

OPTIMIZACIÓN DEL MODELADO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS PARA EL CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN DE PIEZAS DE ACERO

N. Di Luozzo (1), M. Fontana (1) y B. Arcondo (1)

(1) Laboratorio de Sólidos Amorfos, INTECIN, Facultad de Ingeniería, UBA, CONICET, ARGENTINA

E-mail: ndiluozzo@fi.uba.ar

RESUMEN

Distintos métodos para la simulación del calentamiento por inducción han sido desarrollados y estudiados. Entre ellos se destaca el Método de los Elementos Finitos que es capaz de resolver en forma acoplada: El campo electromagnético generado por corrientes alternas, el calentamiento por efecto Joule debido a las corrientes inducidas y la transferencia del calor generado.

Para realizar una satisfactoria simulación del proceso, resulta fundamental la correcta a caracterización de todas las propiedades del material a calentar desde la temperatura ambiente hasta la temperatura objetivo, que en nuestro caso son tubos de acero al carbono con una temperatura final de 1250 °C.

A menos que se realicen mediciones “ad hoc” del acero a calentar, es de suma dificultad modelar las propiedades electromagnéticas y térmicas de manera que sean representativas del proceso, en particular la magnetización de saturación y el calor específico en función de la temperatura.

Como la incorrecta modelación de las propiedades físicas puede llevar a resultados erróneos, el objetivo del siguiente trabajo es la revisión de los distintos modelos y resultados experimentales, tanto de la magnetización de saturación como del calor específico en función de la temperatura, para la posterior selección del más apropiado para la simulación del proceso.

En el caso de la magnetización de saturación, en lo que respecta a resultados experimentales, se dispone de mediciones para hierro puro y para un reducido grupo de aceros de composición específica, pero no para la muestra en estudio: acero AISI 1025. Los modelos propuestos (Brillouin, Kalus et al, etc.) tienen un parámetro adimensional, que es la temperatura reducida. En este trabajo se analiza la influencia de los distintos modelos en las simulaciones.

Respecto al calor específico, los parámetros significativos son: la entalpía y la temperatura de la transformación ferrita-austenita, así como el ancho del pico. En este trabajo se observa que este último parámetro afecta significativamente la simulación, y en el caso del acero en estudio no está correctamente medido. Además en la bibliografía se encuentra que en aceros de contenido de C ultrabajo el ancho del pico y su posición depende de la velocidad a la que se realiza la medición. También se observa que, para el hierro puro, aleaciones Fe-Mn y aceros de baja aleación, la transformación de ferrita-austenita se encuentra muy próxima a la transformación de ferrita ferromagnética-ferrita paramagnética.

Tópico 2: Materiales Metálicos

Palabras clave: Calentamiento por inducción, aceros, Método de elementos finitos.

1. INTRODUCCIÓN

El modelado del calentamiento por inducción de piezas metálicas es una valiosa herramienta para el estudio, optimización y desarrollo de dicho proceso, teniendo en cuenta su uso extensivo. Este se caracteriza por tener que ser abordado como un problema electromagnético y térmico simultáneamente, es decir, un problema acoplado: el campo electromagnético generado por la corriente de alta frecuencia que circula por el inductor produce corrientes inducidas en la pieza metálica, que a su vez generan calor por efecto Joule, y la transferencia del mismo. El Método de los Elementos Finitos ha sido extensamente utilizado para modelar el calentamiento por efecto Joule en máquinas eléctricas –núcleo de transformadores, estatores y rotores de motores y generadores – y en circuitos electrónicos. Su estudio para el calentamiento masivo de piezas metálicas a alta temperatura ha sido menos divulgado [1-5].

En este trabajo se pretende modelar el calentamiento por inducción de tubos de acero de bajo carbono, siendo sus propiedades físicas la principal fuente de controversia. Como la incorrecta modelación de las propiedades físicas de los

materiales utilizados, en nuestro caso el acero, puede llevar a resultados erróneos, el objetivo del siguiente trabajo es la revisión de los distintos modelos, para la posterior selección del más apropiado para la simulación del proceso, utilizando el Método de Elementos Finitos, y aplicarlo en un caso experimental de calentamiento por inducción de tubos de acero.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Tubos de acero EN 10297 E235 – de composición química indicada en la Tabla 1, sin costura, de diámetro externo de 73 mm y un espesor de 10 mm, fueron calentados hasta una temperatura de 1250 °C, utilizando un horno de inducción en paralelo, con una potencia de 12 kW, y una frecuencia de resonancia de 20 kHz. La dependencia temporal de la temperatura en la superficie del tubo fue medida empleando un pirómetro óptico.

Tabla 1. Composición Química - % en masa.

C	Mn	Si	S	P
0.12	1.09	0.24	0.0012	0.015

3. MODELO Y SIMULACIÓN

El método de elementos finitos ha sido empleado para resolver el modelo bidimensional – axisimétrico - de calentamiento por inducción de tubos. Para la resolución del problema fue utilizado el software libre Elmer de análisis multifísico por elementos finitos.

Los elementos geométricos del modelo, que se pueden ver en la Figura 1, son: el tubo de acero, caracterizado por su diámetro exterior, su espesor y sus propiedades físicas (que dependen de su composición química) y el inductor, que se considera como un conductor sólido, pero en el que no se generan corrientes inducidas ni calentamiento por efecto Joule, de 4 espiras, por las que circula la corriente alterna de frecuencia f y de amplitud I_0 .

Debido a la simetría respecto de la semilongitud del tubo y el inductor, sólo se modela la mitad del conjunto.

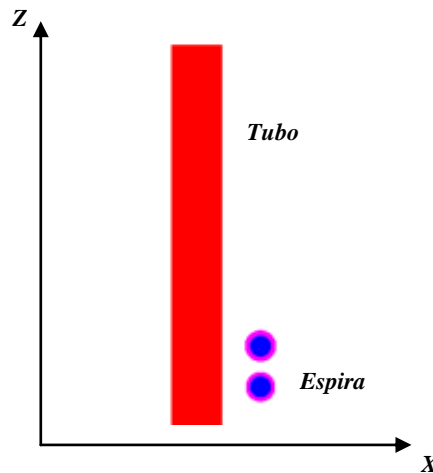


Figura 1. Esquema geométrico 2D.

Las principales propiedades físicas del acero dependen de la composición química del mismo, y son:

- Resistividad eléctrica - que es función de la temperatura [6].
- Conductividad térmica - que también es función de la temperatura [6].
- Capacidad calorífica C_p - En la Figura 2 se muestra la dependencia con la temperatura de C_p para diferentes aceros de composiciones similares a las empleadas, a excepción del contenido de Carbono. En esta figura puede verse una transformación de primer orden, a una temperatura T_1 en el rango 730-760 °C, que es debida a la transición austenítica. Los parámetros de este pico son: T_1 , el ancho del pico σ y el área del mismo (entalpía

de transformación). El ancho del pico de transformación σ es un parámetro que aun no se ha determinado correctamente para los aceros de composiciones similares al usado en este trabajo, y puede llevar a resultados erróneos.

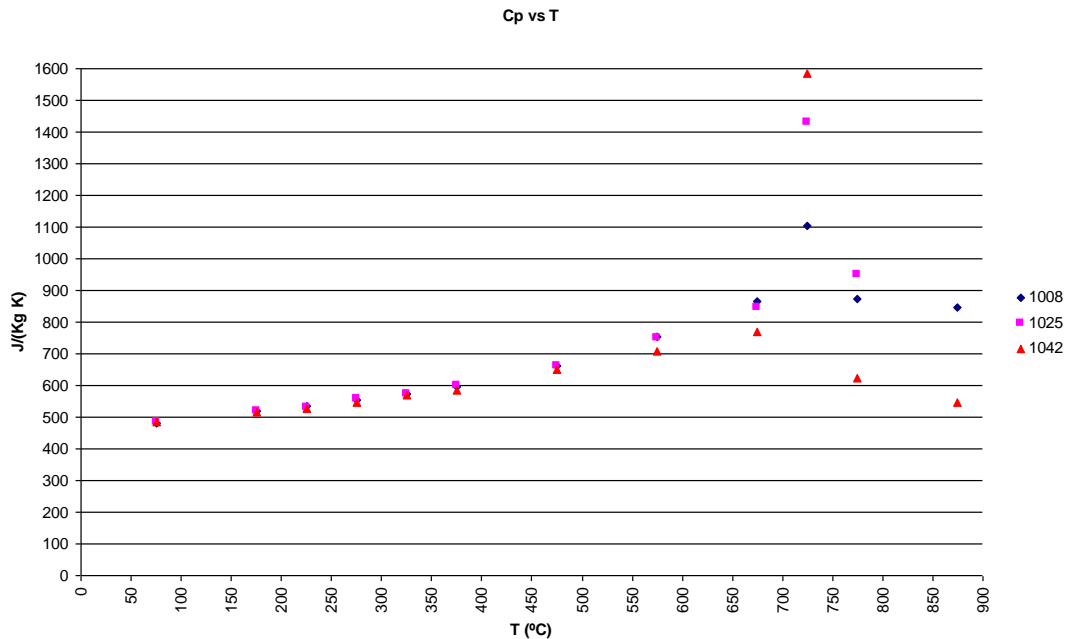


Figura 2. Dependencia de la capacidad calorífica con la temperatura para tres diferentes aceros AISI 1008, 1025 y 1042 [6].

- Propiedades magnéticas: Un parámetro importante es la temperatura de transición ferro-paramagnética denominada temperatura de Curie: T_c , de 760 °C [7]. Así mismo, para temperaturas menores a T_c , cuando el acero presenta propiedades ferromagnéticas, la dependencia del vector magnetización M con el campo externo aplicado H es otra de las propiedades fundamentales. La permeabilidad relativa inicial μ_r se define de la siguiente manera:

$$\mu_r(T) = 1 + \mu_{r\text{inicial}} - 1 \cdot \frac{M_S}{M_{S0K}}$$

La dependencia con la temperatura de la magnetización de saturación M_s fue modelada usando dos modelos diferentes:

- Función mecánico cuántica de Brillouin J [8] - Se considera el caso en particular en el que el momento magnético esta dado enteramente por el spin, es decir, para $J = 1/2$:

$$\frac{M_S}{M_{S0K}} = \tanh \frac{\frac{M_S}{T}}{\frac{M_{S0K}}{T_C}}$$

- Modelo de Kalus et al [9] - Se define mediante la siguiente expresión:

$$\frac{M_S}{M_{S0K}} = 1 - \left(\frac{T}{T_C} \right)^6$$

En la Figura 3 puede verse la dependencia de M_s con la temperatura dadas por ambos modelos.

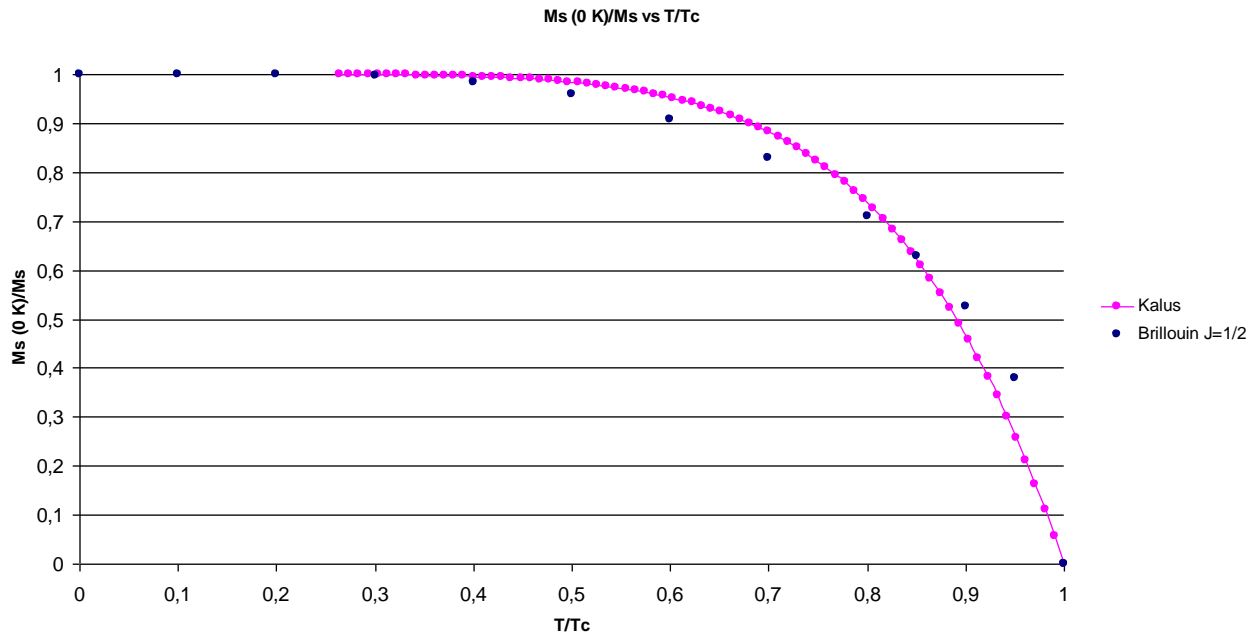


Figura 3. Dependencia de la magnetización de saturación (normalizada a 0 K) con la temperatura reducida para los modelos de Brillouin y de Kalus.

Asimismo se asume las pérdidas de calor del tubo de acero están dadas por dos mecanismos: radiación y convección en el aire que rodea al mismo. Se considera que el tubo se comporta como un cuerpo gris perfecto, con una emisividad de 0.85 [7], mientras que el coeficiente de convección se asume independiente de la temperatura, con un valor de 20 W/m² °C.

4. RESULTADOS

a) Influencia debido al modelo usado para la Magnetización:

En la figura 4 se muestran las curvas Temperatura vs. Tiempo obtenidas por la simulación (usando FEM) del calentamiento por inducción para los dos modelos de magnetización de saturación y usando dos corrientes en el inductor diferentes: 800 y 1500 A. En estos casos para modelar la transformación austenítica en la capacidad calorífica se utilizaron los siguientes parámetros: $T_l = 760$ °C y $\sigma = 30$ °C. Se observa para las dos corrientes que ambos modelos son semejantes. Sin embargo el modelo de Brillouin presenta modos espurios en alrededor de 700 °C en ambos casos y en alrededor de 875°C para la corriente de 1500 A. Por tanto, el modelo de Kalus es más adecuado.

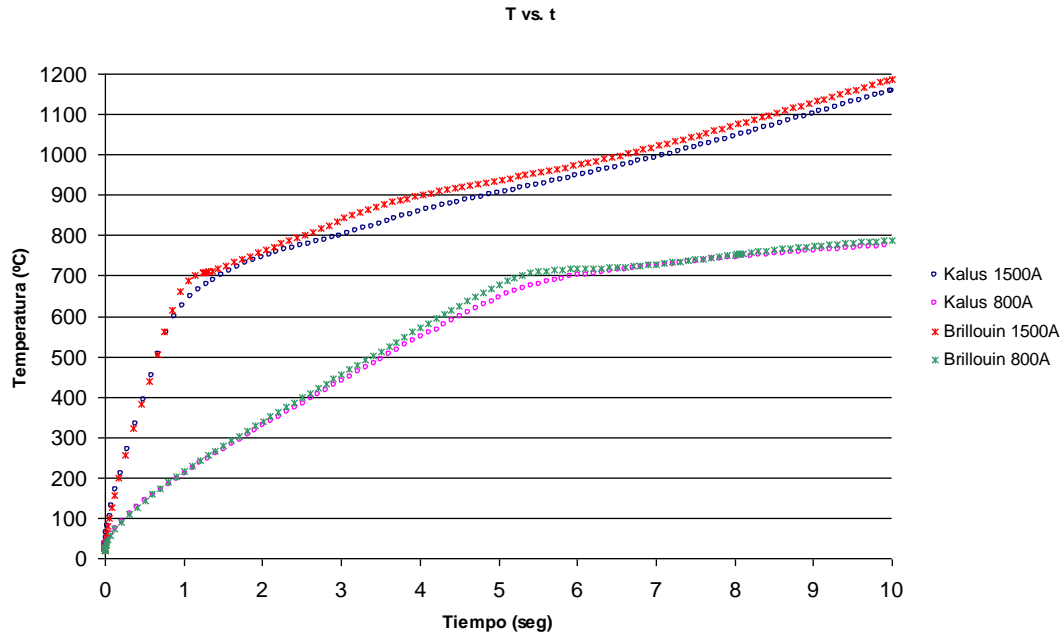


Figura 4. Modelación de la dependencia temporal de la temperatura para los modelos de Brillouin y de Kalus (magnetización de saturación con la temperatura) y para dos corrientes en el inductor diferentes: 800 y 1500 A.

b) Influencia debido al ancho de pico de la transformación austenítica en la capacidad calorífica:

En la Figura 5 se muestran las curvas Temperatura vs. Tiempo obtenidas por la simulación (usando FEM) del calentamiento por inducción para diferentes anchos de pico σ de la transformación austenítica en la capacidad calorífica. En estos casos se empleó $T_I = 760\text{ }^\circ\text{C}$, el modelo de Kalus para la magnetización y una corriente en el inductor de 1500 A. Los valores de σ analizados son: 30, 70, 130 y 200 $^\circ\text{C}$. Aquí se desea analizar para que valores de ancho de pico no se producen modos espurios. Análogamente al caso anterior, la figura 5 muestra que el ancho $\sigma = 30\text{ }^\circ\text{C}$ y $\sigma = 70\text{ }^\circ\text{C}$, que no se graficó pero que es coincidente con la anterior, son los más adecuados.

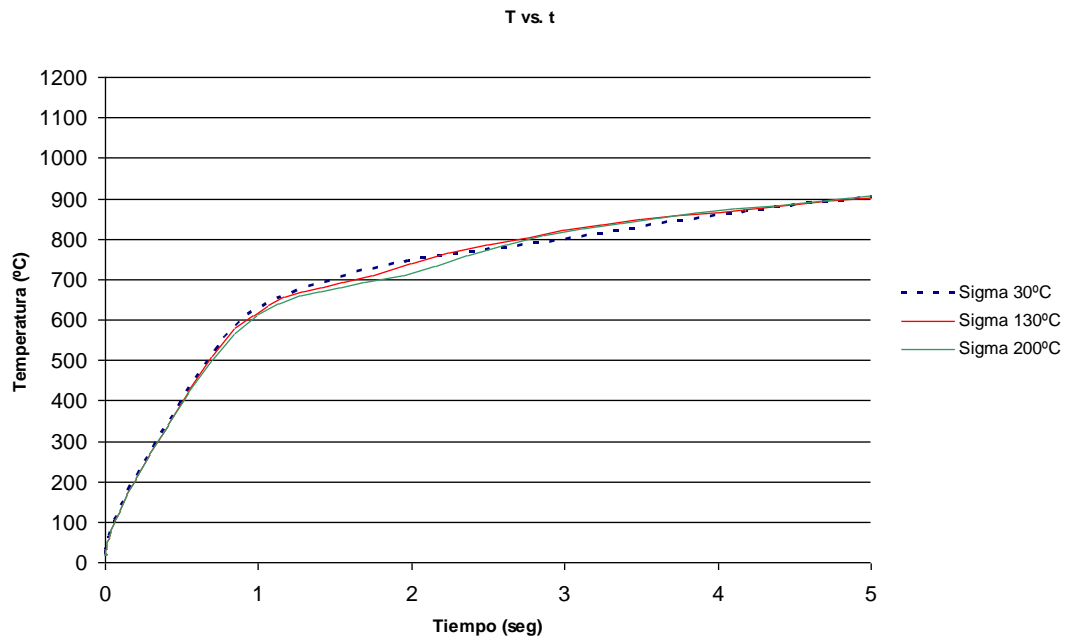


Figura 5. Modelación de la dependencia temporal de la temperatura para diferentes anchos de pico σ de la transformación austenítica en la capacidad calorífica.

c) *Influencia debido al desfase entre la temperatura del pico de la transformación austenítica y T_C :*

En la Figura 6 se muestran las curvas Temperatura vs. Tiempo obtenidas por la simulación (usando FEM) del calentamiento por inducción para los dos modelos de magnetización, con $T_I = 730$ °C. En estos casos se empleó una corriente en el inductor de 1500 A. y de $\sigma = 30$ °C. Nuevamente el modelo de Brillouin presenta modos espurios en alrededor de 700 °C y en alrededor de 850°C.

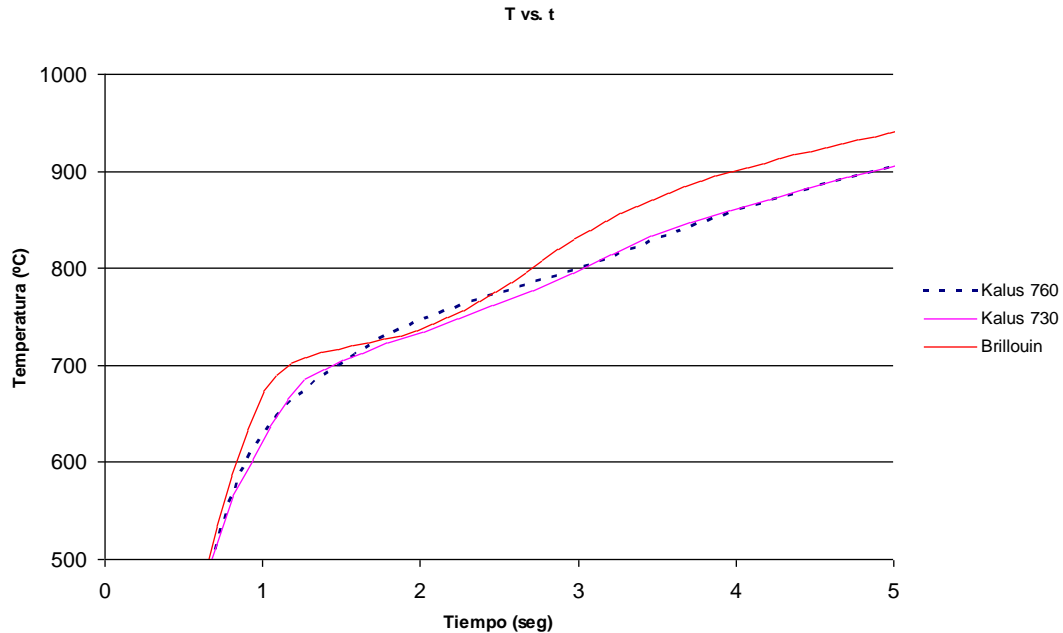


Figura 6. Modelación de la dependencia temporal de la temperatura para valores de $T_I = 730$ °C y $T_I = 760$ °C.

d) *Aplicación a un caso real de calentamiento:*

En la Figura 7 se muestra la curva experimental obtenida para el calentamiento por inducción del tubo de acero empleado. En base a lo analizado en a) y b) el calentamiento fue simulado con el modelo de Kalus para la magnetización y un ancho de pico de la transformación austenítica $\sigma = 30$ °C. Con la finalidad de ajustar la curva de calentamiento experimental, se utilizaron los siguientes parámetros: $I_o = 765$ A y μ_r inicial = 1.8.

En la Figura 7 se observa un adecuado ajuste entre los datos experimentales y los simulados. Sin embargo entre 700 y 800 °C se observan modos espurios. Se considera que dichos modos espurios están asociados a la transformación austenítica, ya que fuera de ella se observa un muy buen ajuste.

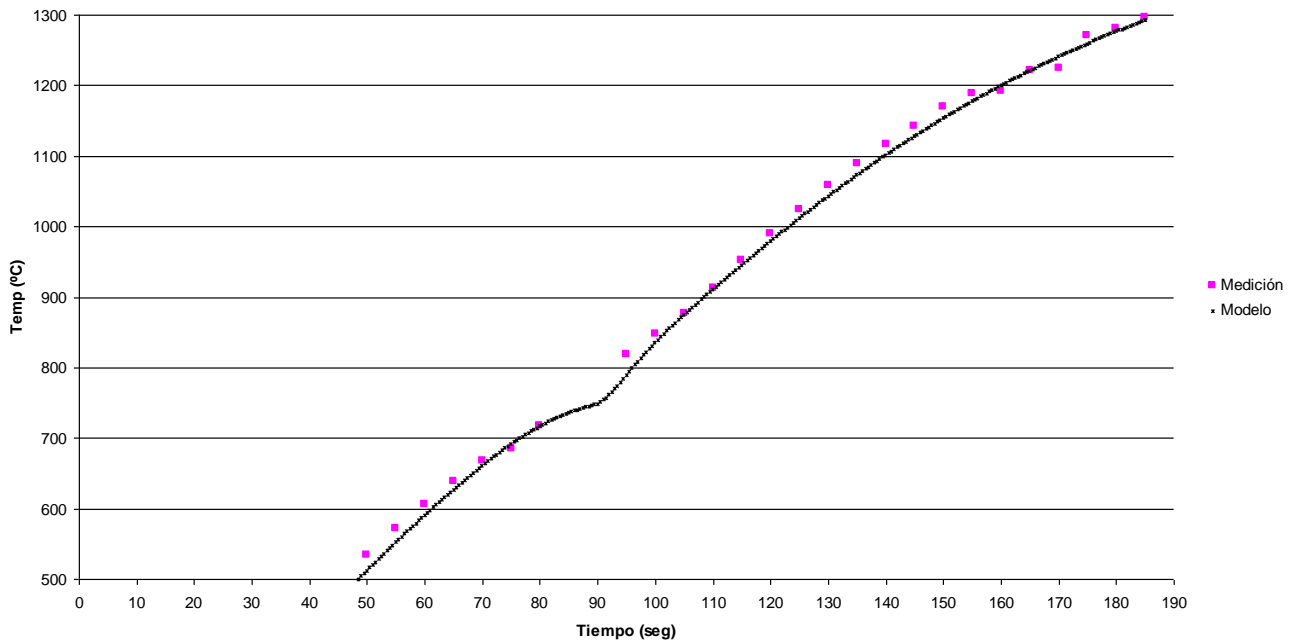


Figura 7. Dependencia temporal de la temperatura obtenida experimentalmente para el calentamiento por inducción del tubo de acero empleado y su modelación usando FEM.

5. CONCLUSIONES

El análisis de las simulaciones realizadas en calentamiento por inducción de tubos muestra que efectivamente el modelo empleado para la magnetización así como el ancho de pico de la transformación austenítica en la capacidad calorífica afectan a los resultados. Se destaca que el modelo de Kalus así como picos angostos (con anchos del orden de 30-50 °C) de la transformación austenítica son los más adecuados.

Por otro lado, los resultados de la modelación para ajustar los datos experimentales de calentamiento de tubos de acero muestran que la permeabilidad relativa μ_r presenta un valor muy bajo indicando prácticamente la pérdida de las propiedades ferromagnéticas a la frecuencia empleada (20 kHz).

REFERENCIAS

- [1] Jang J., Chiu Y., "Numerical and experimental thermal analysis for a metallic hollow cylinder subjected to step-wise electro-magnetic induction heating", Applied Thermal Engineering, Volume 27, Issues 11-12 (2007) 1883-1894.
- [2] Coupard D., Palin-luc T., Bristiel P., Ji V., Dumas C., "Residual stresses in surface induction hardening of steels: Comparison between experiment and simulation", Materials Science and Engineering: A, Volume 487, Issues 1-2 (2008) 328-339.
- [3] Drobenko B., Hachkevych O., Kournyts'kyi T., "A mathematical simulation of high temperature induction heating of electroconductive solids", International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 50, Issues 3-4 (2007) 616-624.
- [4] Garbulsky G. D., Marino P., Pignotti A., "Numerical model of induction heating of steel-tube ends", IEEE Transactions on Magnetics, Volume 33, Issue 1 (1997).
- [5] Sergeant P., Hectors D., Dupre L., Van Reusel K., "Thermal analysis of magnetic shields for induction heating", IET Electric Power Applications, Volume 3, Issue 6, (2009) 543-550.
- [6] ASM Handbook, Volume 01 - Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys - Physical Properties of Carbon and Low-Alloy Steels (1990) 195.
- [7] Rudnev V., Loveless D., Cook R., Black M., "Handbook of Induction Heating", Marcel Dekker (2003) 13.
- [8] Cullity B. D., "Introduction to Magnetic Materials", Addison-Wesley (1972) 125.
- [9] Skoczkowski T. P., Kalus M. F., "The mathematical model of induction heating of ferromagnetic pipes", IEEE Transactions on Magnetics, Volume 25, Issue 3 (1989).