soldadura de cualquier espesor de chapa de interés, lo que ratifica al MEF como una potente y confiable herramienta para tales efectos.

La Tabla 2 muestra las diferencias relativas entre los calores de entrada ajustados mediante elementos finitos y los predichos por el modelo teórico de Rykalin 2D, empleando en dicho modelo teórico, primero las propiedades termofísicas medias del acero 2205 y luego las propiedades a temperatura ambiente, descritas en epígrafe 2.1, que se corresponden con los tiempos de enfriamiento de interés. De dicha Tabla 2 se desprende que los calores de entrada que relaciona el modelo de Rykalin empleando las propiedades medias, son más precisos, con una diferencia relativa inferior a 11,1 %, mientras que cuando se emplean las propiedades a temperatura ambiente (que constituye la tendencia de los especialistas al trabajar con la Ecuación 1) la diferencia relativa se hace muy superior, con valores entre 24,4 y 29,3 %, que resultan inaceptables por la magnitud del error que provoca. De esta manera se concluye que cuando se pretenda emplear el modelo teórico de Rykalin para calcular los tiempos de enfriamiento en la ZAT, se deben sustituir las propiedades del material medias entre la temperatura ambiente y la de sólido, con vistas a garantizar mayor precisión en los resultados.

Tabla 2. Diferencia relativa del calor de entrada ajustado por elementos finitos respecto a los calores de entrada teóricos determinados mediante modelo teórico de Rykalin 2D, empleando las propiedades físicas del material medias y a temperatura ambiente.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | **Calor de entrada** **(J mm-1)** | **DR** **(%)** |
| **MEF** | **920** |  |
| R2Dm | 1000 | 8,7 |
| R2Dta | 680 | 26,1 |
| **MEF** | **1350** |  |
| R2Dm | 1500 | 11,1 |
| R2Dta | 1020 | 24,4 |
| **MEF** | **1800** |  |
| R2Dm | 2000 | 11,1 |
| R2Dta | 1360 | 24,4 |
| **MEF** | **2300** |  |
| R2Dm | 2500 | 8,7 |
| R2Dta | 1680 | 27,0 |
| **MEF** | **2900** |  |
| R2Dm | 3000 | 3,4 |
| R2Dta | 2050 | 29,3 |

*Notas: R2Dm representa el modelo teórico de Rykalin 2D, empleando propiedades termofísicas medias del material.*

*R2Dta representa el modelo teórico de Rykalin 2D, empleando propiedades termofísicas a temperatura ambiente del material.*

*MEF representa el moldeo de elementos finitos.*

*DR representa la diferencia relativa entre el calor de entrada ajustado mediante elementos finitos respecto al calor calculado por modelo de Rykalin 2D.*

**4. Conclusiones**

Los calores de entrada, que según el modelo teórico de Rykalin 2D se corresponden con los tiempos de enfriamiento de interés, t12/8 y t8/5, y que se determinaron empleando las propiedades físicas constantes medias, entre las correspondientes a la temperatura ambiente y de sólido de la aleación para el acero 2205, son los que mejor se ajustan a los de la zona térmicamente afectada de una soldadura real. Las diferencias relativas calculadas para los aportes de calor ajustados por modelo de elementos finitos y los obtenidos mediante el modelo de Rykalin 2D fueron inferiores al 11,1 % cuando se emplearon las propiedades medias, lo que constituye un error aceptable, y llegaron hasta 29,3 % cuando se sustituyeron propiedades a temperatura ambiente, lo que resulta inaceptable. Se concluye que el modelo teórico de Rykalin 2D sigue teniendo actualidad y garantiza una adecuada precisión, cuando se sustituyen las propiedades del material medias entre la temperatura ambiente y la de sólido, con vistas a predecir las velocidades de enfriamiento en la ZAT.

Se ajustaron empleando la simulación por elementos finitos, para los tiempos de enfriamiento de interés en la ZAT, t12/8 y t8/5, considerando la soldadura de un espesor de chapa de 10 mm en acero dúplex 2205, los calores de entrada de 1000 J mm-1 a 920 J mm-1, de 1500 J mm-1 a 1350 J mm-1, de 2000 J mm-1 a 1800 J mm-1, de 2500 J mm-1 a 2300 J mm-1 y de 3000 J mm-1 a 2900 J mm-1. El ajuste de la relación calor de entrada – tiempo de enfriamiento de la ZAT, en el rango de utilidad industrial, permitirá a los especialistas el establecimiento de los parámetros del régimen de soldadura GMAW que garantizan elevadas resistencia a la corrosión y propiedades mecánicas, evitando aquellos que provocan uniones con propiedades disminuidas.

**5. Referencias bibliográficas**

1. EASTERLING, K. Introduction to the Physical Metallurgy of Welding. Second edition. Butterworth-Heinemann Ltd., Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, 1992. 270 p. ISBN 0 7506 0394 1.

2. HRIVNAK, I. Theory of weldability of metals and alloys. New York, Ister Science Press Ltd., Bratislava, Czechoslovakia, 1992. 372 p.

3. POORHAYDARY, K.; PATCHETT, B. M. Estimation of cooling rate in the welding of plates with intermediate thickness. Welding Journal, Supplement to the Welding Journal, p. 149s -155s. October, 2005.

4. DYNAMIC SYSTEMS INC, DSI. QuikSim2 User’s Guide Release 2.4.5181, Gleeble System, 2013. 140 p.

5. POZO-MOREJÓN, J.A. Metodología para el establecimiento de procedimientos de soldadura en aleaciones de aluminio al magnesio mediante la modelación por elementos finitos. Tesis doctoral. 2008. 150 p. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Santa Clara, VC, Cuba.

6. POZO-MOREJÓN, J.A. et al. Metodología de modelación mediante ANSYS de la historia térmica, tensiones y deformaciones de soldadura. Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V., Vol. 24, N° 1, p. 13–26. 2009.

7. POZO-MOREJÓN, J.A. et al. Análisis térmico de soldadura GTAW sobre placa de acero AISI 316L empleando el método de elementos finitos. Soldagem & Insp. São Paulo, Vol.16, No. 3, p. 256-264, Jul/Sept. 2011.

8. XIAOJUN, J.; LIXING, H. Finite element analysis of modeling residual stress distribution in all position duplex stainless steel welded pipe. Materials Science Technology, Vol. 20, No. 4, p. 387-390. 2004.

9. SANDVIK. Sandvik SAF 2205 Tube and pipe, seamless. Disponible en: www.smt.sandvik.com/en/materials–center/material–datasheets/tube–and–pipe–seamless/sandvik–saf–2205/?pdf=1 >. Acceso en: junio de 2015.

10. GOLDAK, J.A.; AKHLAGHI, M. Computational welding mechanics. Springer Science+Business Media, Inc., New York, USA, 2005. 321 p.

11. NGUYEN, N. et al. Analytical Approximate Solution for Double Ellipsoidal Heat Source in Finite Thick Plate. Welding Journal, Supplement to the Welding Journal, p. 82s - 93s. March 2004.

12. Pozo-Morejón, J. A; Guimaraes de Souza, L. F.; Guerra, T.; Valencia Morales, E.; De Souza Bott, I. Simulación de soldadura GMAW de acero duplex 2205 mediante elementos finitos. COMEC 2016. Cayo Santa María, Cuba.

13. SAQUIB, M.; UNTAWALE, S.P. Measuring the process efficiency of controlled welding processes. International Journal of Instrumentation, Control and Automation (IJICA) ISSN: 2231-1890, Vol-1 Iss-3,4, p. 33-39. 2012.

14. ANSYS INC. Tutorial de ANSYS MULTIPHYSICS versión 16.1, 2015.