

## Distribución de temperaturas en un hierro gris por la incidencia del ciclo térmico de soldadura\*

**Lianet Rodríguez Guilarte**

[lrguilarte@mecanica.ismm.edu.cu](mailto:lrguilarte@mecanica.ismm.edu.cu)

**Yoel Aguirre Breffe**

**Tania Meléndez Tort**

[tmelendez@ismm.edu.cu](mailto:tmelendez@ismm.edu.cu)

**Tomás Fernández Columbié**

[tfernandez@ismm.edu.cu](mailto:tfernandez@ismm.edu.cu)

**Redumil Hernández Romero**

[rhromero@ceproni.moa.minen.cu](mailto:rhromero@ceproni.moa.minen.cu)

Especialidad: Ingeniería Mecánica

Instituto Superior Minero Metalúrgico (Moa).

**Resumen:** Se estableció la influencia del ciclo térmico de soldadura del hierro fundido gris, así como el comportamiento de las isothermas durante el calentamiento y enfriamiento del material. Se consideró para el estudio una unión en bisel en simple V a 60°, en espesor de 12 mm. Los parámetros analizados fueron la intensidad de corriente, la tensión del arco, la velocidad de soldadura, así como la energía lineal del proceso y la energía entrante. Para establecer las isothermas se tomaron temperaturas de 900 °C, 800 °C, 600 °C y 200 °C a diferentes distancias del arco de soldadura. Se determina que durante el ciclo térmico, la distribución de temperatura a lo largo de la costura en la rama de calentamiento y enfriamiento, en la primera, las curvas es más abrupta, o sea, tienen mayor pendiente que en las ramas de enfriamiento.

**Palabras clave:** isothermas; ciclo térmico de soldadura; hierro gris; temperatura.

---

\* Recibido: 6 junio 2018/ Aceptado 28 noviembre 2018.

## Distribution of temperatures in a gray iron for the incidence of the thermal cycle of welding

**Abstract:** The influence of the thermal welding cycle of the gray cast iron was established, as well as the behavior of the isotherms during the heating and cooling of the material. For the study, a bevel joint was considered in simple V at 60°, in a thickness of 12 millimeters. The parameters analyzed were the current intensity, the arc voltage, the welding speed, as well as the linear energy of the process and the incoming energy. To establish the isotherms, temperatures of 900, 800, 600 and 200 °C, were taken at different distances from the welding arc. It was determined that during the thermal cycle, the distribution of temperature along the seam in the branch of heating and cooling, in the first, the curves is more abrupt, that is, have higher slope than in the branches of cooling.

**Key words:** isotherm; thermal cycle of welding; gray iron; temperature.

## Introducción

Para obtener soldaduras exitosas en los hierros fundidos se debe desarrollar un buen procedimiento, además de contar con soldadores calificados, que logren realizar esta unión, así como el empleo de electrodos de baja entrada de calor. Cuando el material se calienta, como en el caso de la realización de este proceso, la matriz se puede enriquecer localmente de carbono y debido al enfriamiento rápido, en la zona afectada térmicamente, pueden llegar a formarse fases duras y frágiles que pueden causar agrietamiento. Debido a estos factores metalúrgicos, los hierros fundidos son más difíciles de soldar que los aceros al carbono, además, la eficiencia en la recuperación de las propiedades mecánicas de las piezas, en las juntas, no alcanzan el 100 % (Pouranvari, 2010).

Por otro lado, consideran Zinn & Scholtes (2002) que, para realizar adecuadamente un proceso de soldadura, se requiere conocer las leyes de la dilatación y la contracción de las aleaciones a soldar, fenómenos propios que sufren estos al ser calentados. Durante un proceso de soldadura, el calentamiento es localizado y no hay uniformidad en la temperatura de la pieza, además, las diferentes formas y geometrías que pueden presentar las piezas hacen que sea factible la distorsión de esta, debido a que, a medida que se va solidificando el cordón de soldadura, este se contrae, generando esfuerzos en este y en la zona afectada térmicamente.

Plantean Aguilar y Boeri (2000) que en los hierros fundidos y durante el proceso de soldadura la microestructura de la matriz que rodea las partículas de grafito también afecta las propiedades mecánicas; esta matriz es básicamente la misma que presenta un acero, es decir, ferrítica, perlítica, austenítica o martensítica. El tipo de matriz obtenida en la fundición depende de la composición química, velocidad de enfriamiento y tratamiento térmico, de ahí la obtención de los diferentes tipos de fundiciones. Las fundiciones más comúnmente soldables son: fundición gris, maleable, nodulares y austenítica.

Estos esfuerzos (Marulanda, Luddey & Mesa, 2007; Guirao *et al.*, 2010) son los encargados de causar la distorsión o la rotura prematura de la pieza en el área de soldadura, pueden ser eliminados o disminuidos por tratamientos térmicos o mecánicos. Esto permite adoptar ciertas precauciones para reducir efectos perjudiciales en las piezas soldadas. Además, un buen control del ciclo térmico de la soldadura permite obtener cordones sanos, sin que se produzcan alteraciones de las propiedades de los metales después de soldados.

Según algunos investigadores (Ramos *et al.*, 2005; Fernández-Columbié *et al.*, 2014), cuando se precalienta la pieza, los cordones de soldadura son más dúctiles y menos frágiles, pero la soldadura es más difícil de realizar. Durante la ejecución de la soldadura se debe mantener la pieza a la temperatura de precalentamiento y esta temperatura depende de la configuración, forma y tamaño de la pieza. Mientras mayores sean los espesores y complejidad de las piezas a soldar, mayor cuidado debe tenerse para evitar altas velocidades de enfriamiento que pueden conllevar a agrietamiento del cordón de soldadura o del metal base.

Cuando una fundición es soldada en caliente presenta una disminución en la proporción de cementita en la zona de unión y una notable mejoría en la apariencia de la soldadura. En la soldadura en frío de las fundiciones grises con electrodos de acero, la transformación en cementita, en la zona de unión, se acentúa y la parte fundida está constituida casi totalmente por una estructura martensítica. La soldadura con electrodo de níquel o monel permite mejores resultados, obteniéndose una notable mejoría de la línea de unión, debido a la influencia grafitizante del níquel (Marulanda, Luddey & Mesa, 2007).

Todas las fundiciones de hierro se consideran soldables, pero en menor grado que los aceros al carbono y con excepción de la fundición blanca, debido a que tiene poca ductilidad y no es capaz de absorber los esfuerzos térmicos que se generan en el metal base al soldarse. Además, las fundiciones maleables de corazón negro tampoco son soldables (Ferrer *et al.*, 2007 y Meléndez-Tort, 2016).

Los hierros grises tienen soldabilidad limitada, debido a esto se debe poner mayor cuidado en el diseño del procedimiento de soldadura a utilizar (Bott *et al.*, 2005; Ju-Seok, 2008). Las reparaciones en fundición de hierro gris o maleable son trabajos que, comúnmente, se encuentran en las prácticas diarias y se consideran dentro de los más difíciles. Cuando se suelda hierro fundido hay una capa dura y frágil adyacente a la soldadura que genera grietas y deformación, por lo que es necesario un estudio tecnológico detallado de tales procesos metalúrgicos.

El trabajo tiene como objetivo establecer el ciclo térmico de soldadura del hierro fundido gris, así como el comportamiento de las isotermas durante el calentamiento y enfriamiento del material.

## Composición química de los materiales

La composición química del material se determinó mediante análisis espectral, para ello se utilizó un espectrómetro de masa cuántico, ESPECTROLAB 230, con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón. En la Tabla 1 se muestra la composición química.

Tabla 1. Composición química de la fundición gris, en %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
3,4	1,90	0,76	0,13	0,14	0,53	0,015
Ni	Al	Cu	V	Sn	Fe	
0,08	0,008	0,12	0,019	0,11	Resto	

El sistema de identificación de ASTM para los hierros fundidos grises establece que el número que lo identifica corresponda a la resistencia a la tensión mínima en MPa, de tal manera que el hierro gris ASTM No. 20 tiene una resistencia mínima a la tensión de 140 MPa.

La influencia de los elementos de aleación está relacionada fundamentalmente con el control de la transformación de la austenita. Entre los factores que influyen en que el carbono se encuentre en una u otra forma están la velocidad de enfriamiento y la presencia de elementos grafitizantes. Un enfriamiento lento y la presencia de silicio, níquel, cobre facilitan la formación de grafito, por lo que la solidificación se puede explicar mediante el empleo del diagrama estable.

## Preparación de la junta para la soldadura

La Figura 1 muestra la preparación de junta que se utilizó para el proceso de unión. Los cordones de soldadura se aplicaron de manera intercalada, los cuales presentan una longitud no superior a 40 mm; la forma de preparación de la unión es de bisel en simple "V" a 60°.

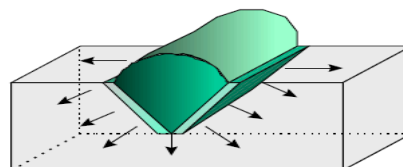


Figura 1. Preparación de la unión para un flujo de calor tridimensional.

El espesor del material y la geometría de la junta juegan un rol importante en la configuración de los ciclos térmicos de soldadura. En correspondencia con el espesor del material agrietado se consideró una placa gruesa, por lo que el flujo de calor es tridimensional. En estas condiciones, si la velocidad de enfriamiento

aumenta al incrementarse el espesor, decrece entonces el tiempo de permanencia a altas temperaturas.

### Parámetros del ciclo térmico del proceso de soldadura

El calor aportado durante el soldeo produce, en el material base, complejos ciclos térmicos no convencionales, que dan lugar a una serie de fenómenos. El conocimiento del ciclo térmico nos permite, en función de la energía aportada, determinar los cambios microestructurales así como las tensiones residuales, condiciones necesarias para poder predecir la variación de la tenacidad. En la Tabla 2 se muestran los parámetros a considerar en el ciclo térmico del hierro fundido gris.

Tabla 2. Parámetros del ciclo térmico

Parámetros	$I_s$	$U_a$	$V_s$	$Q$	$E_L$	$L_{ch}$	$q$
Resultados	-	-	-	-	-	-	-

Donde:

$I_s$  - intensidad de soldadura; A

$U_a$  - tensión del arco; V

$V_s$  - velocidad de soldadura; m/s

$Q$  - energía entrante; W

$E_L$  - energía lineal del proceso; J/m

$L_{ch}$  - longitud del charco; m

$q$  - energía de calor; J/m.

### Cálculo de las isoterms

Teniendo en cuenta que se tiene una sección transversal pequeña y sus dimensiones resultan ser mucho menor que las dimensiones del cuerpo que se calienta, se puede considerar una fuente lineal ya que el calor del proceso de soldadura se distribuye por la costura como una línea. Para un espesor de grieta de 12 mm, la temperatura va a ser homogénea y el calor se propaga a lo largo de la superficie.

**Primero:** se calcula la distribución de temperaturas a lo largo del eje de costura y a cierta distancia de ella.

**Segundo:** construir las curvas de distribución de temperatura en un gráfico donde las coordenadas sean  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) y  $X$  (m) para los puntos calculados.

En la Tabla 3 se muestran los parámetros para la distribución de las temperaturas en la unión soldada.

Tabla 3. Parámetros para la distribución de las temperaturas

Parámetros	$Q_{ef}$	$a$	$b$	$T$	$\rho$	$\theta$	$t$
Resultados	-	-	-	-	-	-	-

Donde:

$Q_{efec}$  - potencia térmica efectiva; cal/s

$a$  - conductividad de temperatura;  $\text{m}^2/\text{s}$

$b$  - pérdida de calor por las superficies laterales;  $\text{s}^{-1}$

$T$  - temperatura;  $^{\circ}\text{C}$

$\rho$  - magnitud respecto a la distancia

$\theta$  - magnitud respecto a la temperatura

$t$  - tiempo; s.

Con el objetivo de tener el gráfico de la temperatura se tomaron diez valores en la rama de enfriamiento (semieje negativo) y cinco en la rama de calentamiento (semieje positivo).

## Resultados y discusión

### Análisis del ciclo térmico

En la mayoría de procesos de soldadura por fusión, una fuente de calor concentrado de alta intensidad es aplicada entre los elementos a unir de la junta y movida a lo largo de esta. El calor generado por esa fuente se disipa, principalmente por conducción, a través de las piezas y produce la variación de la temperatura a lo largo de ellas. En la Tabla 4 se muestran los resultados del ciclo térmico de soldadura.

Tabla 4. Ciclo térmico de soldadura

Parámetros	$I_s$	$U_a$	$V_s$	$Q$	$E_L$	$L_{ch}$	$q$
Resultados	120	16	0,002	16	816 000	0,017	136 000

Según los resultados obtenidos, en el hierro fundido, la determinación de estos parámetros es importante en el proceso de soldadura porque cada uno afecta la anchura del charco de soldadura, ya que esta es proporcional a la longitud del arco.

La velocidad de calentamiento es mucho más rápida que la de enfriamiento. Las velocidades de enfriamiento en cada punto son siempre inferiores a las que experimenta el metal fundido y serán menores cuanto más alejado esté el punto del baño fundido (la velocidad de enfriamiento se puede determinar por la pendiente de las curvas de enfriamiento a cualquier temperatura). Se resalta el hecho de que el modo de solidificación depende de la composición para velocidades de enfriamiento.

### Análisis de las isotermas

El objetivo del análisis de las isotermas en los procesos de soldadura es obtener un modelo analítico simplificado pero que considere las distintas microestructuras que se generan en la zona afectada por calor en función de isotermas características. En la Tabla 5 se muestran los resultados para el establecimiento de la distribución de las temperaturas en el hierro gris.

Tabla 5. Resultados para la distribución de las temperaturas

Parámetros	$Q_{ef}$	$a$	$b$	$T$	$\rho$	$\theta$	$t$
Resultados	1 639,88	12 x 10 <sup>-5</sup>	9,53 x 10 <sup>-4</sup>	32-630	0-0,2	0-630	245

En la distribución de las temperaturas en la junta soldada, la potencia térmica efectiva que se introduce por la fuente genera el calentamiento en la región más cercana al cordón de soldadura, la cual se distribuye por el material según sea la conductividad térmica del mismo, donde no todo este calor se aprovecha en la formación de la costura debido a la pérdida de calor por las superficies laterales. La velocidad de enfriamiento aumenta al incrementarse el espesor, decreciendo con esto el tiempo de permanencia a altas temperaturas. La velocidad de soldadura modifica la forma de la piletta, lo cual influye sobre la solidificación y propiedades de la soldadura.

Cuando se deposita una pasada de soldadura sobre la superficie de una placa, el flujo de calor afecta a cada punto produciendo tensiones en función de la distancia a la fuente de calor. Las temperaturas de transformación que son importantes son: Ac1, Ac3 (temperatura crítica inferior y crítica superior, respectivamente), según el diagrama Fe-C y la isoterma que se genera sobre la interfase de fusión. La región entre Ac3 y la isoterma en la línea de fusión es completamente reaustenizada cuando la piletta es depositada, mientras que entre las isotermas Ac3 y Ac1 ocurren solo transformaciones parciales de la austenita durante el calentamiento. Todas las regiones calentadas a temperaturas menores que Ac1 son revenidas.



Tanto las curvas de distribución de temperatura como las isoterms dependen del ciclo térmico de soldadura. En la Figura 2 se muestra el resultado de las isoterms para diferentes magnitudes inmensurables.

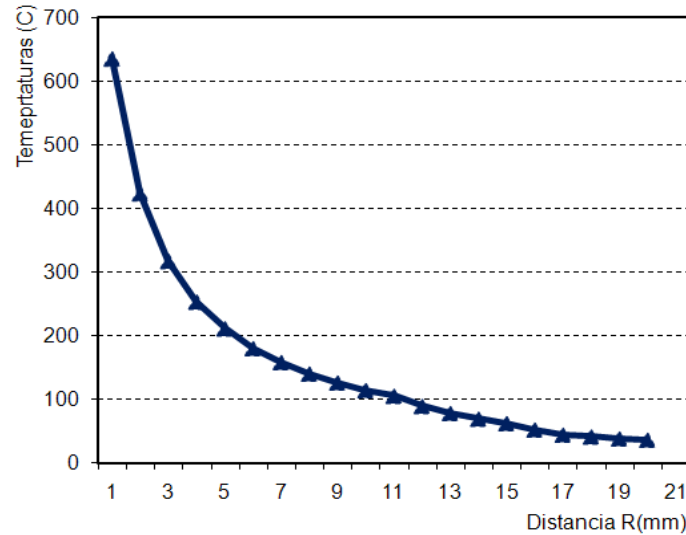


Figura 2. Comportamiento de la temperatura vs distancia.

En correspondencia con el comportamiento de la curva, se observa que las temperaturas máximas alcanzadas decrecen rápidamente cuando la distancia al punto considerado al centro del cordón aumenta; los tiempos requeridos para llegar a la temperatura máxima son cada vez mayores, a medida que el punto estudiado se aleja del centro del cordón y que las velocidades de calentamiento y enfriamiento disminuyen al aumentar su distancia al eje de la soldadura.

Sin embargo, se puede lograr una buena precisión de la temperatura a cierta distancia de la soldadura, especialmente si se realizan varias pasadas. El problema de coincidencia de las temperaturas medidas es mayor cuanto más cerca del arco se realiza la medición, criterio que ha sido planteado por Pakandam, Varvani & Arahani (2011).

La distribución de temperatura a lo largo de la costura de enfriamiento se muestra en la Figura 3. Para ello se tuvieron en cuenta diferentes valores de distancia en el cordón de soldadura, así como diferentes temperaturas. Los resultados obtenidos se corresponden a distintos valores en el eje X, que es la rama delantera.

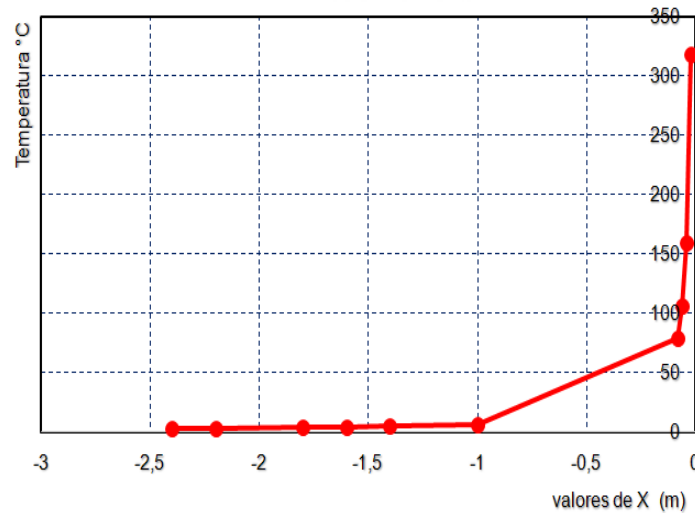


Figura 3. Distribución de temperatura a lo largo de la costura de enfriamiento.

En la rama de calentamiento las curvas son más abruptas, o sea, tienen mayor pendiente que en las ramas de enfriamiento. A medida que se acerca al lugar de incidencia de la fuente de calor la temperatura del cuerpo crece rápidamente y para  $R=0$  la temperatura tiende a infinito. Además, se puede apreciar que las máximas no se alcanzan al pasar por el punto donde se encuentra, actuando la fuente a cierta distancia del eje de la costura, sino un poco más allá. La velocidad de enfriamiento generalmente se determina para el eje de la costura en consideración a su poca diferencia respecto a la velocidad de enfriamiento de la zona aledaña, según refiere Barsoum & Lundbäck (2009).

En la Figura 4 se muestra la distribución de temperatura a lo largo de la costura en la rama de calentamiento, en la cual se consideró el comportamiento para diferentes valores en el eje X.

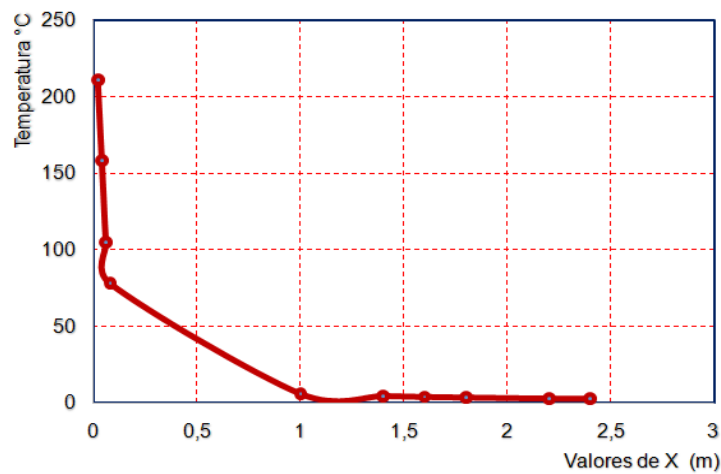


Figura 4. Distribución de temperatura a lo largo de la costura de calentamiento.

En la rama de calentamiento, la curva tiene menor pendiente que la rama de enfriamiento, por lo que la distribución de las temperaturas por la superficie o volumen del cuerpo caracteriza los llamados campos de temperaturas, los que representan al conjunto de todos los puntos de temperatura en un momento dado. El aporte de calor se define por separado en dos regiones. Una región se encuentra en frente del centro del arco,  $z > 0$  (Figura 3). La otra región es definida detrás del centro del arco (Figura 4). El modelo se especifica para un inicio de arco en  $t = 0$  y el movimiento a lo largo del eje  $z$  positivo, asociado con las regiones sobre las que el aporte de calor ocurre, para  $Q$ , como la tasa de aporte de energía [W],  $V_s$  es la velocidad de soldadura y  $X$  distribuye el calor a las regiones por delante y por detrás del centro del arco.

### Análisis de las magnitudes inmensurables

Al igual que en el modelo térmico, se divide el proceso en dos etapas: una primera, donde se considera la magnitud con respecto a la distancia, y la otra, con respecto a la temperatura, que permite determinar un incremento para cada paso de la solución a fin de mejorar las probabilidades de convergencia. La Figura 5 muestra la magnitud respecto a la distancia.

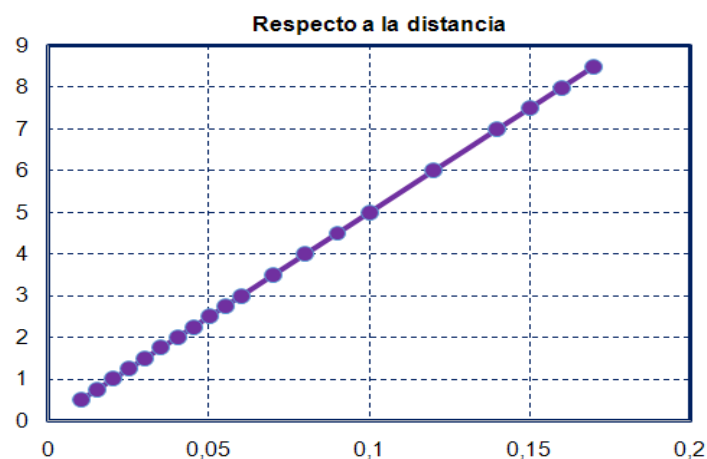


Figura 5. Isotherma con respecto a la distancia.

La isoterma, en relación a la distancia, presenta una tendencia lineal. Se considera una fuente lineal debido a que tiene una sección transversal pequeña y sus dimensiones resultan ser mucho menor que las dimensiones del cuerpo que se calienta, por lo tanto se puede considerar que el calor de la fuente se distribuye por una línea.

En las uniones soldadas la estructura de recristalización frecuentemente aparecen en la zona donde se ha calentado hasta una temperatura superior desde 500 °C

hasta 525 °C. Es característica en esta zona la disminución de la dureza en comparación con el estado inicial. Esta propiedad en el metal se incrementa durante la soldadura; en esta zona aumenta la resistencia del metal, disminuye la plasticidad y la resiliencia en el hierro fundido. La Figura 6 indica la isoterma con respecto a la temperatura.

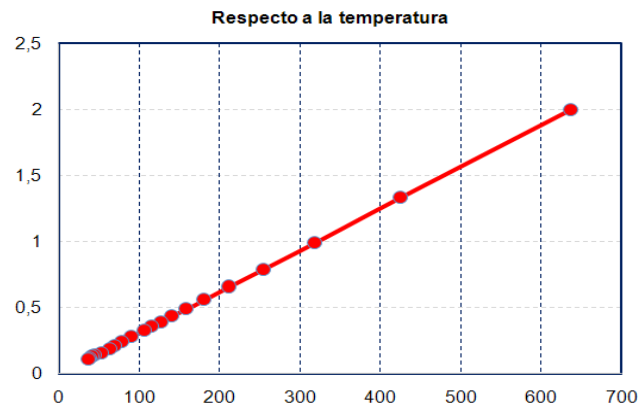


Figura 6. Isotherma con respecto a la temperatura.

Según los resultados existe una tendencia lineal durante el proceso, pero se obtienen isoterma para diferentes temperaturas y en la medida en que se aleja de la fuente de calor la tendencia es obtener puntos más alejados de la misma. Las isoterma dependen del tiempo y de la variación de las propiedades del material con respecto a la temperatura. El carácter transiente requiere tener en cuenta curvas de tiempo que puedan caracterizar la traslación del foco de calor, a partir de los parámetros del régimen y tipo de proceso de soldadura empleado. Las dependencias obtenidas de temperaturas se relacionan con las propiedades del material caracterizando la no linealidad del proceso, teniendo en cuenta el análisis de la termodependencia de las propiedades del hierro fundido.

En la Figura 7 se muestra el comportamiento de las isoterma con relación a la variación de la temperatura en un determinado tiempo.

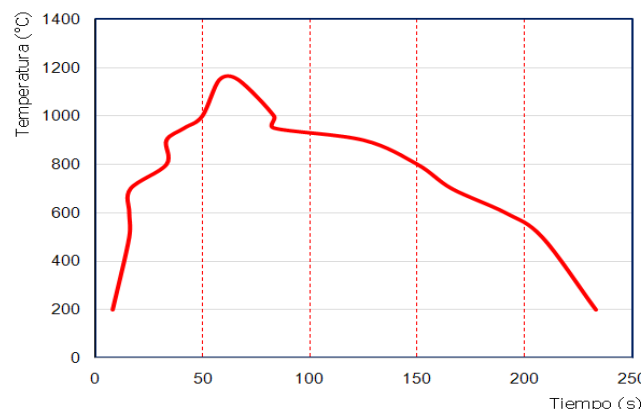


Figura 7. Variación de la temperatura en el tiempo.

Al establecer el comportamiento de la variación de la temperatura en el tiempo se puede observar que existen fluctuaciones en las variaciones térmicas y su distribución por el material base (hierro fundido). Estas variaciones se producen porque la velocidad del arco, a lo largo de la pieza de trabajo, es mucho mayor que la velocidad de difusividad térmica. En otras palabras, el flujo de calor en la dirección del trabajo es pequeño comparado con el de la dirección perpendicular de avance. Esto implica que una lámina del metal base experimenta un ciclo térmico más corto con un intenso pulso de calor de potencia lineal.

Con respecto a las mediciones experimentales del ciclo térmico de la soldadura se ha investigado que, para un determinado proceso, dada la geometría de la junta y el material, el tiempo de enfriamiento entre 800 °C y 500 °C en la zona afectada por calor es constante para temperaturas máximas superiores a 900 °C.

Las isotermas determinadas en la soldadura del hierro fundido gris, para diferentes temperaturas, se muestran en la Figura 8; se consideraron diferentes distancias desde la fuente móvil.

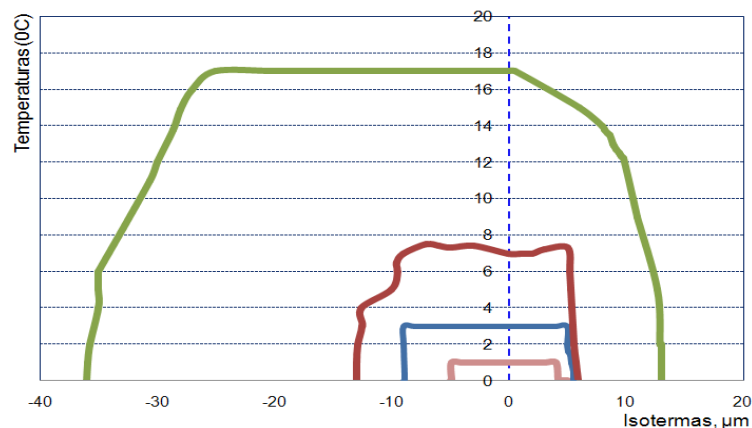


Figura 8. Variación de las isotermas en el hierro fundido gris.

Las isotermas determinadas en el hierro fundido gris se corresponden a las temperaturas de 900 °C, 800 °C, 600 °C y 200 °C. En estas se ha caracterizado la fusión del hierro gris a partir de las dimensiones obtenidas en las diferentes zonas.

Para diferentes distancias, las isotermas consideradas en el hierro gris y el estudio de las modificaciones estructurales que pueden ocurrir en la zona de influencia térmica, es necesario valorar la temperatura que se alcanza en cada punto y su posterior enfriamiento. La aparición de estructuras en la zona cercana a los núcleos de grafito que provocan alta fragilidad a la unión puede ocurrir en determinado rango de temperatura, según se comporta la difusión del carbono en la interfase a lo largo de la línea de soldadura. Velocidades de enfriamiento propios del proceso

de soldadura, sin medidas complementarias, pueden conducir al surgimiento de grietas como consecuencia de la formación de estructuras de temple.

### Conclusiones

La determinación de los parámetros del ciclo térmico de soldadura permiten predecir el comportamiento de las isothermas durante la soldadura del hierro fundido gris para diferentes distancias de la fuente de calor, donde el tiempo de enfriamiento entre 800 °C y 500 °C en la zona afectada por calor es constante para temperaturas máximas superiores a 900 °C.

Teniendo en cuenta la velocidad del arco de soldadura, así como las temperaturas de las isothermas de 900 °C, 800 °C, 600 °C y 200 °C, se establecen las curvas de temperatura para el hierro fundido gris.

Durante la aplicación del ciclo térmico de soldadura del hierro fundido gris las isothermas, en relación con la variación de la temperatura, varían en un tiempo de hasta 230 s debido a que la velocidad del arco, a lo largo de la pieza de trabajo, es mucho mayor que la difusividad térmica.

### Referencias bibliográficas

- AGUILAR, W. & BOERI, R. 2000. Comportamiento a la segregación de los elementos de aleación usados en fundiciones esferoidales de fabricación. Jornadas SAM – IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga. Agosto, Neuquén, Argentina, p. 123-130.
- BARSOUM, Z. & LUNDBÄCK, A. 2009. Simplified FE welding simulation of fillet welds-3D effects on the formation residual stresses. *Engineering Failure Analysis* 16(16): 22-31.
- BOTT, I.; SOUZA, L.; TEIXEIRA, J. & RIOS, P. 2005. High-strength steel development for pipelines: a Brazilian perspective. *Metallurgical and Materials Transaction* 36(2): 443-454.
- FERNÁNDEZ-COLUMBIÉ, T.; RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, I.; CORREA-SUÁREZ, R. & ALCÁNTARA-BORGES, D. 2014. Junta de soldadura disímil de la aleación HK-40 y del hierro fundido 24. *Ingeniería Mecánica* 17(2): 98-107.

- FERRER, C.; SALAS, F.; MAITA, P.; OROZCO, J. & PASCUAL, M. 2007. Resistencia a la fractura de la soldadura de fundición dúctil realizada con varillas de fundición laminar y con electrodos de Fe-Cr-Ni y de Ni, con y sin precalentamiento. *Anales de la Mecánica de Fractura* 2(1): 533-536.
- GUIRAO, J.; RODRÍGUEZ, E.; BAYÓN, A.; BOUYER, F.; PISTONO, J. & JONES, L. 2010. Determination through the distortions analysis of the best welding sequence in longitudinal welds VATS electron beam welding FE simulation. *Fusion Engineering and Design* 85(78): 766-779.
- JU-SEOK, K. 2008. Characterization of bainitic microstructures in low carbon HSLA steels. *International Journal of Modern Physics B* 22(31): 5965-5970.
- MARULANDA, A.; LUDDEY, J. & MESA, D. 2007. Recuperación y soldabilidad de fundición de hierro. *Scientia Et Technica* 13(37): 237-242.
- MELÉNDEZ-TORT, T. 2016. *Aplicación del ciclo térmico de soldadura en pieza agrietada de hierro fundido*. Tesis de grado. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
- PAKANDAM, F.; VARVANI, F. & ARAHANI, A. 2011. Fatigue damage assessment of various welded joints under uniaxial loading based on energy methods. *International Journal of Fatigue* 33(4): 519-28.
- POURANVARI, M. 2010. On the weldability of grey cast iron using nickel based filler metal. *Materials & Design* 31(7): 3253-3258.
- RAMOS, F.; POZO, J.; DÍAZ, E. & VELÁSQUEZ, E. 2005. Reparación por soldadura de tapas, agrietadas, de hierro fundido. *Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia* 34: 35-41.
- ZINN, W. & SCHOLTES, B. 2002. *Handbook of residual stresses and deformation of steel*. G. Totten, M. Howes and T. Inoue (Ed). ASM International, U.S.A., p. 391-396.