

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FIMI
Facultad de
Ingeniería Mecánica
e Industrial

**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE
SOLDADURA**

TRABAJO DE DIPLOMA

**Influencia de las frecuencias de oscilación eléctrica y térmica del arco sobre los
ciclos térmicos de uniones soldadas con transferencia metálica fría**

Autor: Ramel Maceira Escalante

Tutores: Dr. C. Carlos René Gómez Pérez

MSc. Eriel Pérez Zapico

Santa Clara, Mes: junio y Año: 2018
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.

Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería Mecánica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Tutor

Firma del Jefe de Departamento
donde se defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

Resumen

El objetivo del presente trabajo es programar el efecto conjunto de las oscilaciones de la frecuencia eléctrica y de solidificación del ciclo de formación del cordón, durante el proceso de soldadura metálica fría. Para su corroboración se realiza un estudio sobre el desarrollo matemático y las modificaciones introducidas a los modelos de fuente de calor de Goldak y Azar empleados en la modelación de los ciclos térmicos de procesos de soldadura. Con el empleo del software *COMSOL Multiphysic* fueron programadas dichas frecuencias mostrando su efecto combinado sobre los ciclos térmicos del proceso de soldadura metálica fría. Como resultado se obtiene un modelo predictivo y cíclico de la energía aportada que puede describir el comportamiento de la temperatura máxima del baño fundido y de los ciclos térmicos de las uniones soldadas, obtenidas con el proceso de soldadura con transferencia metálica fría. El modelo matemático considera los valores máximos y mínimos de las oscilaciones de energía (corriente, y voltaje), así como de la variación de las dimensiones del cordón producto del ciclo de aporte metálico.

Palabras claves: COMSOL, simulación soldadura, ciclos térmicos, modelo matemático

Abstract

The objective of the present work is to program the joint effect of the oscillations of the electric frequency and weld crystallization cycle during the cold metal welding process. For its corroboration, a study is made on the mathematical development and the modifications introduced to the models of source of heat of Goldak and Azar used in the modeling of the thermal cycles of welding processes. With the use of the *COMSOL Multiphysic* software, these frequencies were programmed showing their combined effect on the thermal cycles of the cold metal welding process. As a result, a predictive and cyclic model of the energy supplied is obtained that can describe the behavior of the maximum temperature of the molten bath and the welded joints thermal cycles, obtained with the cold metal transfer welding process. The mathematical model considers the maximum and minimum values of the oscillations of energy (current, and voltage), as well as the variation of the dimensions of the cord product of the metallic contribution cycle.

Keys words: COMSOL, welding simulation, thermal cycles, mathematical model

Índice

| | |
|--|-----------|
| Introducción | 1 |
| Capítulo 1: Generalidades sobre el proceso CMT y los modelos de fuente de calor | 4 |
| 1.1. Particularidades del proceso de soldadura con transferencia metálica fría | 4 |
| 1.2. Modelo de Goldak..... | 5 |
| 1.3. Modelo de Azar | 7 |
| 1.4. Parámetros que caracterizan el comportamiento de una onda cíclica | 9 |
| 1.4.1. Ciclo del proceso CMT..... | 9 |
| 1.4.2. Frecuencia (f) de la onda del proceso CMT..... | 10 |
| 1.4.3. Período (T) de la onda del proceso CMT..... | 10 |
| 1.4.4. Velocidad angular (ω) de la onda del proceso CMT | 10 |
| 1.5. Conclusiones Parciales..... | 11 |
| Capítulo 2: Variación de la energía aportada en el proceso CMT | 12 |
| 2.1. Geometría de la onda energética..... | 12 |
| 2.2. Modelo para la descripción de las variaciones de los parámetros energéticos y geométricos del proceso CMT..... | 17 |
| 2.3. Frecuencias de los procesos eléctricos y térmicos en el proceso CMT..... | 18 |
| 2.4. Modelo de fuente descriptivo de la forma del baño de soldadura producido durante la aplicación del proceso CMT..... | 21 |
| 2.5. Programación en COMSOL..... | 24 |
| 2.5.1. Definición de los parámetros | 24 |
| 2.5.2. Definición de la geometría | 26 |
| 2.5.3. Mallado..... | 27 |
| 2.6. Conclusiones parciales | 28 |
| Capítulo 3: Simulación en el software COMSOL Multiphysic | 29 |
| 3.1. Validación del modelo | 29 |
| 3.2. Influencias de las frecuencias | 31 |
| 3.1. Plan experimental | 35 |
| 3.2. Resultados de la simulación en COMSOL Multiphysic | 36 |
| 3.3. Análisis de los resultados..... | 38 |
| 3.4. Conclusiones parciales | 41 |
| Conclusiones | 42 |
| Recomendaciones | 42 |
| Referencias | 43 |
| Anexos Estadística | 45 |

Índice de Tablas

| | |
|---|-----------|
| <i>Tabla 1: Propiedades termodependientes del aluminio 5754 [2].....</i> | <i>24</i> |
| <i>Tabla 2: Coordenadas de los puntos de prueba</i> | <i>27</i> |
| <i>Tabla 3: Valores máximos de temperatura y tiempo en que se producen. Ciclos térmicos</i> | <i>30</i> |
| <i>Tabla 4: Resumen Estadístico</i> | <i>32</i> |
| <i>Tabla 5: Tipificación de valores y de sus respectivos niveles en el diseño factorial 2³</i> | <i>35</i> |
| <i>Tabla 6: Temperaturas máximas y tiempos de ocurrencia para puntos de prueba. Resultados</i> | <i>38</i> |
| <i>Tabla 7: Ecuaciones de regresión. Comportamiento de las temperaturas máximas.....</i> | <i>40</i> |
| <i>Tabla 8: Ecuaciones de regresión. Comportamiento de los tiempos para las temperaturas máximas..</i> | <i>40</i> |

Índice de Figuras

| | |
|--|-----------|
| <i>Figura 1: Esquema del comportamiento de la corriente y el voltaje del proceso CMT [2].....</i> | <i>5</i> |
| <i>Figura 2: Modelo de Goldak sobre fuente de calor [5].....</i> | <i>5</i> |
| <i>Figura 3: Representación de ondas, a) Sinusoidales de corriente (i) y tensión (u);</i> | <i>9</i> |
| <i>Figura 4: Representación de la onda de alimentación del electrodo. Proceso CMT (60 Hz).....</i> | <i>10</i> |
| <i>Figura 5: Valor efectivo o eficaz de la supuesta función periódica de energía (Q).....</i> | <i>13</i> |
| <i>Figura 6: Efecto de la inclusión del mínimo y la amplitud en la función sinusoidal</i> | <i>14</i> |
| <i>Figura 7: Efecto de la rectificación (obtención de valores modulares) de la función</i> | <i>15</i> |
| <i>Figura 8: Efecto del empleo de la función con módulo en su parte sinusoidal.....</i> | <i>16</i> |
| <i>Figura 9: Modelo propuesto para evaluar la fluctuación energética en el proceso CMT.....</i> | <i>17</i> |
| <i>Figura 10: Modelo para la variación del semiancho del cordón (a), utilizado una frecuencia de solidificación (conchas) (fs =30 Hz).....</i> | <i>20</i> |
| <i>Figura 11: Definición de los parámetros.....</i> | <i>25</i> |
| <i>Figura 12: Parámetros geométricos</i> | <i>26</i> |
| <i>Figura 13: Representación geométrica de la pieza</i> | <i>26</i> |
| <i>Figura 14: Puntos de prueba</i> | <i>27</i> |
| <i>Figura 15: Mallado del modelo</i> | <i>27</i> |
| <i>Figura 16: Modelo de la literatura [12] para la validación</i> | <i>29</i> |
| <i>Figura 17: Curvas de ciclos térmicos obtenidos con el modelo predictivo oscilatorio</i> | <i>30</i> |
| <i>Figura 18 : Curvas de ciclos térmicos obtenidos con el modelo predictivo oscilatorio</i> | <i>32</i> |
| <i>Figura 19: Diagrama de estado Aluminio - Magnesio</i> | <i>33</i> |
| <i>Figura 20: Diagrama de fase de la aleación 2519-T87.....</i> | <i>34</i> |
| <i>Figura 21: Curvas de ciclos térmicos obtenidos con el modelo predictivo oscilatorio</i> | <i>37</i> |

Introducción

La frecuencia no es más que la magnitud que mide el número de repeticiones por unidad de tiempo de cualquier fenómeno o suceso periódico. Su medida en el arco eléctrico está dado por la velocidad de la alternancia de los valores máximos y mínimos de voltaje [1].

La deposición de gotas metálicas aplicando en el proceso soldadura CMT [2] ocurre entre frecuencias eléctricas, que oscilan de 50 a 120 Hz, que corresponden a los ciclos eléctricos (de aplicación de corriente y voltaje). La deposición metálica se ha descrito que ocurre por tensión superficial, a la frecuencia comúnmente empleada de 60 Hz [2], lo que conduce a cordones con un coeficiente de forma constante, incluso apreciable a simple vista sin oscilaciones superficiales en ancho y alto; igualmente ocurre en su profundidad. Esta misma característica se aprecia en cordones realizados con soldadura con arco sumergido (*SAW-Submerged Arc Welding*, de sus siglas en inglés) [2].

El tiempo de solidificación de los metales, pudiera reconocerse como el intervalo durante el cual ocurre la transformación de fase, desde el estado líquido, al sólido [2]. En los procesos metalúrgicos de fundición, por ejemplo, ocurre una sola vez durante el enfriamiento del metal dentro de los moldes [2]. En los procesos de soldadura, el tiempo de solidificación ocurre repetidas veces; tantas, como fragmentos del cordón de soldadura se solidifican consecutivamente, toda vez que la porción del metal se encuentre en las condiciones termodinámicas adecuadas, lo que da lugar a conchas [3]. Luego, es posible hablar de una frecuencia del ciclo de solidificación del cordón, dada por el inverso del período de solidificación de cada fracción de metal del cordón, que se produce consecutivamente, a través de lo largo de la unión. Este fenómeno es común para todos los procesos de soldadura por arco, con o sin aporte metálico [2], por lo que también se presenta durante el uso del proceso CMT. El desarrollo de un proceso de solidificación está asociado a un consumo de energía [3]. Esta energía consumida en la solidificación es obtenida de la aportada para fundir nuevas porciones de metal, tanto del electrodo, como de la pieza. Este aporte (arco) y consumo (solidificación) de energía crean un balance propio de cada proceso, caracterizado por los momentos (frecuencias) de ocurrencia de cada uno.

La frecuencia de oscilación eléctrica producida por la fuente de corriente, durante la aplicación del proceso de soldadura metálica fría, generalmente no coincide con la frecuencia del ciclo de solidificación del cordón [3], dada por las condiciones de enfriamiento a que está sometida la pieza y la cantidad de energía introducida.

Se reconoce en la literatura [2] que la energía total aplicada, entre otros aspectos, constituye la base sobre la cual pueden modificarse los ciclos térmicos en uniones soldadas.

Igualmente, puede estimarse que el calor transferido a la unión soldada produce variaciones cíclicas en las temperaturas de la zona fundida y en las posiciones del límite de fusión. La variación de la posición del límite de fusión puede producir fluctuaciones en las dimensiones de la zona fundida; es decir, en las dimensiones geométricas de la zona fundida (ancho y profundidad de penetración, fundamentalmente). Este aspecto es tratado por Azar [4] al proponer un modelo que pretende explicar el comportamiento del modelo de fuente de calor doble elipsoidal de Goldak [5] para la simulación del calor introducido en soldadura, pero aplicado al proceso CMT. La propuesta de Azar [4] se sustenta en la introducción de una integral de línea definida, en el modelo de fuente de calor doble elipsoidal de Goldak [5], dentro de la que se incorporan ecuaciones sinusoidales modulares, que tratan de simular la variación de los parámetros geométricos de del baño de soldadura.

En la literatura consultada [4, 6] no se ha apreciado el tratamiento del efecto combinado de las frecuencias, eléctrica y del ciclo de solidificación del cordón, producido durante la aplicación del proceso de soldadura metálica fría, sobre la posible variación de los ciclos térmicos de las uniones.

Atendiendo a lo anteriormente expuesto, se plantea el siguiente:

Problema científico

El efecto conjunto de las oscilaciones de la frecuencia eléctrica y de solidificación del ciclo de formación del cordón no se ha considerado en la simulación de los ciclos térmicos originados por el proceso CMT, mediante la programación en COMSOL.

La solución del problema anteriormente expuesto permite presentar la siguiente:

Novedad

Simulación en COMSOL de un modelo de fuente de calor que considera la influencia de las frecuencias eléctrica y de solidificación del ciclo de formación del cordón, originados por el proceso de soldadura metálica fría, sobre los ciclos térmicos.

Hipótesis

La simulación conjunta de la influencia de las frecuencias de oscilación eléctrica y térmica presentes en el ciclo de formación del cordón durante la aplicación del proceso de soldadura metálica fría, permitiría evaluar su efecto sobre los ciclos térmicos originados empleando la simulación en el software *COMSOL Multiphysic*.

Objetivo general

Simular las frecuencias de oscilación eléctrica y térmica del arco sobre la poza producida durante la aplicación del proceso de soldadura metálica fría, tal que permita evaluar su influencia sobre los ciclos térmicos de uniones soldadas, a través de la programación en el software *COMSOL Multiphysic*.

Objetivos específicos

1. Realizar un estudio documental sobre el desarrollo matemático y modificaciones realizadas a los modelos de fuente de calor empleadas en la modelación de los ciclos térmicos de procesos de soldadura, específicamente el de transferencia metálica fría.
2. Programar las frecuencias de oscilación eléctrica y térmica de la fuente de calor del proceso CMT en el software *COMSOL Multiphysic*, tal que permita estudiar su efecto sobre los cambios en la geometría de la poza y sobre los ciclos térmicos.
3. Simular la influencia de las frecuencias de oscilación eléctrica y térmica del arco sobre la poza y los ciclos térmicos producidos durante la aplicación del proceso de soldadura metálica fría, mediante el software *COMSOL Multiphysic*.
4. Evaluar la influencia las frecuencias de oscilación eléctrica y térmica del arco sobre la geometría del baño de soldadura y los ciclos térmicos de uniones soldadas con el proceso CMT.

Tareas

1. Estudio documental sobre los modelos de fuente de calor empleados en la modelación de los ciclos térmicos durante la aplicación de la soldadura con transferencia metálica fría.
2. Programación las oscilaciones eléctricas y térmicas de la fuente de calor del proceso CMT en el software *COMSOL Multiphysic*.
3. Simulación de la influencia de las oscilaciones eléctrica y térmica del arco sobre la poza y los ciclos térmicos producidos durante la aplicación del proceso de soldadura metálica fría.
4. Evaluación de la influencia de las frecuencias de oscilación eléctrica y térmica del arco sobre la geometría del baño de soldadura y los ciclos térmicos de uniones soldadas obtenidas con el proceso de soldadura CMT.

Aporte

Simulación de la influencia de las frecuencias de oscilación eléctrica y térmica del arco sobre el baño de soldadura y los ciclos térmicos durante la aplicación del proceso de soldadura CMT.

Capítulo 1: Generalidades sobre el proceso CMT y los modelos de fuente de calor

1.1. Particularidades del proceso de soldadura con transferencia metálica fría

El proceso CMT lo distinguen dos características fundamentales: a) *El movimiento alternativo del alambre se incluye directamente en el control del proceso de soldadura*; b) *La transferencia de metal se produce casi sin circulación de corriente* [2].

- a) *El movimiento alternativo del alambre se incluye directamente en el control del proceso de soldadura.* En la soldadura CMT el alambre se mueve hacia la pieza de trabajo, hasta que se produce un cortocircuito. En ese momento la velocidad del alambre se invierte y es jalado hacia atrás abriéndose de nuevo el cortocircuito. Por lo tanto, el movimiento del alambre determina lo que está sucediendo en el baño de fusión de la soldadura, a partir de una frecuencia de oscilación promedio del alambre. Cuando el cortocircuito se produce un poco antes, el movimiento del alambre se inicia un poco antes; cuando el cortocircuito se produce un poco más tarde, el movimiento del alambre se inicia un poco más tarde. Por lo tanto, la frecuencia de oscilación recíproca del alambre varía con el tiempo, siendo en promedio hasta los 70 Hz, aunque se han encontrado aplicaciones hasta los 120 Hz.
- b) *La transferencia de metal se produce casi sin circulación de corriente.* El cortocircuito en el proceso CMT no es responsable de la apertura del arco. En este proceso el alambre es retraído y este movimiento apoya la transferencia de metal debido a la tensión superficial del material fundido. Por lo tanto, la corriente del cortocircuito puede mantenerse relativamente muy baja y la entrada de calor también serlo en correspondencia, lo que produce una soldadura prácticamente sin salpicaduras.

El proceso de soldadura CMT se realiza describiendo un ciclo (figura 1a) de períodos de alimentación y retracción del material de aporte (figura 1b) combinado con los períodos máximos y mínimos de los parámetros eléctricos de corriente (figura 1c) y tensión (figura 1d).

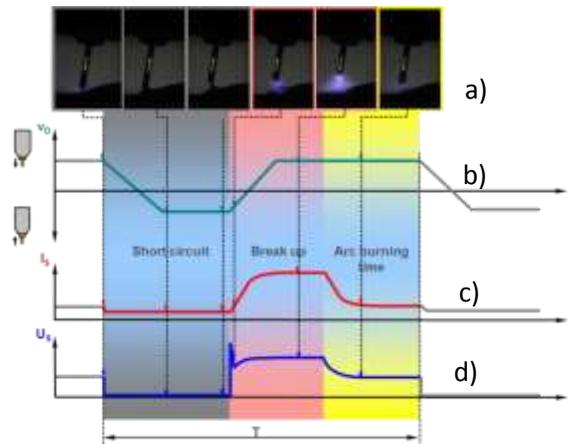


Figura 1: Esquema del comportamiento de la corriente y el voltaje del proceso CMT [2]

a) Ciclo del proceso CMT; b) Curva de velocidad de alimentación del material de aporte; c) Onda de corriente del proceso; d) Onda de tensión del proceso

Durante cada período se deposita una gota, prácticamente sin corriente eléctrica, explosiones, ni salpicaduras.

1.2. Modelo de Goldak

Goldak [5] establece un modelo (figura 2) basado en la distribución del calor no simétrica en el arco de soldadura, a razón del planteamiento de una doble elipsoide, característica de la poza de soldadura formada por un arco en movimiento.

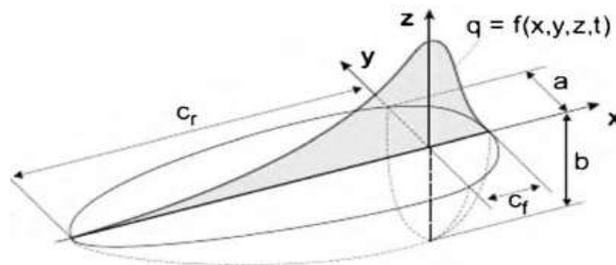


Figura 2: Modelo de Goldak sobre fuente de calor [5]

A partir de esta configuración geométrica, Goldak [5] define la densidad de energía establecida sobre la pieza (ecuación 1), descrita por la forma del gradiente térmico sobre la pieza (ecuación 2) y la distribución doble elíptica de la energía introducida a esta, dada por la ecuación cartesiana de una elipse tridimensional centrada fuera del origen (ecuación 3).

$$f_{1(x,y,z,t)} = \frac{6 \cdot \sqrt{3} \cdot f_0 \cdot Q}{a \cdot b \cdot c_0 \cdot \pi \cdot \sqrt{\pi}} \cdot e^{-3 \left[\frac{(x-x_{00})^2}{c_0^2} + \frac{(y-y_{00})^2}{a^2} + \frac{(z-z_{00})^2}{b^2} \right]} \quad 1$$

$$q_0 = \frac{6 \cdot \sqrt{3} \cdot f_0 \cdot Q}{a \cdot b \cdot c_0 \cdot \pi \cdot \sqrt{\pi}} \quad 2$$

$$e^{-3 \left[\frac{(x-x_{00})^2}{c_0^2} + \frac{(y-y_{00})^2}{a^2} + \frac{(z-z_{00})^2}{b^2} \right]} \quad 3$$

Donde:

Q; energía transferida por el proceso de soldadura ($Q = I_s \cdot V_s \cdot \eta$)

I_s ; corriente de soldadura aplicada al proceso

V_s ; tensión de soldadura aplicada al proceso

η ; eficiencia del proceso de soldadura

a, b; parámetros geométricos definidos (figura 2)

x_{00} ; y_{00} ; z_{00} : definen el centro de la fuente

x_{00} : Punto instantáneo de la fuente, sobre el eje x ($x_{00} = x_0 + v \cdot t$)

v: es la velocidad de soldadura

t: tiempo durante el cual se aplica la energía

c_0 , longitud del baño de soldadura respecto a la parte delantera (c_f) o trasera (c_r) de la fuente

(f_0) coeficiente de continuidad:

f_1 se define para los puntos de $x \geq x_{00}$

f_2 se define para los puntos de $x < x_{00}$

f_f y f_r son los coeficientes que garantizan la condición de continuidad ($f_f + f_r = 2$);

ó bien como (ecuación 4):

$$f_f = 2 \frac{c_f}{c_f + c_r} = 2 - f_r \quad 4$$

También ha de considerarse que la longitud del baño de soldadura (L) es $L = c_f + c_r$

Debe cumplirse, además, que la excentricidad de las semi-elipses delanteras y traseras sean iguales

$\left(\frac{f_f}{c_f} = \frac{f_r}{c_r} \right)$, de lo que se obtiene (ecuación 5):

$$q_0 = \frac{6 \cdot \sqrt{3} \cdot f_f \cdot Q}{a \cdot b \cdot c_f \cdot \pi \cdot \sqrt{\pi}} = \frac{6 \cdot \sqrt{3} \cdot f_r \cdot Q}{a \cdot b \cdot c_r \cdot \pi \cdot \sqrt{\pi}} \quad 5$$

Es decir, las densidades de energía aportada en las dos ramas son correspondiente

$$(f_f(x_{00}; y; z; t) = f_r(x_{00}; y; z; t)), \text{ a pesar de tener un \u00e1rea diferente } (c_f \neq c_r)$$

Por tanto, para la determinaci\u00f3n de q_0 pueden emplearse indistintamente cualquiera de las dos partes de la expresi\u00f3n (ecuaci\u00f3n 5).

El modelo de transferencia de calor doble elipsoidal de Goldak emplea par\u00e1metros constantes de las fuentes de calor (Q) y geom\u00e9tricos (a, b, c_f, c_r) de los cordones. Este aspecto hace que no considere las fluctuaciones dimensionales del ba\u00f1o de soldadura y, con ello, pueda considerar su efecto sobre las oscilaciones dimensionales que se aprecian al observar las superficies de los cordones.

1.3. Modelo de Azar

Azar [4] emplea el modelo de Goldak, pero no asocia el aporte energ\u00e9tico del arco como un proceso constante, sino que considera la energ\u00eda transferida entre momentos de m\u00e1ximos y m\u00ednimos aportes energ\u00e9tico, siguiendo una ley sinusoidal. De esta forma pretende resolver las diferencias energ\u00e9ticas entre las etapas de arco y de aporte met\u00e1lico durante la soldadura CMT. Para ello, propone tener en cuenta los momentos de aporte t\u00e9rmico, espec\u00edficamente para el proceso CMT, modificando las ecuaciones de Goldak, al introducir una integral de l\u00ednea definida y al cambiar las dimensiones c_f, c_r, a, b por funciones tiempo-dependientes, que suponen la transferencia de metal y el arco el\u00e9ctrico de forma peri\u00f3dica sinusoidal, tanto para la rama delantera (ecuaci\u00f3n 6), como para la trasera (ecuaci\u00f3n 7).

$$q_{if}(x, y, z, t) = \int_{min}^{max} \frac{6\sqrt{3} \cdot \dot{f}_f \cdot F_{t(Q|_{max}^{min})}}{F_{t(a)} \cdot F_{t(b)} \cdot F_{t(c_f)} \cdot \pi\sqrt{\pi}} \cdot e^{-3 \left[\left(\frac{(x-vt)^2}{F_{(c_f)}^2} \right) - \frac{3y^2}{F_{(a)}^2} + \frac{3z^2}{F_{(b)}^2} \right]} \quad 6$$

$$q_{ir}(x, y, z, t) = \int_{min}^{max} \frac{6\sqrt{3} \cdot \dot{f}_r \cdot F_{t(Q|_{max}^{min})}}{F_{t(a)} \cdot F_{t(b)} \cdot F_{t(c_r)} \cdot \pi\sqrt{\pi}} \cdot e^{-3 \left[\left(\frac{(x-vt)^2}{F_{(c_f)}^2} \right) - \frac{3y^2}{F_{(a)}^2} + \frac{3z^2}{F_{(b)}^2} \right]} \quad 7$$

$$F_{t(a)} = a \cdot |\sin(f\pi t) + a_{min}| \quad 8$$

$$F_{t(b)} = b \cdot |\sin(f\pi t) + b_{min}| \quad 9$$

$$F_{t(c_f)} = c_f \cdot |\sin(f\pi t) + c_{fmin}| \quad 10$$

$$F_{t(c_r)} = c_r \cdot |\sin(f\pi t) + c_{rmin}| \quad 11$$

$$F_{t(Q|_{max}^{min})} = Q_{max} \cdot |\sin(f\pi t) + Q_{min}| \quad 12$$

Donde: f , es la frecuencia de ocurrencia de los eventos, para CMT oscila entre 60 y 120 Hz

t , es el tiempo (s)

a_{min} , b_{min} , c_{fmin} , c_{rmin} , son los valores mínimos de las dimensiones establecidas (mm)

Q_{max} , Q_{min} , son los valores máximos y mínimos de la energía de entrada ($W \cdot m^{-3}$)

$$Q_{max} = \eta \cdot \{I_{pico} \cdot U_{pico}\}_t \quad 13$$

$$Q_{min} = \eta \cdot \{I_{base} \cdot U_{base}\}_t \quad 14$$

Donde: I_{pico} , es la corriente pico de soldadura

I_{base} , es la corriente base de soldadura

U_{pico} , es el voltaje pico de soldadura

U_{base} , es el voltaje base de soldadura

η , es la eficiencia del arco durante el proceso

Las fracciones instantáneas delanteras (f'_f) y traseras (f'_r) pueden ser calculadas dependiendo de la sección (delantera o trasera) de la fuente de calor de doble elipsoide y tiempo-dependiente (ecuación 15).

$$\dot{f}_f = 2 \frac{F_{t(c_f)}}{F_{t(c_f)} + F_{t(c_r)}} = 2 - \dot{f}_r \quad 15$$

Donde: \dot{f}_f es la fracción tiempo-dependiente delantera

\dot{f}_r es la fracción tiempo-dependiente trasera.

1.4. Parámetros que caracterizan el comportamiento de una onda cíclica

La onda cíclica (figura 3) se caracteriza porque su parámetro fundamental varía periódicamente respecto al tiempo.

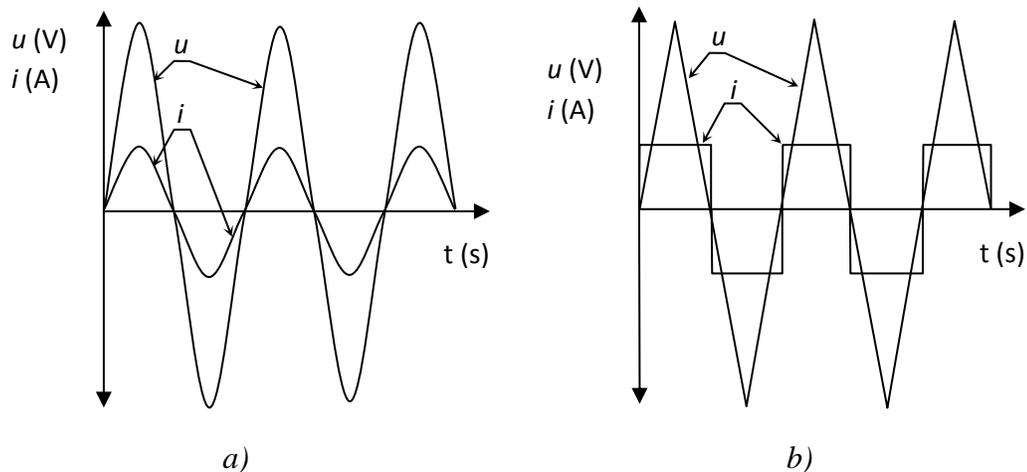


Figura 3: Representación de ondas, a) Sinusoidales de corriente (i) y tensión (u);
b) u – triangular; i – cuadrada

Los parámetros se representan con letras minúsculas (figura 3), indicando que varían con el tiempo. Dentro de los parámetros característicos de ondas cíclicas se encuentran: a) el ciclo; b) la frecuencia y el período, c) la velocidad angular; d) valor medio.

1.4.1. Ciclo del proceso CMT

El ciclo de desplazamiento (alimentación – retracción) del electrodo en el proceso de soldadura CMT puede aproximarse a la evolución completa de una onda sinusoidal alterna variable con el tiempo (figura 4), donde el recorrido de la onda corresponde al desplazamiento del electrodo, desde la etapa de arco (longitud máxima positiva en el eje de la ordenada), hasta la de colocación de la gota (mínimo recorrido en el eje de la ordenada).

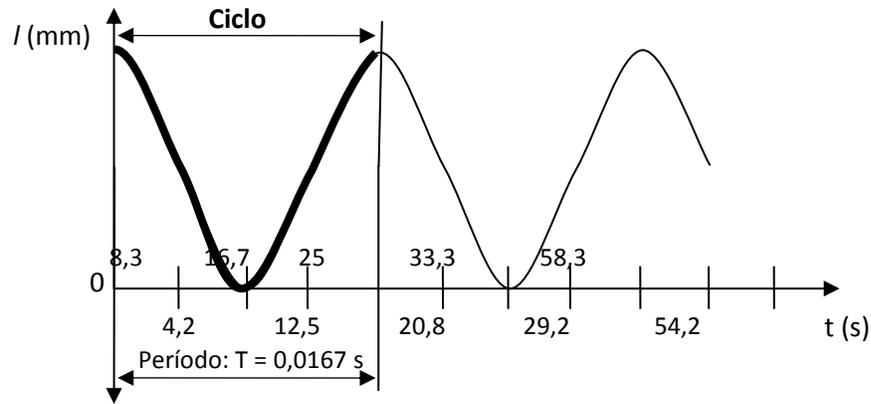


Figura 4: Representación de la onda de alimentación del electrodo. Proceso CMT (60 Hz)

1.4.2. Frecuencia (f) de la onda del proceso CMT

La frecuencia de avance y retracción del electrodo en el proceso de soldadura CMT expresa el número de ciclos completados en la unidad de tiempo (ecuación 16). De acuerdo con la definición dada, la frecuencia (f) del proceso CMT resulta aproximadamente de 60 Hz o ciclos por segundo.

$$f = \frac{1}{T} \tag{16}$$

1.4.3. Período (T) de la onda del proceso CMT

En el ciclo de soldadura CMT, el tiempo necesario (ecuación 17) para completar un ciclo (figura 4) o el período (T) de la onda de recorrido del electrodo sería de 0,01667 s.

$$T_{60} = \frac{1}{f} = \frac{1}{60 \text{ Hz}} = 0,01667 \text{ s} \tag{17}$$

1.4.4. Velocidad angular (ω) de la onda del proceso CMT

La velocidad angular (ecuación 18) de la onda característica del proceso CMT representa el número de radianes (o grados) recorridos del electrodo en la unidad de tiempo (figura 4).

$$\omega = 2\pi \cdot f = 2\pi \cdot 60 \text{ Hz} = 377 \text{ radianes} \cdot \text{s}^{-1} \tag{18}$$

1.5. Conclusiones Parciales

1. El proceso de soldadura CMT se produce como un ciclo de períodos de avance y retracción del material de aporte, combinado con los períodos máximos y mínimos de los parámetros eléctricos de corriente y tensión, en el medio del cual se deposita una gota (≈ 60 Hz) prácticamente sin corriente eléctrica, sin explosiones, ni salpicaduras.
2. El modelo de transferencia de calor doble elipsoidal de Goldak emplea parámetros constantes para la fuente de calor (Q) y para la geometría (a , b , c_f , c_r) de los cordones. Este aspecto hace que no explique las fluctuaciones que la fuente de calor ejerce sobre las dimensiones del baño de soldadura y, con ello, no pueda considerar su efecto sobre los ciclos térmicos en uniones soldadas.
3. El modelo de transferencia de calor doble elipsoidal propuesto por Azar emplea parámetros de las fuentes de calor y geométricos de los cordones, a partir de funciones variables con el tiempo; sin embargo, el efecto producido por la introducción del módulo completo en las funciones sinusoidales referentes a los parámetros geométricos y en la energía propuestas, distorsiona los verdaderos valores máximos y mínimos de las funciones evaluadas y no elimina la posibilidad de que estas trabajen con valores negativos, por lo que no replica fielmente el comportamiento cíclico del proceso CMT.
4. El efecto conjunto de las oscilaciones de la frecuencia eléctrica y de solidificación del ciclo de formación del cordón no ha sido considerado en la simulación de los ciclos térmicos originados por el proceso CMT.

Capítulo 2: Variación de la energía aportada en el proceso CMT

2.1. Geometría de la onda energética

La energía térmica efectiva (Q_{efect}) aportada por la potencia del arco es directamente proporcional a las fluctuaciones instantáneas de la corriente (i) y el voltaje (u) aplicados en el proceso de soldadura CMT y se corresponde con el ciclo de desplazamiento (alimentación – retracción) del electrodo y de deposición de las gotas de metal.

Entonces el ciclo de la onda energética (Q_{efect}) del proceso CMT puede representarse también como la evolución completa de una onda sinusoidal alterna variable con el tiempo, caracterizada por los mismos parámetros que la onda que caracteriza el desplazamiento del electrodo.

Luego, por analogía con la onda de desplazamiento del electrodo, puede establecerse la expresión instantánea de la onda sinusoidal que sufre la energía $FQ_{(t)}$ (ecuación 19), como una función sinusoidal que depende de la amplitud de la onda sinusoidal (\hat{Q}) de energía, en W, la velocidad angular (ω) de la onda sinusoidal, en radianes/s o en grados/s; el tiempo (t) necesario para completar un ciclo de la onda o período (T), en segundos y la frecuencia (f) o número de ciclos completados en la unidad de tiempo, en ciclos/s.

$$FQ_{(t)} = \hat{Q} \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad 19$$

Por tanto, puede emplearse la frecuencia de la onda sinusoidal (figura 5), que caracteriza el desplazamiento del electrodo (ecuación 16) en el ciclo del proceso CMT para estimar la energía (Q) de este proceso (ecuación 20).

$$FQ_{(t)} = \hat{Q} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \quad 20$$

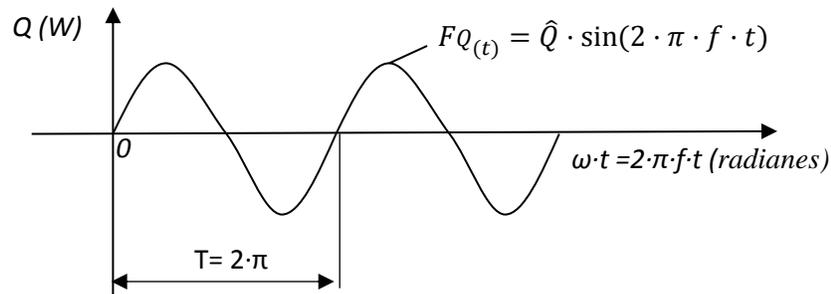


Figura 5: Valor efectivo o eficaz de la supuesta función periódica de energía (Q)

Sin embargo, el ciclo mostrado (figura 5) posee valores tanto positivos como negativos. Si bien el ciclo de alimentación del alambre se corresponde con una onda sinusoidal sin valores negativos, aunque exista retracción del alambre de soldadura, la energía introducida tampoco puede tener valores negativos. La energía aportada en una unidad reales y mayor o igual a cero; es decir, nunca sería negativa.

Por ello, la expresión instantánea de la onda sinusoidal, que grafica la energía $FQ_{(t)}$ del proceso CMT (ecuación 20) no es correcta, pues refiere para la energía $FQ_{(t)}$ valores negativos.

Azar [4] resuelve esto proponiendo adicionar a las ecuaciones tres cambios sustanciales:

- a) Sumando un valor mínimo, que garantice que la función no se haga cero.
- b) Determinando modularmente el valor final de la suma entre la función sinusoidal y el valor mínimo, para cada parámetro.
- c) Reduciendo a la mitad la velocidad angular de la onda.

Obteniéndose las modificaciones que se relacionan a continuación:

- a) Sumando un valor mínimo, que garantice que la función no se haga cero

Si se considera que la contracción mínima de la energía $FQ_{(t)}$, nunca debe tener valores inferiores a cero, ha de restringirse la función (ecuación 21) con un mínimo ($Q_{min} \geq 0$).

$$FQ_{(t)} = \hat{Q} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) + Q_{min} \quad 21$$

De esta forma la onda que sufre el parámetro energético (Q) podría expresarse como una función periódica positiva, para todo el dominio de tiempo evaluado.

La introducción de un valor mínimo (por ejemplo, Q_{\min} para el caso de la energía introducida) y en el resto de las funciones (ecuaciones de la 8 a la 12) permitiría eliminar los valores negativos (figura 6a y figura 6b, para la función $y = \sin(x) + b$), colocando un límite horizontal en la escala de la propiedad evaluada, tal que no arroje valores no prácticos.

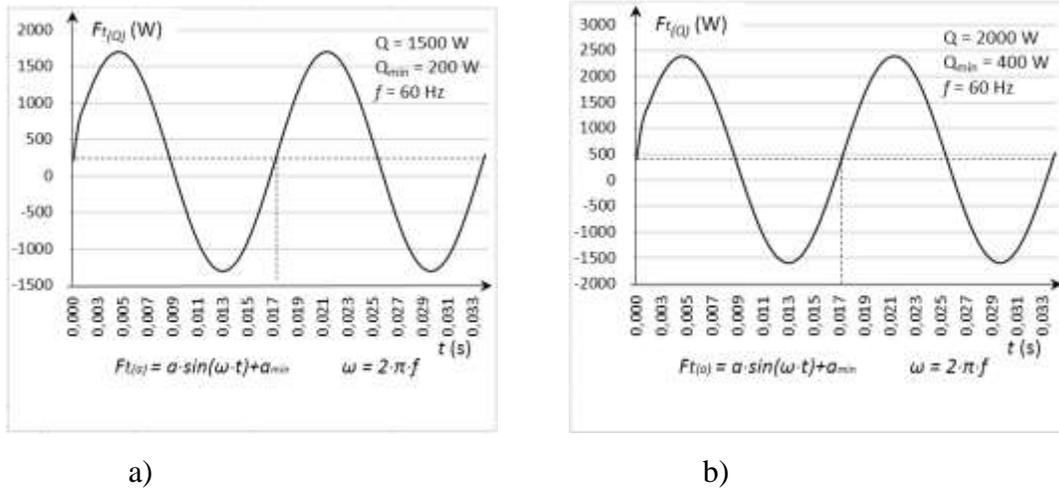


Figura 6: Efecto de la inclusión del mínimo y la amplitud en la función sinusoidal

Sin embargo, la onda sinusoidal se amplifica al introducirse el parámetro amplitud (Q), volviendo a alcanzar valores negativos; tanto mayores, cuanto, lo sea el valor del parámetro amplitud (figuras 6a y figuras 6b, función $FQ(t) = Q \cdot \sin(\omega \cdot t) + Q_{\min}$).

Este aspecto hace que el efecto causado por la introducción del valor mínimo (Q_{\min}) no resuelva el problema de los resultados negativos de la función y, por tanto, tampoco el ajuste al problema real; al menos con los valores máximos (Q) y mínimos (Q_{\min}) establecidos.

b) Introducción del módulo en la ecuación

Cuando Azar [4] introduce el módulo completo para el cálculo de las funciones (ecuaciones de la 8 a la 12) ($FQ(t) = Q \cdot |\sin(\omega \cdot t) + Q_{\min}|$), se elimina el efecto negativo de la senoide sobre los parámetros evaluados, pero los valores mínimos y máximos se distorsionan (en órdenes de 300 000 W). En caso de que se evaluaran para $Q = 1500$ y $Q_{\min} = 200$ W (figura 7) se incrementarán en $Q = 1690$ W y $Q_{\min} = 300$ W, diferenciándose de los valores máximos y mínimos reales, tanto más, cuanto mayores sean los valores de la amplitud (Q) y del mínimo declarado para la función (Q_{\min}).

Por otra parte, en un análisis dimensional de las funciones (ecuaciones de la 8 a la 12) propuestas por Azar [4] puede constatar que no es consistente, al obtenerse su resultado con valores cuadráticos.

Luego, el efecto producido por la introducción del módulo completo en las funciones sinusoidales referente a los parámetros geométricos y en la energía (ecuaciones de la 8 a la 12) propuestas por Azar [4], no replica fielmente el comportamiento cíclico del proceso CMT.

Otros estudios introducen un módulo parcial ($FQ_{(t)} = Q \cdot |\sin(\omega \cdot t)| + Q_{\min}$), modificando la función propuesta por Azar [4]. La introducción del módulo parcial ($FQ_{(t)} = Q \cdot |\sin(\omega \cdot t)| + Q_{\min}$), pudiera resolver el problema dimensional y conducir a la rectificación de la onda, suponiendo, por ejemplo, el nivel mínimo en $Q_{\min} = 200 \text{ W}$, mayor que cero, y la amplitud en $Q = 1500 \text{ W}$ (figura 7). Al aplicar este modelo modular parcial solamente a la parte sinusoidal de la función ($FQ_{(t)} = Q \cdot |\sin(\omega \cdot t)| + Q_{\min}$), pero para los parámetros mínimos ($Q_{\min} = 200 \text{ mm}$) y de amplitud ($Q = 1500 \text{ mm}$), se obtienen valores de la función semiancho del cordón ($FQ_{(t)}$) que caracterizan con similar precisión a los extremos de la función. Esto prueba que es más recomendable emplear el modelo modular parcial a solamente a la parte sinusoidal de la función, que no el completo presentado por Azar (ecuaciones de la 8 a la 12). Obsérvese (figura 7) que se mantiene la sincronía de las ondas de las funciones obtenidas empleando valores modulares, manteniéndose un mínimo en 200 W.

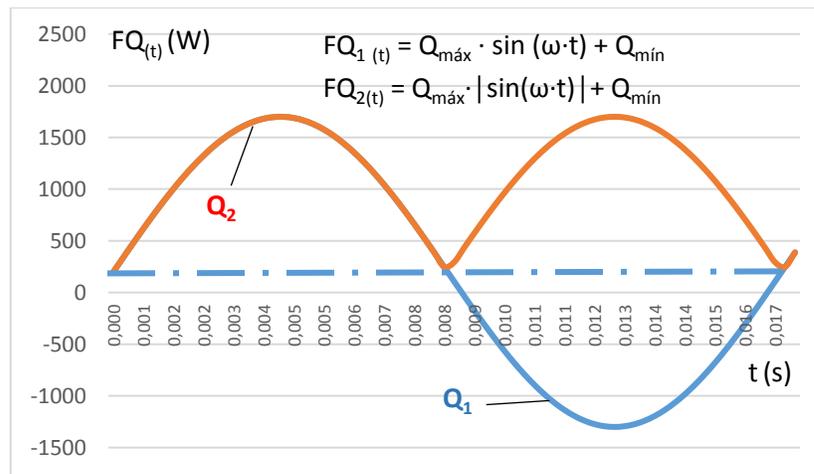


Figura 7: Efecto de la rectificación (obtención de valores modulares) de la función

$$FQ_{(t)} = Q_{\max} \cdot \sin(\omega \cdot t) + Q_{\min} \quad ; f = 60 \text{ Hz}$$

Sin embargo, modular parcialmente la parte sinusoidal de la función reduce el período de la onda a la mitad, duplicando su frecuencia y su velocidad angular.

c) Reducción de la velocidad angular de la onda

Azar [4], dentro del módulo de la función, también emplea el valor de la velocidad angular, solo como el producto πf (ecuaciones de la 8 a la 12). Esta consideración reduce a la mitad (189 radianes·s⁻¹) la velocidad angular real (377 radianes·s⁻¹). Este aspecto presupone la disminución a la mitad del período (T = 0,00834 s) del período de funcionamiento real (T = 0,01667 s) del proceso (figura 7) y, por tanto, del incremento (al doble) del número de ciclos ($f = 120$ Hz), lo cual no se ajusta al valor real de la frecuencia (60 Hz) del proceso CMT. La no coincidencia de la frecuencia de operación (120 Hz) de la función modular completa (ecuaciones de la 8 a la 12) con la del funcionamiento real del proceso (60 Hz), puede conducir a evaluar como aproximado el modelo propuesto por Azar.

Se había explicado (epígrafe 2.1 b) que al aplicar el modelo modular parcial sobre la parte sinusoidal de la función se reducía el período de la onda a la mitad, duplicando su frecuencia y su velocidad angular y que, por otra parte, el empleo del argumento πf en la función modular, causaba el efecto contrario.

Por lo anterior, y coincidentemente con el modelo propuesto por Azar, pero al emplear solo el módulo en la parte sinusoidal de la función, el uso de la velocidad angular $\omega = \pi f$ ajusta (figura 8) la función de energía del proceso ($FQ_{(t)} = Q \cdot |\sin(\omega \cdot t)| + Q_{\min}$) con la frecuencia real de ocurrencia del proceso CMT, y una amplitud igual a Q, lo cual convierte a otros modelos en una variante más aproximada.

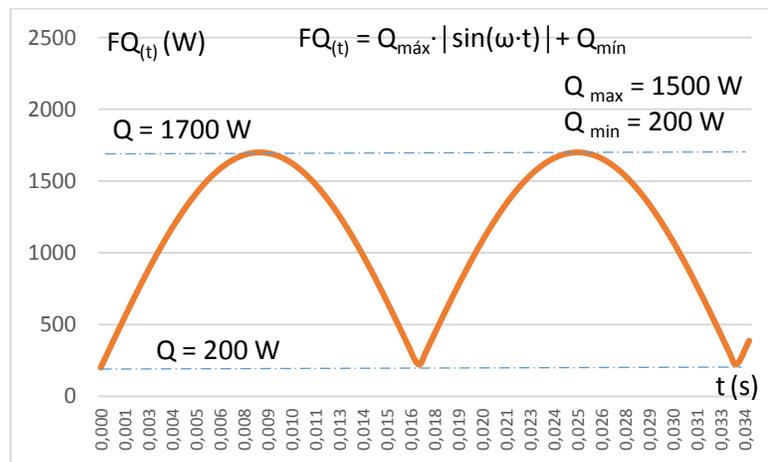


Figura 8: Efecto del empleo de la función con módulo en su parte sinusoidal

Sin embargo, la onda obtenida con el módulo colocado solo en la función sinusoidal no posee un comportamiento simétrico (figura 8) en sus puntos de inflexión máxima y mínima. Este aspecto también convierte este nuevo modelo en aproximado, puesto que, si bien garantiza la oscilación en el semieje positivo, no resuelve la restricción real de la oscilación de los parámetros entre sus valores mínimos y máximos (éste último se sobrepasa (figura 8)), por lo que tampoco caracteriza adecuadamente al proceso CMT.

2.2. Modelo para la descripción de las variaciones de los parámetros energéticos y geométricos del proceso CMT

La función seno puede desplazarse en el eje de las ordenadas, a partir de la introducción de coeficientes en la amplitud y el valor mínimo (ecuación 22). Esto permite la no obtención de valores negativos en las magnitudes dimensionales de la geometría del cordón, ni de la energía aportada, manteniendo la frecuencia de ocurrencia del proceso.

$$FQ_{(t)} = \frac{(Q_{\text{máx}} - Q_{\text{mín}})}{2} \cdot \sin(2 \cdot f \cdot \pi \cdot t) + \frac{(Q_{\text{máx}} - Q_{\text{mín}})}{2} + Q_{\text{mín}} \quad 22$$

De la ecuación 22, aplicada a la descripción de las variaciones de la energía aportada por el proceso CMT, puede obtenerse un comportamiento (figura 9) sinusoidal (ecuación 23), siempre positivo, enmarcado entre los valores máximos ($Q_{\text{máx}}$) y mínimos ($Q_{\text{mín}}$).

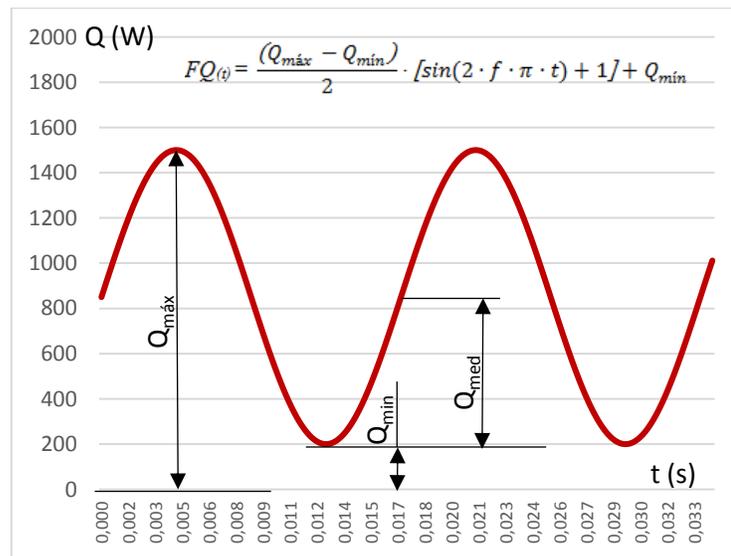


Figura 9: Modelo propuesto para evaluar la fluctuación energética en el proceso CMT

$$(f = 60 \text{ Hz})$$

$$FQ_{(t)} = \frac{(Q_{\text{máx}} - Q_{\text{mín}})}{2} \cdot [\sin(2 \cdot f \cdot \pi \cdot t) + 1] + Q_{\text{mín}} \quad 23$$

Esta función se describe matemáticamente como la función del parámetro Q, variable con el tiempo ($FQ_{(t)}$).

2.3. Frecuencias de los procesos eléctricos y térmicos en el proceso CMT

Si los parámetros geométricos dependen del calor aportado y este del ciclo energético del proceso caracterizado por el producto instantáneo de las ondas eléctricas sinusoidales, entonces las variaciones de los parámetros geométricos responden también a la variación de dicha onda, suponiendo similares las inercias eléctrica, térmica y geométrica del proceso.

Sin embargo, los procesos térmicos no ocurren con la misma inercia o con la misma frecuencia de los procesos eléctricos.

El proceso de deposición de gotas metálicas aplicando soldadura CMT se ha descrito entre frecuencias que oscilan de 50 a 120 Hz, que corresponden a los ciclos eléctricos (de aplicación de corriente y voltaje). La deposición metálica se ha descrito que ocurre por tensión superficial, a la frecuencia comúnmente empleada de 60 Hz, lo que conduce a cordones con un coeficiente de forma constante, incluso apreciable a simple vista sin oscilaciones superficiales en ancho y alto; igualmente ocurre en su profundidad. Esta misma característica se aprecia en cordones realizados con soldadura con arco sumergido (*SAW-Submerged Arc Welding*, de sus siglas en inglés).

El tiempo de solidificación de los metales, se reconoce como el intervalo durante el cual ocurre la transformación de fase, desde el estado líquido, al sólido. En los procesos metalúrgicos de fundición, por ejemplo, ocurre una sola vez durante el enfriamiento del metal dentro de los moldes.

En los procesos de soldadura, el tiempo de solidificación ocurre repetidas veces; tantas, como fragmentos del cordón de soldadura se solidifican consecutivamente, toda vez que la porción del metal se encuentre en las condiciones termodinámicas adecuadas, lo que da lugar a conchas.

El tiempo que media entre una fase de solidificación y otra depende de la tasa de fusión del material de aporte, la velocidad de soldadura y las condiciones de enfriamiento a que está sometida la pieza, entre otros parámetros operativos. Sin embargo, una adecuada realización del proceso de soldadura produce una cadencia de formación de conchas sobre el cordón, relacionadas con estos procesos de solidificación. El tiempo medio entre cada fase de solidificación de cada concha se puede reconocer como período de solidificación (T_s), si se comienza a medir en el instante de inicio para cada ciclo de solidificación, para cada concha.

En este caso, como el proceso es periódico, tiene sentido hablar también de una frecuencia de solidificación (conchas) (f_s) o cantidad de veces que se realiza la solidificación de las conchas del cordón en un tiempo determinado. Si los parámetros eléctricos y el control humano lo permiten, tanto el período (T_s) como la frecuencia de solidificación (conchas) (f_s) son constantes.

La frecuencia de solidificación (conchas) (f_s) del ciclo de formación del cordón, puede evaluarse de manera práctica como el inverso del tiempo (período) transcurrido entre los instantes medios de los momentos de solidificación o de formación de las crestas observadas sobre el cordón. Este período transcurrido entre los instantes de formación de las crestas es diferente para cada proceso y para las condiciones específicas de aplicación de cada uno; depende de las condiciones de calentamiento y enfriamiento específicas establecidas, dadas por el tipo de material, espesores, preparaciones de junta, tipo de proceso de soldadura, parámetros del régimen aplicado, temperaturas iniciales del proceso, condiciones de enfriamiento prescritas por el entorno, etc. Incluso, esta distancia apreciada a simple vista en el proceso de soldadura manual con arco eléctrico (*SMAW-Shilded Metal Arc Welding*, de sus siglas en inglés) depende de la habilidad del soldador, la forma de desplazamiento del electrodo (arrastrando el recubrimiento o manteniéndolo despegado del material base) y de las características específicas del electrodo.

No es objetivo del presente trabajo evaluar estos aspectos; sin embargo, sí debe estimarse un valor de la frecuencia de solidificación (conchas) (f_s) o del ciclo de formación de las conchas del cordón, dentro del rango de aplicación del proceso CMT, para compararla con la frecuencia eléctrica (f_d) del proceso.

A partir de estudios dimensionales de las conchas observadas sobre los cordones de soldadura, la frecuencia de solidificación (conchas) (f_s) o del ciclo de formación de las conchas del cordón se puede estimar ente 5 y 10 veces menor que la frecuencia eléctrica ($f_d = 60 \text{ Hz}$) del proceso de soldadura. Este rango puede variar para cada proceso y parámetros aplicados, según se manifestó anteriormente. Para el caso del proceso CMT puede estimarse las frecuencias de solidificación (f_s) entre 11 Hz y 37 Hz, con períodos aproximados de 0,089 s y 0,027 s, respectivamente (figura 10), pudiéndose estimar para este proceso que la frecuencia (f_d) del ciclo de deposición de material puede ser entre 5,4 y 1,6 veces menor, que la frecuencia de solidificación (conchas) (f_s).

Por lo anterior se puede evidenciar que la frecuencia (f_d) del ciclo de deposición del material, durante el proceso de soldadura CMT, no coincide con la frecuencia de solidificación (conchas) (f_s) del ciclo formación del cordón. Este fenómeno no es exclusivo del proceso CMT, sino que es común para todos los procesos de soldadura por arco, con o sin aporte metálico. Por esta razón, para la evaluación de las oscilaciones dimensionales y térmicas en el cordón de soldadura, realizado con el proceso CMT, no debe emplearse la frecuencia eléctrica de 60 Hz, propuesta por Azar [4], sino la frecuencia térmica de solidificación del metal, la cual pudiera estimarse aproximadamente en el orden de los 15 a 35 Hz, dependiendo de la velocidad de soldadura y de las correcciones de longitud de arco y de pulso de corriente empleadas en el proceso CMT.

Por otra parte, la forma de la curva de la fluctuación geométrica no se corresponde con una curva sinusoidal simétrica en los puntos de inflexión máximos y mínimos, sino asimétrica (figura 10).

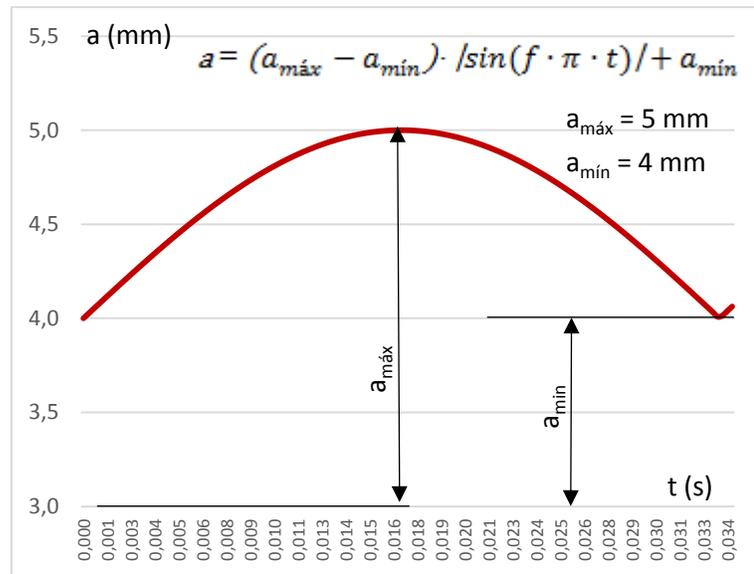


Figura 10: Modelo para la variación del semiancho del cordón (a), utilizado una frecuencia de solidificación (conchas) ($f_s = 30$ Hz)

La ecuación ($Fa(t)$) que pudiera describir el comportamiento del límite de fusión o semiancho del cordón (a) puede expresarse (ecuación 24), a diferencia de la ecuación de la energía, con un núcleo modular en la sección sinusoidal de la ecuación, pero con el valor de la amplitud dada por la media entre los valores máximos ($a_{máx}$) y mínimos ($a_{mín}$) de la oscilación del semiancho del cordón (a).

$$Fa(t) = (a_{máx} - a_{mín}) \cdot /sin(f \cdot \pi \cdot t) / + a_{mín} \quad 24$$

Obsérvese que la frecuencia (f_s) de ocurrencia del evento (solidificación de la porción de del baño de soldadura) es diferente a la de ocurrencia de los eventos eléctricos.

2.4. Modelo de fuente descriptivo de la forma del baño de soldadura producido durante la aplicación del proceso CMT

Las funciones sinusoidales (ecuaciones de la 8 a la 12) corresponden a expresiones matemáticas, que Azar emplea para tratar de describir los cambios de las variables energéticas (Q) y dimensionales (a , b , c_f y c_r) en el modelo de Goldak, sobre los cordones de soldadura obtenidos con el proceso CMT. Además de considerar estas fluctuaciones, independientemente del análisis previo realizado en el presente trabajo sobre la forma y tratamiento dado, Azar introduce en la ecuación general una integral de línea que afecta también la variación de las propiedades.

Es decir, Azar representa la trayectoria de la propiedad a lo largo de una curva dentro de un campo vectorial, vistos por la dimensión a medida que viaja por la curva. La suma de los productos escalares de esos vectores con el vector tangente de la curva en cada punto de la trayectoria daría como resultado una integral de línea. La evaluación de la función seno y la integral introducida pudiera perturbar el tratamiento matemático del problema.

Considerando este criterio, y todos los anteriormente vertidos, se propone una modificación a los modelos de fuente de calor de Goldak y Azar para describir la forma del baño de soldadura, cuya ecuación general para la rama delantera (ecuación 25) y trasera (ecuación 26) dependen de funciones dimensionales independientes para la energía (ecuación 27) y para los parámetros geométricos (ecuaciones de la 28 a la 31) que están en función de la frecuencia de ocurrencia de los procesos eléctricos ($f_d = 60 \text{ Hz}$) y térmicos ($f_s = 20 \text{ Hz}$), respectivamente.

$$q_{f(x,y,z,t)} = \frac{6\sqrt{3} \cdot \dot{f}_f \cdot F_{Q(t)}}{F_{a(t)} \cdot F_{b(t)} \cdot F_{c_f(t)} \cdot \pi \cdot \sqrt{\pi}} \cdot e^{-3 \left[\left(\frac{(x-v \cdot t)^2}{(F_{c_f(t)})^2} \right) - \frac{3 \cdot y^2}{(F_{a(t)})^2} + \frac{3 \cdot z^2}{(F_{b(t)})^2} \right]} \quad 25$$

$$q_{r(x,y,z,t)} = \frac{6\sqrt{3} \cdot \dot{f}_r \cdot F_{Q(t)}}{F_{a(t)} \cdot F_{b(t)} \cdot F_{c_r(t)} \cdot \pi \cdot \sqrt{\pi}} \cdot e^{-3 \left[\left(\frac{(x-v \cdot t)^2}{(F_{c_r(t)})^2} \right) - \frac{3 \cdot y^2}{(F_{a(t)})^2} + \frac{3 \cdot z^2}{(F_{b(t)})^2} \right]} \quad 26$$

$$F_{Q(t)} = \left(\frac{Q_{\text{máx}} - Q_{\text{mín}}}{2} \right) \cdot [\sin(2 \cdot f_d \cdot \pi \cdot t) + 1] + Q_{\text{mín}} \quad 27$$

$$F_{a(t)} = (a_{\text{máx}} - a_{\text{mín}}) \cdot |\sin(f_s \cdot \pi \cdot t)| + a_{\text{mín}} \quad 28$$

$$F_{b(t)} = (b_{m\acute{a}x} - b_{m\acute{i}n}) \cdot |\sin(f_s \cdot \pi \cdot t)| + b_{m\acute{i}n} \quad 29$$

$$F_{c_f(t)} = (c_{f\ m\acute{a}x} - c_{f\ m\acute{i}n}) \cdot |\sin(f_s \cdot \pi \cdot t)| + c_{f\ m\acute{i}n} \quad 30$$

$$F_{c_r(t)} = (c_{r\ m\acute{a}x} - c_{r\ m\acute{i}n}) \cdot |\sin(f_s \cdot \pi \cdot t)| + c_{r\ m\acute{i}n} \quad 31$$

Donde: f_d , frecuencia de ocurrencia de los eventos el\u00e9ctricos y de deposici\u00f3n de las gotas met\u00e1licas, para CMT oscila entre 60 y 120 Hz;

f_s , frecuencia de solidificaci\u00f3n (conchas) o del ciclo de formaci\u00f3n de las conchas del cord\u00f3n, para CMT oscila entre 11 y 37 Hz;

t , tiempo (s);

$a_{m\acute{a}x}$, $b_{m\acute{a}x}$, $c_{f\ m\acute{a}x}$, $c_{r\ m\acute{a}x}$, valores m\u00e1ximos o amplitudes del semiancho (a), profundidad de penetraci\u00f3n (b), longitud delantera (c_f) y trasera (c_r) del ba\u00f1o de fusi\u00f3n (mm);

$a_{m\acute{i}n}$, $b_{m\acute{i}n}$, $c_{f\ m\acute{i}n}$, $c_{r\ m\acute{i}n}$, valores m\u00ednimos de las dimensiones del semiancho (a), profundidad de penetraci\u00f3n (b), longitud delantera (c_f) y trasera (c_r) del ba\u00f1o de fusi\u00f3n, (mm);

Q_{max} , Q_{min} , valores m\u00e1ximos (amplitud) y m\u00ednimos de la energ\u00eda de entrada ($W \cdot m^{-3}$),

Los valores de la energ\u00eda de entrada ($W \cdot m^{-3}$) m\u00e1ximos o de amplitud (Q_{max}) y m\u00ednimos (Q_{min}) dependen de los par\u00e1metros el\u00e9ctricos de corriente de pico (I_{pico}) y de base (I_{base}) y de la tensi\u00f3n de pico (U_{pico}) y de base (U_{base}) aplicados (ecuaciones 32 y 33), respectivamente, y de la eficiencia del arco (η) durante el proceso.

$$Q_{max} = \eta \cdot \{I_{pico} \cdot U_{pico}\}_t \quad 32$$

$$Q_{min} = \eta \cdot \{I_{base} \cdot U_{base}\}_t \quad 33$$

Las fracciones instant\u00e1neas tiempo-dependiente delanteras (f'_f) y traseras (f'_r) pueden ser calculadas geom\u00e9tricamente (ecuaci\u00f3n 34) dependiendo de la secci\u00f3n que se trate (delantera o trasera) a partir de las variaciones de los par\u00e1metros geom\u00e9tricos del cord\u00f3n.

$$\dot{f}_f = 2 \frac{F_{c_f(t)}}{F_{c_f(t)} + F_{c_r(t)}} = 2 - \dot{f}_r$$

La ecuación del modelo predictivo oscilatorio, desarrollado en el presente trabajo, para la descripción de la fuente de calor en procesos de soldadura por fusión, con fuentes móviles, depende de funciones, que contienen la variación sinusoidal de los parámetros energéticos del proceso y geométricos de la zona fundida, tanto para la rama delantera (ecuación 25), como trasera (ecuación 26), de la doble elipsoide que conforma el baño de soldadura.

En este modelo propuesto, la función energética constituye una función sinusoidal (ecuación 27) que oscila entre los valores mínimos y máximos del aporte energético del proceso, caracterizado por las oscilaciones de los parámetros eléctricos del arco de soldadura y los períodos de acercamiento y alejamiento del electrodo a la pieza en el proceso de soldadura CMT. Característica de esta función es el sentido positivo que mantiene en todo su dominio, regido por la frecuencia (f_d) de una onda sinusoidal característica del ciclo eléctrico y de deposición de la gota.

En el modelo predictivo oscilatorio desarrollado los parámetros geométricos también los caracterizan funciones sinusoidales modulares (ecuación 28 a la 31). Estas funciones describen el comportamiento de ciclos de variación dimensional de cada parámetro geométrico del cordón de soldadura, tales como el semiancho (a), la profundidad de penetración (b) y las distancias frontales (c_f) y trasera (c_r) del baño de soldadura. En esta descripción se emplea como frecuencia (f_s) la de ocurrencia del evento “solidificación de la porción del baño de soldadura”. Una particularidad de este modelo es que la frecuencia (f_s), que define los parámetros geométricos, es diferente a la frecuencia (f_d), que define el comportamiento de los eventos eléctricos (se diferencian en cuanto a la simetría, máximos y mínimos). La frecuencia (f_s) es coincidente con el comportamiento esperado en los ciclos del proceso de solidificación del metal en las uniones soldadas con el proceso CMT.

El modelo predictivo oscilatorio desarrollado para la descripción de la fuente de calor en procesos de soldadura por fusión, con fuentes móviles, pudiera emplearse en la simulación de temperaturas del límite de fusión y en el estudio de la velocidad de solidificación, el gradiente térmico local y el tiempo de solidificación, los cuales, según Schempp [7], varían significativamente a lo largo del frente de solidificación (entre la línea central de soldadura y la interfaz de soldadura). Específicamente, en trabajos como los de Schempp [7] se obtienen resultados que explican la morfología del grano.

2.5. Programación en COMSOL

Existen varios software para la programación del efecto de la fuente de calor en soldadura. El ANSYS es comúnmente empleado para la simulación de fuentes de tipo gaussiana [8] y doble elipsoidal [9]. Otro software profesional empleado para este fin es el SYSWELD+® [10]. Sin embargo, el COMSOL es también una aplicación multifísica que brinda buenos resultados [6].

2.5.1. Definición de los parámetros

1. La potencia de la fuente oscila entre valores máximos (Q_2) y mínimos (Q_1), correspondientes a las etapas de arco y de deposición de la gota, definido por los valores picos y base de la corriente y del voltaje, respectivamente [11].
2. Se tiene en cuenta la frecuencia de solidificación (conchas) (f_s) presente en la obtención de los parámetros geométricos, así como, la frecuencia eléctrica (f_d) para el aporte energético de dicho modelo [11].
3. Para la obtención de los valores máximos y mínimos de los parámetros geométricos se tiene en cuenta un coeficiente de rizado (E), el cual considera la diferencia geométrica entre las dimensiones máximas y mínimas del baño de soldadura, reconocidas visualmente como las conchas formadas durante el proceso de solidificación de metal.
4. Los parámetros geométricos del baño de soldadura a, b, c_f y c_r fueron obtenidos a partir de criterios de la literatura [11], así como las propiedades térmicas del material (tabla 1), específicamente para la temperatura de fusión de la aleación.

Tabla 1: Propiedades termodependientes del aluminio 5754 [2]

| | | | |
|---------------------------------------|-----------|-------|--------------------|
| Coeficiente de transferencia de calor | λ | 0,32 | cal/(cm·s·°C) |
| Peso específico | γ | 2,67 | g/cm ³ |
| Calor específico | c | 0,239 | cal/(g·°C) |
| Coeficiente de termodifusividad (a) | a | 0,5 | cm ² /s |
| Temperatura de fusión | T_f | 654 | °C |

Los parámetros o constantes del modelo (figura 11) pueden ser, tanto valores fijos, como calculados. Para constatar el ajuste del modelo con otros anteriores publicados, se programa el modelo predictivo oscilatorio los valores de cero, en los valores que le transfieren su carácter oscilatorio.

| ▼ Parámetros | | | | |
|--------------|--------|-------------------------|-----------|--|
| ” | Nombre | Expresión | Valor | Descripción |
| Vp | | 26[V] | 26 V | Voltaje de soldadura pico |
| Vb | | 12[V] | 12 V | Voltaje de soldadura base |
| Ip | | 123[A] | 123 A | Corriente de soldadura pico |
| Ib | | 117[A] | 117 A | Voltaje de soldadura base |
| n | | 0.95 | 0.95 | Eficiencia estimada del proceso |
| Q2 | | $n \cdot V_p \cdot I_p$ | 3038.1 W | Potencia máxima de la fuente |
| Q1 | | $n \cdot V_b \cdot I_b$ | 1333.8 W | Potencia mínima de la fuente |
| v | | 0.96[m/min] | 0.016 m/s | Velocidad de soldadura |
| a | | 2.88[mm] | 0.00288 m | Profundidad de penetración |
| a2 | | a+E | 0.00288 m | Profundidad de penetración máximo |
| a1 | | a-E | 0.00288 m | Profundidad de penetración mínimo |
| b | | 2.74[mm] | 0.00274 m | Ancho del depósito |
| b2 | | b+E | 0.00274 m | Ancho del depósito máximo |
| b1 | | b-E | 0.00274 m | Ancho del depósito mínimo |
| cf | | 2.36[mm] | 0.00236 m | Longitud frontal del baño de soldadura |
| cr | | 3.95[mm] | 0.00395 m | Longitud trasera del baño de soldadura |
| l | | cf+cr | 0.00631 m | Longitud del baño de soldadura |
| cf2 | | cf+E | 0.00236 m | Longitud frontal del baño de soldadura máximo |
| cf1 | | cf-E | 0.00236 m | Longitud frontal del baño de soldadura mínima |
| cr2 | | cr+E | 0.00395 m | Longitud trasera del baño de soldadura máxima |
| cr1 | | cr-E | 0.00395 m | Longitud trasera del baño de soldadura mínima |
| ff | | 0.6667 | 0.6667 | Coefficiente de proporcionalidad frontal del baño de soldadura |
| fr | | 2-ff | 1.3333 | Coefficiente de proporcionalidad trasero del baño de soldadura |
| T0 | | 28[degC] | 301.15 K | Temperatura inicial de la pieza |
| x0 | | 10[mm] | 0.01 m | Posición del centro de la fuente para el eje x |
| y0 | | 150[mm] | 0.15 m | Posición del centro de la fuente para el eje y |
| z0 | | 0[mm] | 0 m | Posición del centro de la fuente para el eje z |
| E | | 0[mm] | 0 m | Coefficiente de rizado |
| fs | | 0[Hz] | 0 Hz | Frecuencia de solidificación del cordón |
| fd | | 0[Hz] | 0 Hz | Frecuencia eléctrica del proceso |
| Vm | | $(V_p + V_b)/2$ | 19 V | Voltaje medio de soldadura |
| Im | | $(I_p + I_b)/2$ | 120 A | Corriente media de soldadura |
| Qm | | $I_m \cdot V_m \cdot n$ | 2166 W | Energía media de soldadura |

Figura 11: Definición de los parámetros

2.5.2. Definición de la geometría

Se definen (figura 12) tres componentes geométricos (ancho, profundidad y altura) con el objetivo de crear un sólido tridimensional que simule una placa metálica (figura 13).

| | | |
|------------------|--------|----|
| ▼ Tipo de objeto | | |
| Tipo: | Sólido | ▼ |
| ▼ Tamaño | | |
| Ancho: | 300 | mm |
| Profundidad: | 3 | mm |
| Altura: | 150 | mm |

Figura 12: Parámetros geométricos

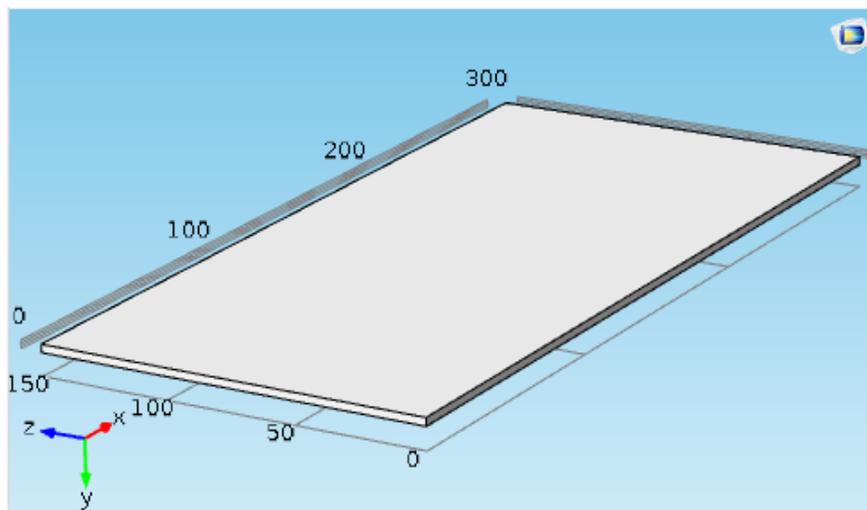


Figura 13: Representación geométrica de la pieza

Para la realización de estudios termodependientes, de frecuencias o paramétricos, se realiza el establecimiento de coordenadas (tabla 2) que definen puntos de pruebas (sondas) en los cuales son supuestamente colocados termopares (figura 14) para monitorear el proceso de simulación real.

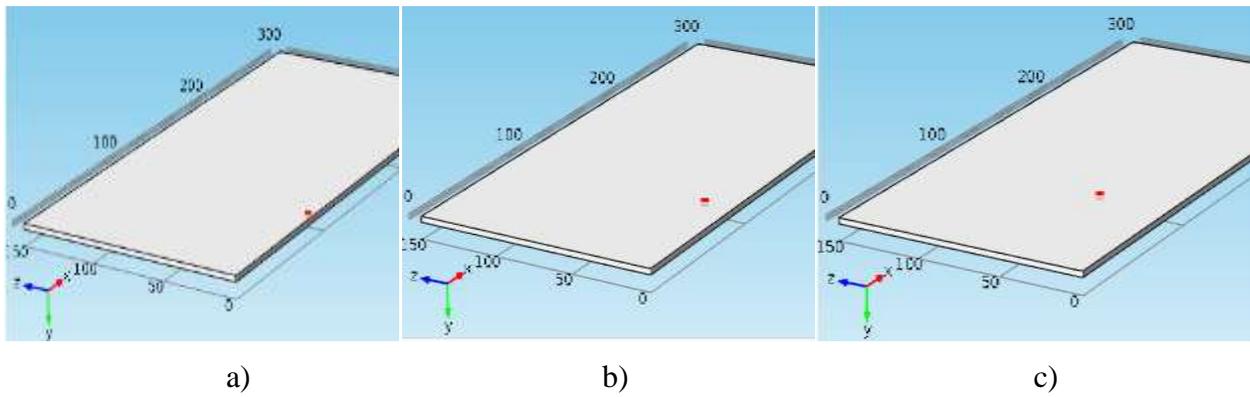


Figura 14: Puntos de prueba

Tabla 2: Coordenadas de los puntos de prueba

| Punto | X (mm) | Y (mm) | Z (mm) |
|-------|--------|--------|--------|
| a | 90 | 1 | 6 |
| b | 90 | 1 | 22 |
| c | 90 | 1 | 45 |

2.5.3. Mallado

Para el mallado del modelo (figura 15) se toman 3 mm como tamaño mínimo de elemento, 24 mm como tamaño máximo y una tasa de crecimiento máxima de elemento de 1,45; con un factor de curvatura de 0,5 y una resolución de regiones estrechas de 0,6.

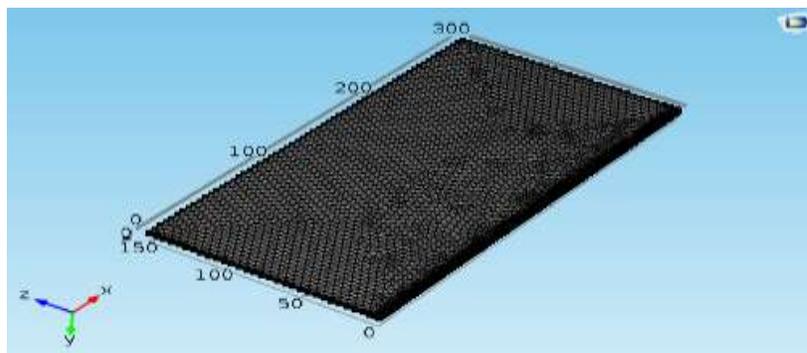


Figura 15: Mallado del modelo

En la zona del cordón de soldadura se afina la malla, buscando mejores resultados.

Se considera el estudio temporal, considerando los aspectos relacionados con el ascenso, mantenimiento y descenso de la temperatura en la pieza.

2.6. Conclusiones parciales

1. La combinación de la integral de línea con las funciones sinusoidales modulares que conforman el modelo propuesto por Azar no conduce a evaluaciones consistentes con el comportamiento real de las ondas de energía, de deposición metálica, ni con las fluctuaciones de la geometría de los cordones observados en el proceso CMT. La solución consiste en eliminar la integral de línea, y mantener el empleo de funciones sinusoidales, pero considerando solo el valor modular para el comportamiento de la función sinusoidal, así como en el empleo de una frecuencia de trabajo para el ciclo energético y otra para, el de solidificación de la zona fundida.
2. La función sinusoidal de aporte energético $FQ_{(t)} = (Q_{máx} - Q_{mín}) / 2 \cdot (\sin(2 \cdot f_d \cdot \pi \cdot t) + 1) + Q_{mín}$ se ajusta a un ciclo ideal sinusoidal de energía aportada, dependiente de la frecuencia conjunta (f_d) de los procesos eléctricos y de deposición de las gotas.
3. La función sinusoidal modular $Fa_{(t)} = (a_{máx} - a_{mín}) \cdot |\sin(f_s \cdot \pi \cdot t)| + a_{mín}$ describe el comportamiento de ciclos de variación positiva del semiancho (a) del cordón de soldadura, con frecuencia, simetría, máximos y mínimos, coincidentes con el comportamiento esperado en los ciclos del proceso de solidificación del metal en las uniones soldadas con el proceso CMT. Esta ecuación es válida y aplica para el resto de los parámetros geométricos del cordón de soldadura, tales como la profundidad de penetración (b) y las distancias frontales (c_f) y trasera (c_r) de la poza de soldadura.
4. La frecuencia (f_d) del ciclo de deposición de material, durante el proceso de soldadura CMT, no coincide con la frecuencia de solidificación (f_s) del ciclo formación del cordón, fenómeno no exclusivo del proceso CMT. Para la evaluación de las oscilaciones térmicas en el proceso de soldadura CMT debe emplearse la frecuencia eléctrica de 60 Hz y, para las dimensionales del cordón de soldadura, debe emplearse la frecuencia térmica de solidificación de 20 Hz.
5. La programación de las frecuencias el software COMSOL *Multiphysic* permite estudiar su efecto sobre los cambios en la temperatura, geometría del baño de soldadura y sobre los ciclos térmicos. Para ello, se definen en el modelo los parámetros eléctricos, como intensidad de la corriente, voltaje y aporte energético que operan con el valor medio, en los valores de 120 A, 19 V, 2166 W, respectivamente.
6. En la realización del mallado del modelo se divide la geometría de la pieza en elementos, con tamaño máximo de 24 mm y en la zona más próxima al estudio se refina la malla con tamaño mínimo de 3 mm por elemento con el fin de obtener resultados más precisos.

Capítulo 3: Simulación en el software *COMSOL Multiphysic*

3.1. Validación del modelo

Para la validación del modelo se emplea una comparación entre los valores máximos de temperatura y su correspondencia con los tiempos en que se obtienen (Figura 16 b), al evaluar los ciclos térmicos correspondientes a tres puntos de prueba (figura 16 a).

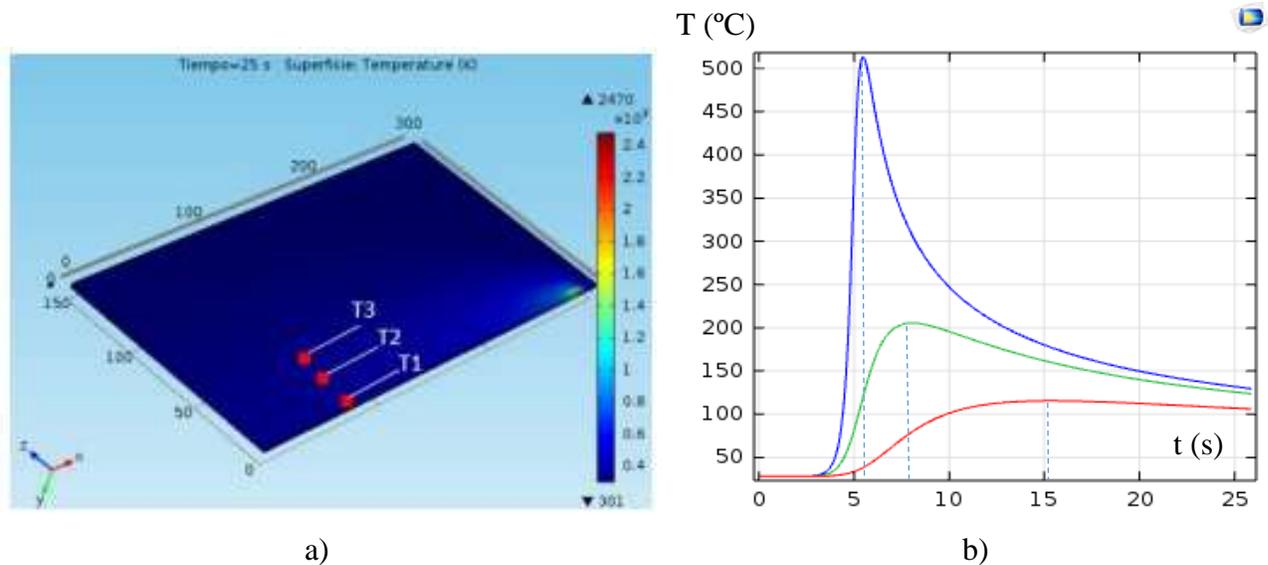


Figura 16: Modelo de la literatura [12] para la validación

a) Puntos de prueba; b) curvas de ciclos térmicos

$$V_s = 19 \text{ V}; I_s = 120 \text{ A}; \eta = 0,95; v_s = 0,96 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}; a = 2,88 \text{ mm}; b = 2,74 \text{ mm}; c_f = 2,36 \text{ mm}; \\ c_r = 3,95 \text{ mm}$$

Se comparan los resultados del modelo predictivo (figura 16, tabla 3a) obtenido por OFarril [12] con los resultados del modelo predictivo oscilatorio obtenido en el presente trabajo (epígrafe 2,4), en dos variantes (figura 17, tabla 3): a) Evaluado para $E = f_s = f_d = 0$; b) Evaluado para $E = f_s = 0$; $f_d = 60 \text{ Hz}$.

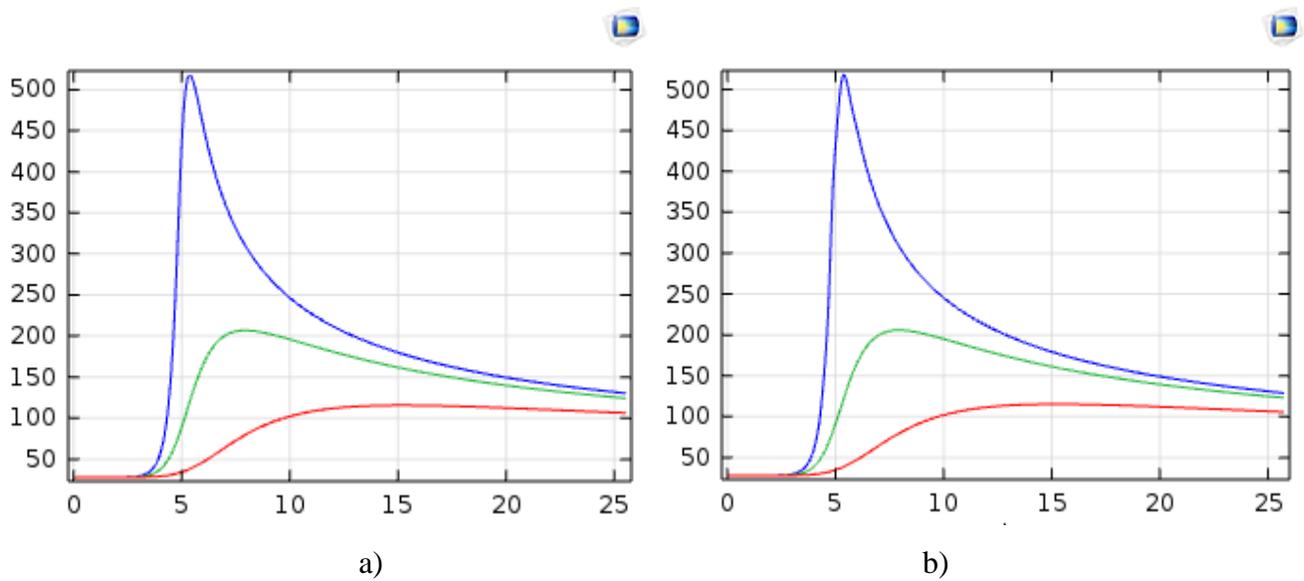


Figura 17: Curvas de ciclos térmicos obtenidos con el modelo predictivo oscilatorio

$V_{S(min)} = 12 \text{ V}$; $V_{S(máx)} = 26 \text{ V}$; $V_{S(med)} = 19 \text{ V}$; $I_{S(min)} = 117 \text{ A}$; $I_{S(máx)} = 123 \text{ A}$; $I_{S(med)} = 120 \text{ A}$; $\eta = 0,95$;
 $v_s = 0,96 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$; $a = 2,88 \text{ mm}$; $b = 2,74 \text{ mm}$; $c_f = 2,36 \text{ mm}$; $c_r = 3,95 \text{ mm}$
 a) Evaluado para $E = fs = fd = 0$; b) Evaluado para $E = fs = 0$; $fd = 60 \text{ Hz}$

Tabla 3: Valores máximos de temperatura y tiempo en que se producen. Ciclos térmicos

| Identificación | Punto experimental | Puntos de prueba (Figura 12) | 1 | 2 | 3 |
|----------------|--|------------------------------|--------|--------|--------|
| A | Modelo OFarril | $T_{(Máxima)}$ | 513,32 | 205,52 | 115,42 |
| | | tiempo (T_{max}) | 5,48 | 8,01 | 15,18 |
| B | Corrida con $E = fs = fd = 0$ | $T_{(Máxima)}$ | 517,97 | 206,79 | 115,65 |
| | | tiempo (T_{max}) | 5,35 | 7,89 | 15,13 |
| C | Corrida con $E = fs = 0$; $fd = 60 \text{ Hz}$ | $T_{(Máxima)}$ | 518,32 | 205,76 | 115,27 |
| | | tiempo (T_{max}) | 5,40 | 7,91 | 15,05 |

Al comparar los resultados gráficos obtenidos con el modelo predictivo (A) de OFarril [12] y oscilatorio desarrollado (B) se observa (figura 17 a y figura 17 b) que existe una coincidencia entre las formas de las curvas de ciclos térmicos para los tres puntos de prueba.

Al evaluarse el modelo predictivo oscilatorio desarrollado, para las condiciones en que los parámetros de oscilación del modelo son cero (tabla 3, fila B), puede constatar que los valores de las temperaturas máximas de los ciclos térmicos y tiempos para los cuales se obtienen, también son similares a los obtenidos (tabla 3, fila A) en el modelo predictivo usado para la validación [12].

Ambos aspectos presuponen que el comportamiento del modelo predictivo oscilatorio desarrollado (B) toma en cuenta y se adapta al comportamiento del modelo referido en la literatura [12].

Se realiza un análisis estadístico para evaluar la posible coincidencia entre las curvas de los ciclos térmicos obtenidos empleando los modelos referidos (filas A, B y C, Tabla 3).

Primeramente, se realiza un estudio comparativo entre las datas de temperatura. La prueba t de Student aplicada para comparar las medias de las muestras de temperatura refiere que no hay diferencia significativa entre las medias de las dos muestras de datos, con un nivel de confianza del 95,0 %.

La prueba F de Fisher se emplea para comparar las varianzas de los dos grupos de muestras, la cual concluye que no hay diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar de las dos muestras con un nivel de confianza del 95,0 %.

La prueba W de Mann-Whitney (Wilcoxon) para comparar medianas refiere que tampoco hay diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un 95,0 %; mientras que la prueba de Kolmogorov-Smirnov, aplicada para comparar las distribuciones de las dos muestras, específica que no hay diferencia estadísticamente significativa entre las dos distribuciones con un 95,0 %.

En el caso de la coincidencia de los tiempos fueron obtenidos similares resultados en cada una de las pruebas aplicadas. Luego, la forma de la distribución de las curvas y sus valores característicos (temperaturas y tiempos a los que se producen) manifiestan un comportamiento similar estadísticamente significativo. Este aspecto demuestra que el modelo oscilatorio predictivo de fuente de calor aplicado a la determinación de los ciclos térmicos se adapta a las condiciones no oscilatorias de modelos anteriores, como el referido por O'Farril [12]. También se demuestra que, para frecuencias eléctricas inferiores a 60 Hz el modelo mantiene las mismas respuestas que el propuesto en la literatura [12]. De esta forma, la evaluación de la frecuencia eléctrica comienza a tener influencia, por encima de los 60 Hz, aspecto que debe ser considerado en la evaluación de su efecto sobre las temperaturas máximas y tiempos a los que se producen.

3.2. Influencias de las frecuencias

Para reconocer la existencia de una posible influencia de la frecuencia eléctrica y de solidificación del ciclo de formación del cordón, se compara el modelo predictivo oscilatorio (ecuación 25 a la 31), en dos variantes (figura 18: a, Corrida 5; b, Corrida 8).

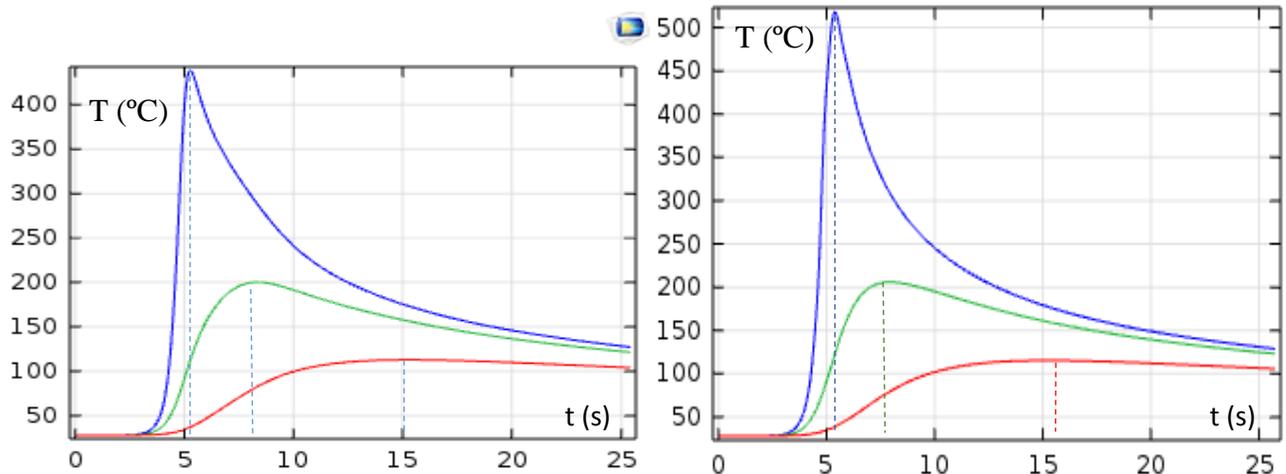


Figura 18 : Curvas de ciclos térmicos obtenidos con el modelo predictivo oscilatorio

$V_{S(min)}$, 12 V; $V_{S(máx)}$, 26 V; $V_{S(med)}$, 19 V; $I_{S(min)}$, 117 A; $I_{S(máx)}$, 123 A; $I_{S(med)}$, 120 A; η , 0,95;
 v_s , 0,96 $m \cdot min^{-1}$; a , 2,88 mm; b , 2,74 mm; cf , 2,36 mm; cr , 3,95 mm
 a) Corrida 5; b) Corrida 8

Los resultados obtenidos (tabla 4), a partir del análisis estadístico de las dos muestras independientes (Corrida 5 y 8), posibilitan evaluar si existen diferencias estadísticamente significativas.

Tabla 4: Resumen Estadístico

| | Corrida 5 | Corrida 8 | Diferencias |
|---------------------|-----------|-----------|-------------|
| Promedio | 250,5 | 279,783 | 29,283 |
| Desviación Estándar | 168,527 | 211,476 | 42,949 |
| Mínimo | 112,85 | 115,27 | 2,42 |
| Máximo | 438,45 | 518,32 | 79,87 |
| Rango | 325,6 | 403,05 | 77,45 |

Para este análisis, primeramente, se realiza un estudio comparativo entre las datas de temperatura de ambas corridas (tabla 4), para evaluar la influencia de las frecuencias eléctricas y de solidificación, que caracterizan el modelo oscilatorio predictivo de fuente de calor.

La prueba t de *Student* aplicada para comparar las medias de las muestras de temperatura refiere que no hay diferencia significativa entre las medias de las dos muestras de datos, con un nivel de confianza del 95,0 %. La prueba-F de Fisher para comparar las varianzas de las dos muestras de temperatura

concluye que no hay diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar de las dos muestras con un nivel de confianza del 95,0 %. La prueba W de Mann-Whitney para comparar las medianas de dos muestras. Esta prueba se construye combinando las dos muestras, ordenando los datos de menor a mayor, y comparando los *rankings* promedio de las dos muestras en los datos combinados. Debido a que el valor-P es mayor ó igual que 0,05, no hay diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un 95,0 %. La prueba de Kolmogorov-Smirnov para comparar las distribuciones de las dos muestras. Esta prueba se realiza calculando la distancia máxima entre las distribuciones acumuladas de las dos muestras. De particular interés es el valor-P aproximado para la prueba. Debido a que el valor-P es mayor o igual que 0,05, no hay diferencia estadísticamente significativa entre las dos distribuciones con un 95,0 %.

La aleación de aluminio 5754 tiene entre 2,60 y 3,60 % de magnesio [13]. En el diagrama de estado Al – Mg (figura 19) se puede ubicar el contenido de la aleación de aluminio 5754 en su extremo izquierdo. Según el diagrama mencionado, entre las temperaturas de 400 y 550 °C, siempre se obtendrá la fase α .

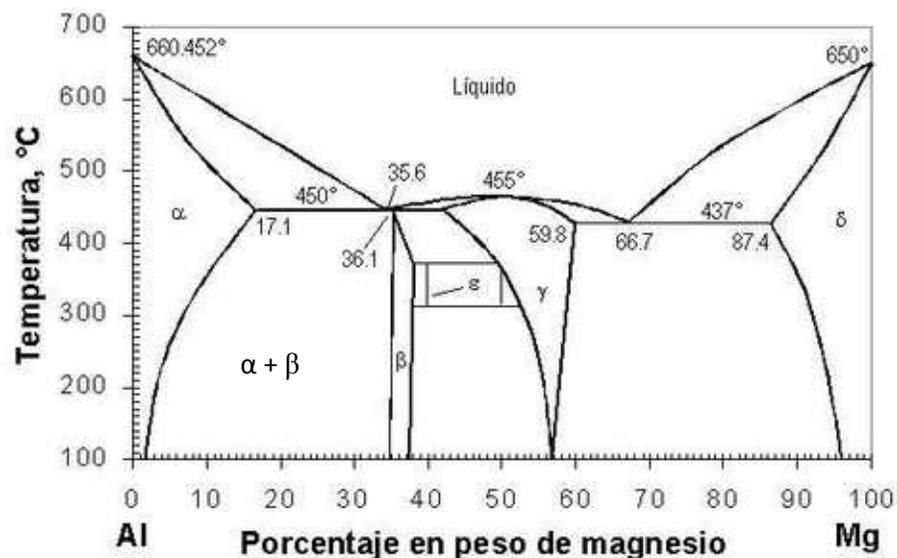


Figura 19: Diagrama de estado Aluminio - Magnesio

Específicamente para la aleación 5754, las desviaciones de las temperaturas, en el entorno de los 80 °C, para los puntos de máxima temperatura (termopares “a”), no resultan significativa para cambios estructurales. Por otra parte, en los termopares “b” y “c”, las diferencias encontradas son inferiores a 5 °C, por lo que tampoco deben obtenerse cambios estructurales significativos. Sin embargo, entre el termopar “a” y el “b”, dentro de la zona afectada térmicamente, teóricamente pudieran existir

variaciones de temperaturas entre los rangos límites descritos (5 y 80 °C). En la zona comprendida entre los termopares “a” y “b” pudieran encontrarse puntos de la zona afectada térmicamente con temperaturas máximas (entre 250 y 350 °C). En estos puntos pudieran variar las temperaturas máximas de los ciclos térmicos, alrededor de los 40 °C, como promedio, entre cada punto experimental evaluado. Esta variación de la temperatura, aparentemente no significativa, puede conducir a la transformación hacia fase alfa (Mg en Al), y en otras (figura 19), a mantenerse en la $\alpha + \beta$ (MgAl₂). Sin embargo, para una aleación de aluminio 2519-T87, obtiene su alta resistencia debido al proceso de tratamiento térmico de endurecimiento por precipitación o endurecimiento por envejecimiento. El endurecimiento por precipitación es la formación de partículas extremadamente pequeñas y uniformemente dispersas de una segunda fase dentro de la matriz de fase original, logradas por tratamiento térmico [10].

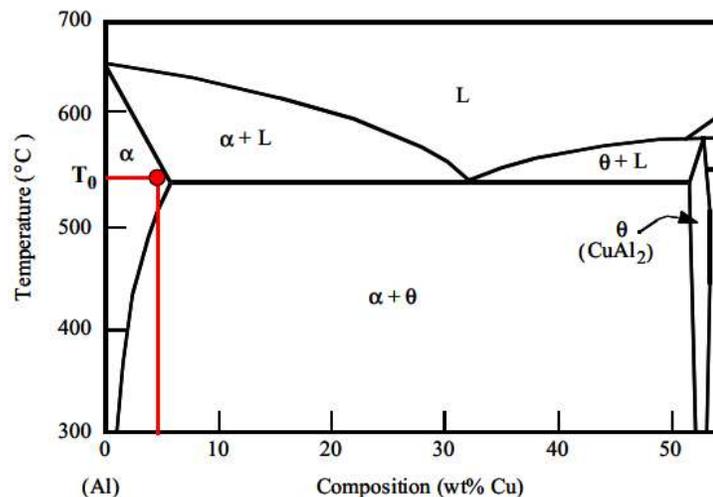


Figura 20: Diagrama de fase de la aleación 2519-T87

Fase α (Cu in Al); fase θ (CuAl₂) [10]

Al soldar esta aleación, igualmente puede producirse un cambio de fase similar al mostrado (figura 20). Luego, una pequeña variación entre las temperaturas máximas de los ciclos térmicos, producidos por el efecto de la modificación de las frecuencias, puede conducir a cambios estructurales en la aleación de aluminio y, con ello, variaciones de sus propiedades mecánicas. Los cambios de temperatura pueden modificar la volatilización de compuestos durante la soldadura [14].

El presente trabajo no aborda el tema en los aceros. Sin embargo, las complejidades físicas y las elevadas temperaturas del proceso de soldadura sobre aleaciones de Fe – C permiten suponer que este

efecto, referido anteriormente en el aluminio, también pueda producirse en la zona afectada térmicamente, durante la soldadura de los aceros.

Por ello, si se trabajara con un acero al carbono, con una diferencia de temperatura de 80 °C aproximadamente, pudiera provocar que se pasara la aleación de una zona a otra del diagrama de hierro-carbono y conducir a un cambio de fase, modificando la estructura en el punto de estudio de la zona afectada térmicamente.

Para evaluar la importancia de la variación de las frecuencias sobre los ciclos térmicos y los valores extremos de las temperaturas registradas se procederá al desarrollo de un diseño experimental.

3.1. Plan experimental

El diseño factorial parte de la definición de la complejidad del mismo, teniendo en cuenta el número de factores (k) y sus niveles (n). Además, se definen cuáles serán los factores dependientes y sus criterios de evaluación. De estudios previos deben quedar definidos los valores de los niveles base y extremos para cada factor, así como el rango de variación [15].

La ecuación de complejidad ($N = 2^k$) se aplica para determinar cuántas corridas experimentales (N) se necesitan. Considerando que las variaciones propuestas (ecuaciones de la 25 a la 31) dependen de las frecuencias de eléctricas (f_d) y de solidificación (f_s) y el coeficiente de rizado geométrico (E), estos son considerados como los factores (k) independientes del modelo (X_1 , X_2 y X_3 , respectivamente); aplicados en dos niveles ($n = 2$), máximo (+) y mínimo (-).

Una vez tipificadas las variables se construye la matriz experimental ($N = 8$ experimentos). Mediante la misma se le asignan los diferentes valores, que asumirán los factores (X_1 , X_2 y X_3) en cada corrida experimental (tabla 5).

Tabla 5: Tipificación de valores y de sus respectivos niveles en el diseño factorial 2^3

| Experimento | Corridas | X_1 | X_2 | X_3 | E | f_s | f_d |
|-------------|----------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|
| 2^3 | 1 | + | + | + | 0,5 | 20 | 120 |
| | 2 | + | + | - | 0,5 | 20 | 60 |
| | 3 | + | - | + | 0,5 | 0 | 120 |
| | 4 | + | - | - | 0,5 | 0 | 60 |
| | 5 | - | + | + | 0 | 20 | 120 |
| | 6 | - | + | - | 0 | 20 | 60 |
| | 7 | - | - | + | 0 | 0 | 120 |
| | 8 | - | - | - | 0 | 0 | 60 |

El ciclo térmico está caracterizado por la consecución de los valores de temperatura y tiempos, en los momentos de calentamiento y enfriamiento. Resultan de interés los valores máximos de temperatura alcanzados durante el ciclo térmico en cada punto de prueba; así mismo, los tiempos en los cuales estos se registran. La comparación de los valores máximos de temperatura en cada ciclo térmico, para cada punto de prueba, en cada punto experimental (para cada combinación de frecuencias de corriente, solidificación y, el coeficiente de rizado) permitiría evaluar su influencia en el comportamiento del ciclo térmico y el efecto de estos factores dependientes en las características del ciclo térmico de la unión soldada con el proceso CMT. Por ello, constituyen factores dependientes los siguientes: a) los valores máximos de temperatura en cada ciclo térmico; b) los tiempos en los cuales se registran los valores máximos de temperatura en cada ciclo térmico.

3.2. Resultados de la simulación en *COMSOL Multiphysic*

Para la introducción de los datos de la simulación se empleó el modelo generado en COMSOL, descrito en el epígrafe 2,5. En este modelo fueron cambiados, para cada punto, los valores de las frecuencias eléctricas, de solidificación y el coeficiente de rizado, según el plan experimental trazado (tabla 5).

Como parte de los resultados de la simulación se obtiene el comportamiento de la temperatura en el transcurso del tiempo (figura 19), registrados en cada punto de prueba.

Se manifiesta de manera similar el comportamiento de los ciclos térmicos (figura 21), en cada punto experimental (tabla 5). Véase (figura 21). Si se varía la frecuencia eléctrica en los valores extremos, los valores máximos de temperatura oscilan ligeramente por encima de los 500 °C, manteniendo un valor prácticamente estable.

Similar comportamiento tienen los tiempos de ocurrencia de los máximos para cada punto de prueba. Por otra parte, al combinarse las frecuencias eléctricas y de solidificación producen cambios sobre las temperaturas máximas de los ciclos térmicos, ya que para los valores mínimos de los factores independientes, considerados en el diseño experimental (tabla 5), las temperaturas alcanzan los 500 °C (figura 21) mientras que, para los valores máximos de los factores independientes, la temperatura sufre un decrecimiento de aproximadamente 80 °C.

Si se comparan los valores de los tiempos de ocurrencia de las temperaturas máximas, y los valores respectivos de temperatura máxima, para cada punto de prueba, en cada experimento realizando, se aprecia que no existe una dependencia directa.

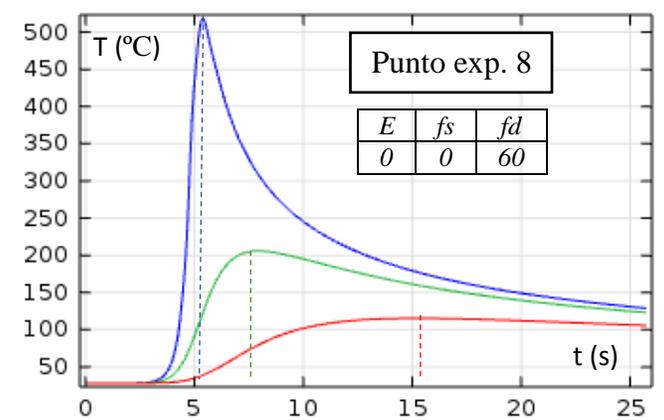
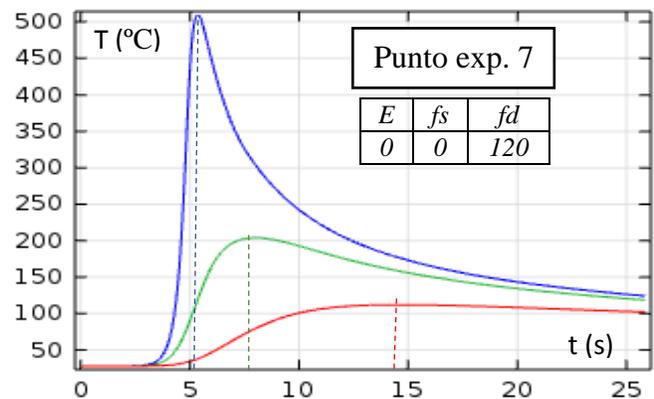
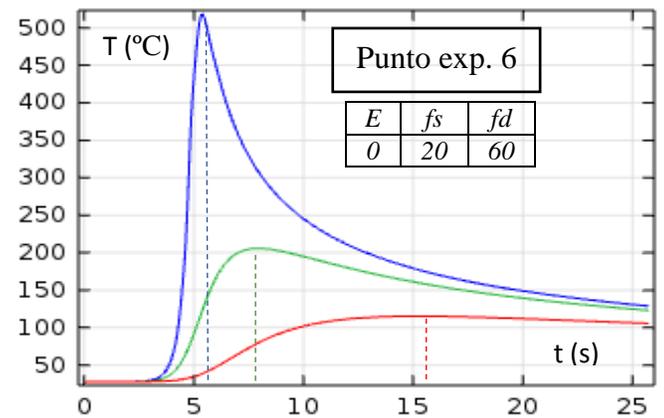
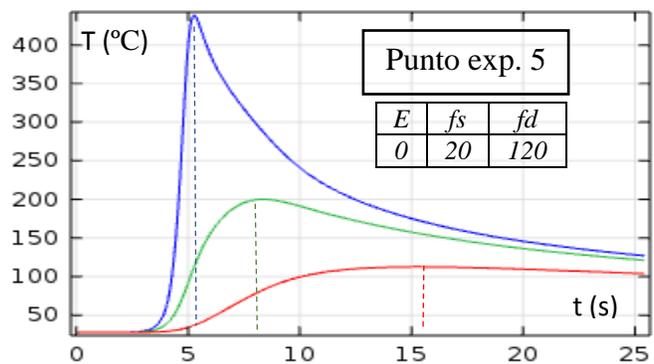
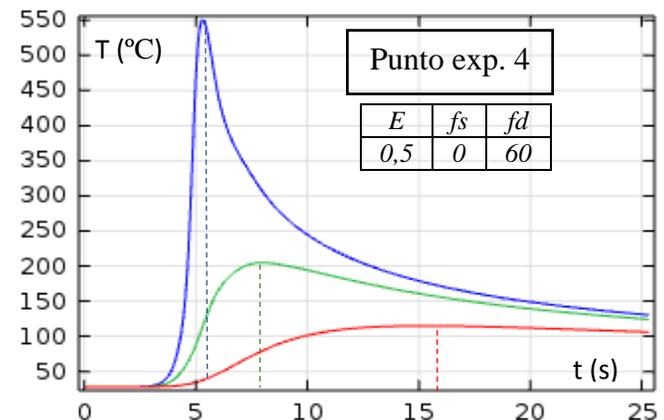
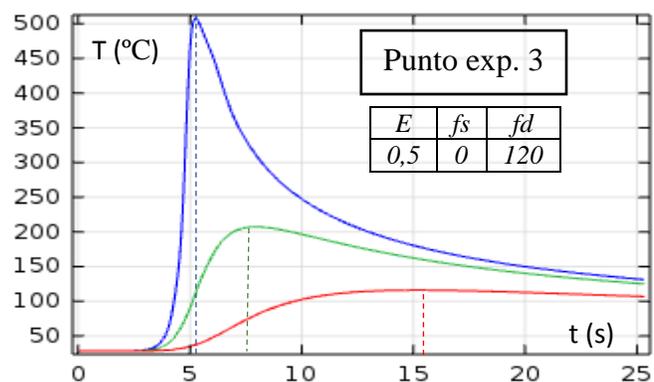
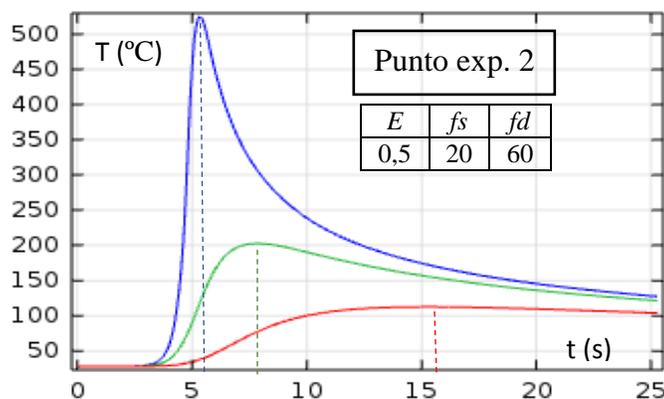
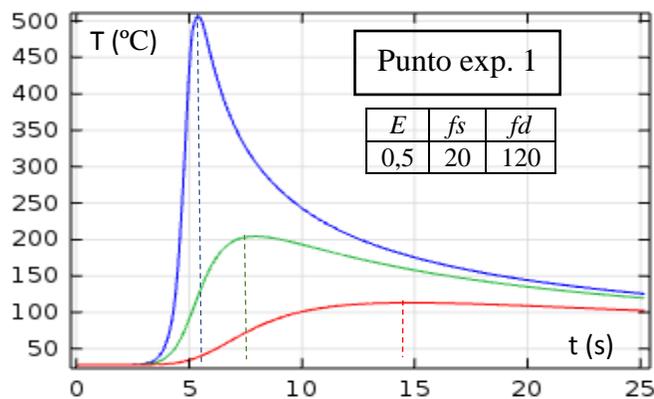


Figura 21: Curvas de ciclos térmicos obtenidos con el modelo predictivo oscilatorio
 $V_{S(min)}$, 12 V; $V_{S(máx)}$, 26 V; $V_{S(med)}$, 19 V; $I_{S(mín)}$, 117 A; $I_{S(máx)}$, 123 A; $I_{S(med)}$, 120 A; η , 0,95;
 v_s , 0,96 $m \cdot min^{-1}$; a , 2,88 mm; b , 2,74 mm; cf , 2,36 mm; cr , 3,95 mm

Por ejemplo, si se varía la frecuencia eléctrica los tiempos se mantienen casi constantes, mientras que la disminución de las temperaturas no es casi notable. Cuando se combinan las frecuencias eléctricas y de solidificación para el punto de prueba “a” se aprecia una diferencia de temperatura de 80 °C se alcanza en 0,1 s, en el punto de prueba “b” una diferencia de 6 °C se alcanza en 0,4 s y el punto de prueba “c” 2 °C en 0,2 s; respectivamente. Estos resultados expresan que el comportamiento de los tiempos no es correspondiente a la variación de las temperaturas máximas en cada punto de prueba, además las diferencias de temperaturas son más notables en el punto de prueba “a”, más próximo a la zona afectada térmicamente. Al analizar la influencia de los factores independientes (frecuencia eléctrica, frecuencia de solidificación y coeficiente de rizado) las diferencias de tiempo para alcanzar los diferentes máximos de temperatura se encuentran en el mismo orden (0,4 s). Ello sugiere que no existe relación entre la variación de los tiempos y las temperaturas máximas.

3.3. Análisis de los resultados

Datos más precisos a los mostrados (figura 21) pueden mostrarse en forma de tabla, como resultado de la simulación los pares de valores característicos del comportamiento para cada valor de temperatura y sus respectivos tiempos de ocurrencia. De ellos, resultan importante destacar los pares de datos asociados a los valores de temperaturas máximas y sus respectivos tiempos de ocurrencia, para cada punto experimental (tabla 6).

Tabla 6: Temperaturas máximas y tiempos de ocurrencia para puntos de prueba. Resultados

| Corrida | Coef Rizado | Frec solidific (Hz) | Frec Eléctrica (Hz) | Temperatura máxima (°C) | | | Tiempo de alcance (s) | | |
|---------|-------------|---------------------|---------------------|-------------------------|--------|--------|-----------------------|------|-------|
| | | | | a | b | c | a | b | c |
| 1 | 0,5 | 20 | 120 | 506,12 | 204,32 | 113,27 | 5,41 | 7,93 | 14,67 |
| 2 | 0,5 | 20 | 60 | 524,90 | 202,56 | 112,63 | 5,35 | 7,79 | 15,08 |
| 3 | 0,5 | 0 | 120 | 508,07 | 207,28 | 115,80 | 5,25 | 7,94 | 15,01 |
| 4 | 0,5 | 0 | 60 | 550,75 | 204,81 | 114,95 | 5,31 | 7,95 | 15,13 |
| 5 | 0 | 20 | 120 | 438,45 | 200,20 | 112,85 | 5,27 | 8,33 | 15,24 |
| 6 | 0 | 20 | 60 | 518,32 | 205,76 | 115,27 | 5,40 | 7,91 | 15,05 |
| 7 | 0 | 0 | 120 | 509,44 | 204,03 | 112,16 | 5,37 | 8,02 | 14,54 |
| 8 | 0 | 0 | 60 | 518,32 | 205,76 | 115,27 | 5,40 | 7,91 | 15,05 |

Al analizar el efecto individual de la frecuencia eléctrica en la corrida 7 y 8, del diseño experimental (tabla 6), se puede apreciar que en el punto de prueba “a”, existe una relación inversamente proporcional entre la frecuencia eléctrica, las temperaturas máximas y el tiempo en que se alcanzan, mientras que para los puntos “b” y “c” aparentemente no se aprecian variaciones significativas.

Cuando se emplean los valores extremos de las frecuencias eléctricas y de solidificación (puntos experimentales 5 y 8, tabla 6) se aprecia una aparente variación en el valor máximo de temperatura alcanzado en el punto de prueba “a”, pudiéndose apreciar diferencias de 80 °C que representan un 15 %, mientras que para los puntos de prueba “b” y “c” las diferencias no son notables con 6 °C, y 2 °C (1 % y 0,4 %), respectivamente.

Más precisiones al respecto solo son posibles a partir del análisis de los resultados del diseño experimental.

Para probar la significancia estadística de los efectos que produce la variación de los factores independientes (coeficiente de rizado, frecuencia eléctrica y de solidificación) en los resultados de las temperaturas máximas, así como los tiempos en que se alcanzan en cada punto de prueba se procede a un tratamiento estadístico.

El análisis estadístico realizado arroja que la variabilidad entre las temperaturas (T_{max_a} , T_{max_b} , T_{max_c}), así como entre los tiempos (t_a , t_b , t_c) de ocurrencia de sus máximos en los puntos de prueba (“a”, “b”, “c”), tienen una relación significativamente estadística, con un nivel de confianza del 95,0 %. Sin embargo, al consultarse las gráficas de los efectos principales (anexo, figura 4), puede apreciarse que el efecto causado por cada factor independiente se comporta de manera diferente sobre las temperaturas en cada punto de prueba. Las mayores temperaturas se alcanzan con la variación del coeficiente de rizado, con una dependencia directamente proporcional. Al analizar la frecuencia eléctrica y de solidificación, se puede apreciar (anexo, figura 4) que su efecto sobre las temperaturas es inversamente proporcional; ello confirma, que un aumento de alguna de las frecuencias provocaría un decrecimiento en la temperatura.

Por otra parte, el efecto de los factores independientes (coeficiente de rizado, frecuencia eléctrica y de solidificación) sobre los tiempos a los cuales se obtienen los valores máximos de temperatura no presenta una relación estadísticamente significativa con más de un 95 % de confianza.

El comportamiento experimental, expresado a partir de ecuaciones de regresión, muestra el efecto de cada factor independiente (frecuencias y coeficiente de rizado) sobre las temperaturas máximas (tabla 7) y el tiempo en el cual las alcanzan (tabla 8).

Tabla 7: Ecuaciones de regresión. Comportamiento de las temperaturas máximas

| Ecuaciones de regresión | R ² (%) |
|--|--------------------|
| $Tmax_a = 562,78 + 9,875 \cdot E - 0,01 \cdot fd + 0,54 \cdot fs + 2,16 \cdot E \cdot fd - 0,45 \cdot E \cdot fs - 0,02 \cdot fd \cdot fs$ | 84,27 |
| $Tmax_b = 208,66 + 14,98 \cdot E - 0,07 \cdot fd - 0,04 \cdot fs + 0,07 \cdot E \cdot fd - 0,19 \cdot E \cdot fs - 0,002 \cdot fd \cdot fs$ | 96,35 |
| $Tmax_c = 118,04 - 7,21 \cdot E - 0,001 \cdot fd - 0,05 \cdot fs + 0,28 \cdot E \cdot fd - 0,12 \cdot E \cdot fs - 0,0002 \cdot fd \cdot fs$ | 99,30 |

$Tmax_{(a)}$ Temperatura máxima alcanzada en el punto de prueba “a”

$Tmax_{(b)}$ Temperatura máxima alcanzada en el punto de prueba “b”

$Tmax_{(c)}$ Temperatura máxima alcanzada en el punto de prueba “c”

$t_{(a)}$ Tiempo en que se alcanza la temperatura máxima en el punto de prueba “a”

$t_{(b)}$ Tiempo en que se alcanza la temperatura máxima en el punto de prueba “b”

$t_{(c)}$ Tiempo en que se alcanza la temperatura máxima en el punto de prueba “c”

E Coeficiente de rizado

fd Frecuencia eléctrica

fs Frecuencia de solidificación

Tabla 8: Ecuaciones de regresión. Comportamiento de los tiempos para las temperaturas máximas

| Ecuaciones de regresión | R ² (%) |
|--|--------------------|
| $ta = 5,51 + 0,45 \cdot E - 0,003 \cdot fd + 0,001 \cdot fs + 0,02 \cdot E \cdot fd - 0,003 \cdot E \cdot fs - 0,0 \cdot fd \cdot fs$ | 77,4254 |
| $tb = 7,74 - 0,56 \cdot E + 0,01 \cdot fd - 0,003 \cdot fs + 0,02 \cdot E \cdot fd + 0,01 \cdot E \cdot fs - 0,0 \cdot fd \cdot fs$ | 98,1667 |
| $tc = 15,19 + 0,87 \cdot E + 0,002 \cdot fd + 0,004 \cdot fs - 0,05 \cdot E \cdot fd - 0,004 \cdot E \cdot fs + 0,0 \cdot fd \cdot fs$ | 69,3633 |

El comportamiento de las temperaturas, así como de los tiempos en que ocurren sus máximos para cada punto de prueba, es descrito por las ecuaciones de regresión para las temperaturas máximas (tabla 7) y para los tiempos de ocurrencia (tabla 8). Estas ecuaciones constituyen modelos, que describen los respectivos fenómenos físicos (variación de temperaturas máximas y tiempos de ocurrencia), cuyo indicador fundamental de ajuste es el estadígrafo R-cuadrado (R²). Según este estadígrafo, el ajuste de los modelos, que describen el comportamiento de las temperaturas máximas, es mucho mejor (tabla 7) que los modelos que describen el comportamiento de la variación de los tiempos de ocurrencia de las temperaturas máximas (tabla 8). Ello reafirma, que la variabilidad de los máximos de temperaturas alcanzados sí depende de los factores independientes (coeficiente de rizado, frecuencia eléctrica y de solidificación). Ello se debe a que el crecimiento de estas variables incrementa los valores de energía aportada. Este comportamiento puede estar relacionado con la inercia térmica del arco [16]. Sin embargo, sobre los tiempos no se aprecia una influencia estadísticamente significativa, reafirmado por el relativo bajo ajuste del modelo obtenido (Tabla 8).

3.4. Conclusiones parciales

1. El modelo doble elipsoidal, oscilatorio y predictivo de fuente de calor desarrollado, muestra los mismos resultados que los referidos en la literatura, al considerar el comportamiento invariante de sus parámetros constituyentes, quedando validado para el estudio de procesos térmicos en uniones soldadas.
2. Si varían las frecuencias eléctricas y de solidificación, que caracterizan el modelo oscilatorio predictivo de fuente de calor, se alcanza una diferencia de temperatura máxima de 80 °C entre los valores máximos de las temperaturas, obtenidas en cada punto de prueba del caso de estudio, lo cual pudiera suponerse que es notable.
3. El diseño factorial ($N=2^k$), aplicado en dos niveles ($n = 2$), evidencia la dependencia significativamente estadística entre las variación conjunta de las frecuencias de eléctricas (f_d) y de solidificación (f_s) y el coeficiente de rizado geométrico (E) respecto a los valores máximos de temperatura en cada ciclo térmico, no así respecto a los tiempos en los cuales se registran los valores máximos de temperatura en cada ciclo térmico.
4. Las mayores temperaturas se alcanzan con la variación del coeficiente de rizado, como resultando de una dependencia directamente proporcional entre ambos.

Conclusiones

1. La función sinusoidal de aporte energético $FQ_{(t)} = (Q_{m\acute{a}x} - Q_{m\acute{i}n}) / 2 \cdot [\sin (fd \cdot \pi \cdot t) + 1] + Q_{m\acute{i}n}$ se ajusta a un ciclo ideal sinusoidal de energía aportada, dependiente de la frecuencia (fd) del proceso eléctrico.
2. La función sinusoidal modular $Fa_{(t)} = (a_{m\acute{a}x} - a_{m\acute{i}n}) \cdot |\sin (fs \cdot \pi \cdot t)| + a_{m\acute{i}n}$ describe el comportamiento de la variación positiva del semiancho (a) del cordón de soldadura, con frecuencia (fs), máximos ($a_{m\acute{a}x}$) y mínimos ($a_{m\acute{i}n}$), coincidentes con el comportamiento esperado en los ciclos del proceso de solidificación del metal en las uniones soldadas con el proceso CMT. Esta ecuación es válida para el resto de los parámetros geométricos del cordón de soldadura, tales como la profundidad de penetración (b) y las distancias frontales (c_f) y trasera (c_r) de la poza de fusión.
3. Para la evaluación de las oscilaciones térmicas debe emplearse la frecuencia eléctrica (60 Hz), mientras que, para las dimensionales del cordón de soldadura, debe emplearse la frecuencia térmica de solidificación (≈ 20 Hz), que depende de la velocidad de soldadura y de las correcciones de longitud de arco y de pulso de corriente empleadas en el proceso CMT. La diferencia entre los valores de frecuencia de ocurrencia de estos fenómenos es común para todos los procesos de soldadura por arco, con o sin aporte metálico.
4. La frecuencia eléctrica comienza a tener efecto en el ciclo térmico por encima de los 60 Hz, aspecto que influye sobre las temperaturas máximas y tiempos a los que se producen, fundamentalmente cuando se combina con la frecuencia de solidificación.
5. La variación entre las temperaturas máximas de los ciclos térmicos, producidos por el efecto de la modificación de las frecuencias, no conduce a cambios estructurales en la aleación de aluminio 5754; sin embargo, sí pudiera suceder en las aleaciones de acero, con posibles cambios de sus propiedades mecánicas.

Recomendaciones

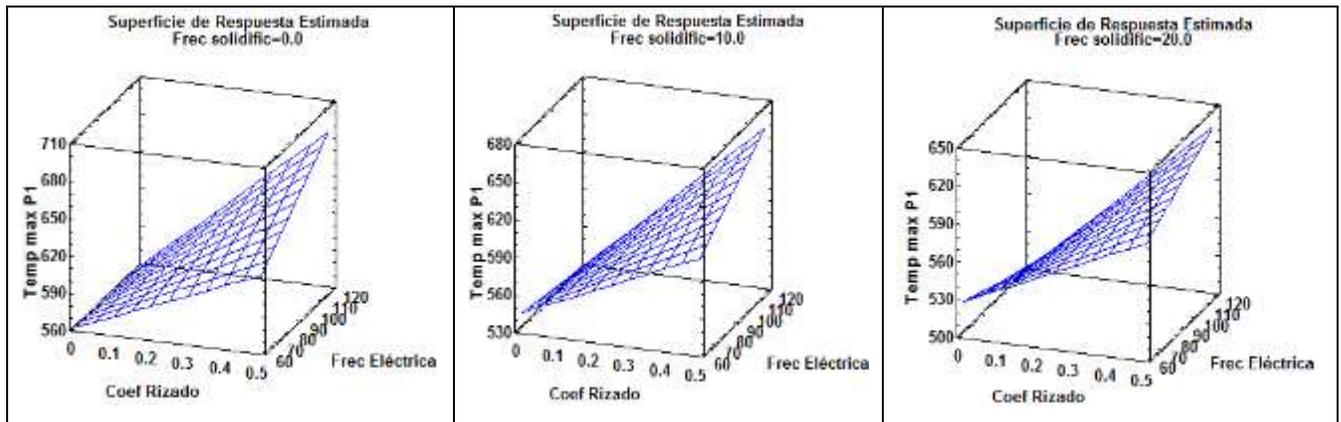
Estudiar el efecto de la variación de las frecuencias de corriente y solidificación durante la aplicación del modelo predictivo de fuente de calor oscilatoria sobre las temperaturas máximas de los ciclos térmicos en las aleaciones de acero, soldadas con CMT, tal que permita evaluar la posible ocurrencia de cambios estructurales.

Referencias

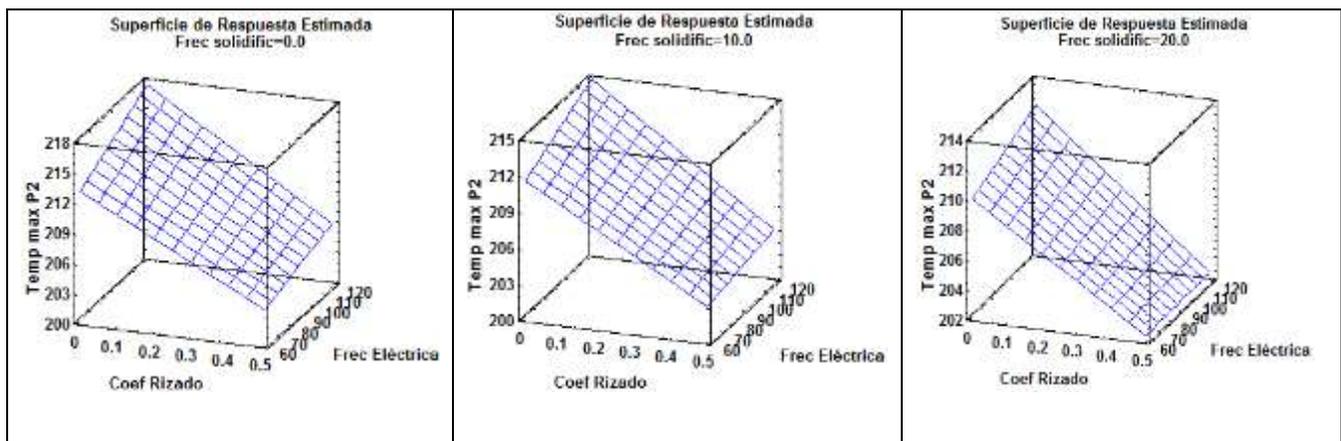
1. Chen, M., D. Zhang, and C. Wu, *Current waveform effects on CMT welding of mild steel. Journal of Materials Processing Technology*, 2017. 243: p. 10.
2. Fronius CMT: Cold Metal Transfer. 2010. 16.
3. Feng, J.Z., H; He, P. , *The CMT short-circuiting metal transfer process and its use in thin aluminium sheets welding. Materials and design*, 2009. 30(5): p. 1850-1852.
4. Azar, A.S., *A heat source model for cold metal transfer (CMT) welding. Therm Anal Calorim*, 2015: p. 6.
5. Goldak, J., Chakravarti, A.; Bibby, M *A new finite element model for welding heat sources. Metallurgical transactions*, 1984. 15B.
6. Zapico, E.P., et al., *An improved model for cold metal transfer welding of aluminium alloys. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2017: p. 1-7.
7. SCHEMPP, P., CROSS, C. E.; PITTNER, A.; RETHMEIER, M. , *Solidification of GTA Aluminum Weld Metal: Part 2 — Thermal Conditions and Model for Columnar-to-Equiaxed Transition. Welding Journal*, 2014. 93: p. 69-s.
8. de-Freitas-Teixeira, P.-R., de-Araújo; Douglas-Bezerra; Bragança-da-Cunha, Luiz-Antônio *Study of the gaussian distribution heat source mode l applied to numerical thermal simulations of tig welding processes Science & Engineering Journal*, 2014 23(1): p. 115 - 122.
9. Pozo-Morejón, J.A., Quintero-Acosta, P. E., Cruz-Crespo, A., y Díaz-Cedré, E. , *Análisis térmico de soldadura GTAW sobre placa de acero AISI 316L empleando el método de elementos finitos. Soldagem insp. , 2011. Vol.16(No. 3): p. 256-264.*
10. Francis, J.D., *Welding Simulations of Aluminum Alloy Joints by Finite Element Analysis, in Aerospace Engineering. 2002, Virginia Polytechnic Institute and State University: Blacksburg, Virginia. p. 241.*
11. Escalante, R.M., *Consideraciones sobre modelos empleados para la simulación de ciclos térmicos en uniones soldadas, P.I.M. II, Editor. 2017, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas: Santa Clara. p. 23.*
12. OFarrill, J., *Modelo predictivo de fuente de calor aplicado a la simulación de campos térmicos en uniones soldadas. 2017, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas p. 50.*

13. AALCO. *Aluminium Alloy - Commercial Alloy - 5754 - H22 Sheet and Plate*. 2016 [cited 2018 09/04]; Available from: http://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy-5754-H22-Sheet-and-Plate_153.ashx.
14. Cao, J., Sun, H.; Chen, J. H.; Wang, Peichung, *Weldability of CMT Joining of AA6061-T6 to Boron Steels with Various Coatings*. *Welding Journal*, 2014. 93(6): p. 193s–204s.
15. Gómez-Pérez, C., et al., *Diseño Experimental aplicado a Investigaciones en Soldadura y Metalurgia*. *Apuntes, in Apuntes*. 2017: Santa Clara. p. 138 pp.
16. Wang, L.L., Lu, F. G.; Cui, H. C.; Tang, X. H. , *Investigation on thermal inertia of GMAW-P welding on Al alloy*. *Science and Technology of Welding & Joining* /; (.), 2015. 20(2): p. 106-114.

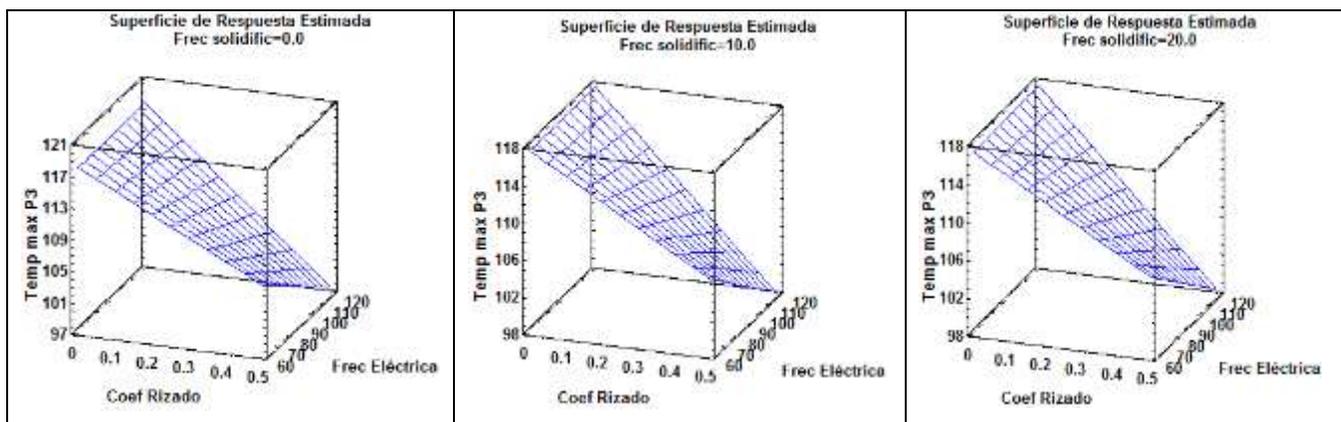
Anexos Estadística



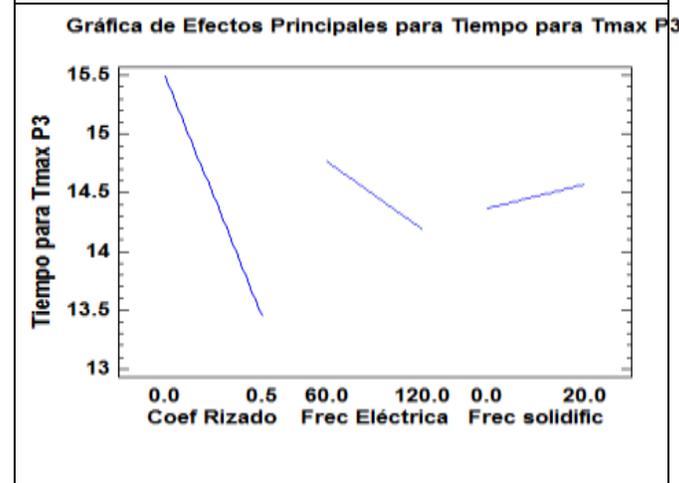
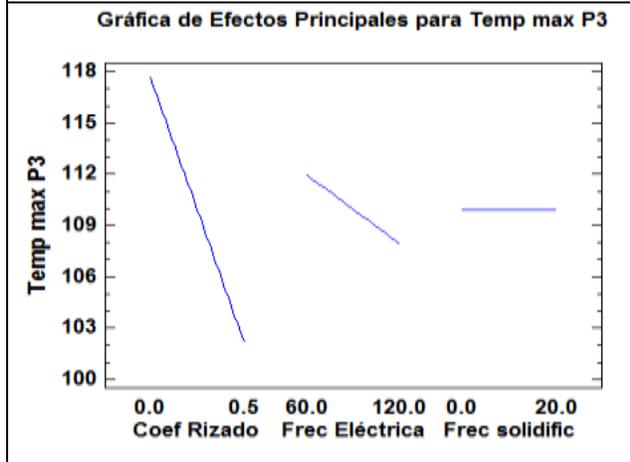
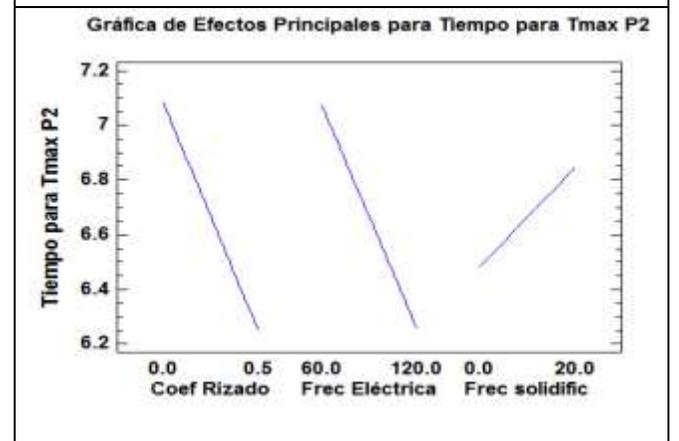
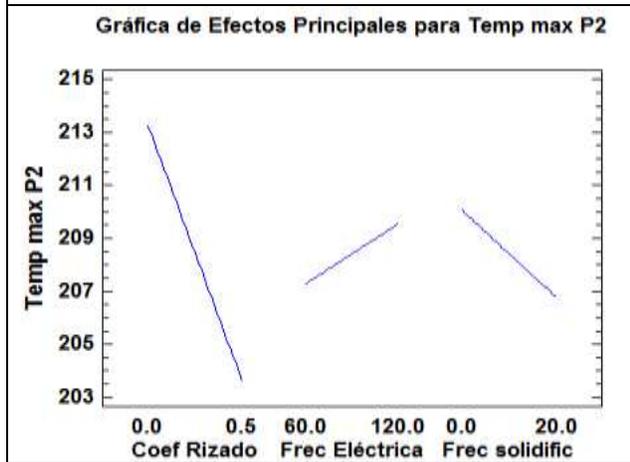
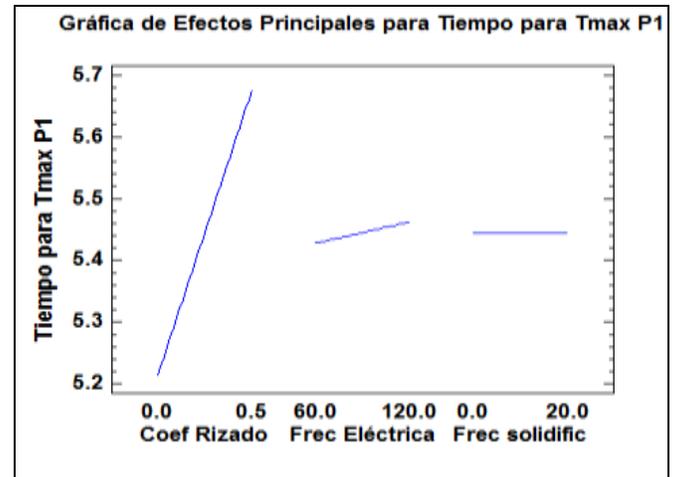
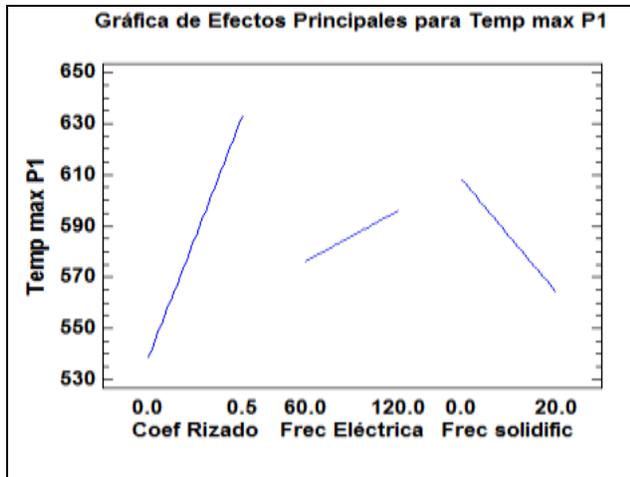
Anexos Figura 1. Valores de T_{max_a} generados usando el modelo ajustado



Anexos Figura 2. Valores de T_{max_b} generados usando el modelo ajustado



Anexos Figura 3. Valores de T_{max_c} generados usando el modelo ajustado



Anexos Figura 4. Efectos principales para la temperatura

Anexos Figura 5. Efectos principales para el tiempo