



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

CARACTERIZACIÓN DE UN MEDIO DE TEMPLE POR EL MÉTODO DE KUYUCAK: DESARROLLO DEL CALORÍMETRO Y SISTEMAS DE MEDICIÓN

S. Benito¹, M. Politi^{1,2}, N. Ferré¹, G. Sánchez Sarmiento^{1,3} y D. Said Schicchi^{*1,2}

¹ F.R. Buenos Aires – Universidad Tecnológica Nacional, Medrano 951 C.A.B.A. Argentina

² Instituto Nacional de Tecnología Industrial – PTM, Buenos Aires, Argentina

³ Facultad de Ingeniería, Universidad del Salvador, M.T. de Alvear 1312, C.A.B.A., Argentina

* correo-e: dmsaid@gmail.com

RESUMEN

Los tratamientos térmicos se realizan para modificar las propiedades de los materiales y así ajustarlas de la mejor manera posible a los requerimientos tecnológicos que la industria presenta. El estudio en el laboratorio de los mismos involucra normalmente la caracterización del medio de temple mediante la determinación de las curvas de enfriamiento con el uso de termopares insertados en una probeta. Kuyucak hace unos años ha presentado un proceso alternativo que permite por medio de la medición de la temperatura del medio líquido, próxima a la superficie del metal, calcular dichas curvas. El presente trabajo describe la implementación del ensayo por el método calorimétrico o de Kuyucak, el diseño del calorímetro necesario para la realización del mismo, como así también la comparación con el método tradicional del uso de termopares conforme a los lineamientos de la norma ASTM D6482. Se hace además una revisión sintética del proceso de resolución del problema de calor inverso para la determinación del coeficiente de transferencia de calor del medio y distintas alternativas de optimización para alcanzar este objetivo.

Palabras Claves: *Problema de calor inverso, Tratamientos térmicos, Calorímetro, Coeficientes de transferencia de calor, Kuyucak.*



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo del tiempo y en la actualidad, uno de los tratamientos más empleados es sin duda el temple por inmersión en un medio líquido. Hoy en día el estudio de las características de enfriamiento del medio de temple (MT) se realiza en general conforme a [1] en el caso de un sistema no agitado o [2] en el caso que contemple agitación. En [1-2] se describe el equipamiento y procedimiento necesarios para caracterizar el comportamiento temperatura-tiempo de un MT durante el proceso de enfriamiento de una probeta de dimensiones definidas. La determinación de la curva de enfriamiento permite el estudio y cálculo de otros parámetros del medio como la tasa de enfriamiento y el coeficiente de transferencia de calor (CTC) entre otros [3]. Vale la pena notar que el CTC como función de la temperatura superficial del espécimen es un parámetro básico necesario si lo que interesa es modelar un tratamiento térmico de este tipo, por lo tanto su correcta determinación cobra vital importancia.

Este método, sin embargo, presenta como principal desventaja la necesidad de colocar un termopar en el centro geométrico de la probeta en un agujero, comúnmente electroerosionado, de un diámetro pequeño, lo cual lo torna, en algunos casos, técnica o económicamente complejo o inviable.

El método propuesto por Kuyucak [4,5], en el que se concentra nuestra actividad reciente, es comparativamente sencillo en su implementación y de un costo considerablemente menor debido a que los instrumentos necesarios son reutilizables y más económicos, siendo estas sus principales ventajas.

En las secciones siguientes se describirán aspectos de la modelización, el diseño y consideraciones en la implementación de los ensayos y resultados obtenidos a la fecha por los autores en los últimos años.

2. MODELIZACIÓN DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS

2.1. Aspectos generales

El temple de aceros implica el calentamiento de una pieza, típicamente a la temperatura de austenización, seguido a menudo de la inmersión en un medio líquido vaporizable como el agua, aceite o soluciones acuosas de polímeros. La Figura 1 muestra una típica curva de enfriamiento con los tres mecanismos más comunes de transmisión de calor durante un proceso de inmersión convencional. Al comienzo la pieza se rodea por una capa de vapor, luego la capa de vapor colapsa y comienza un proceso de nucleación de burbujas por la ebullición del



fluido donde la pieza entra en contacto con el líquido. Por último la temperatura sigue descendiendo comenzando el enfriamiento por convección.

Se describe a continuación el modelado problema acoplado de transmisión de calor, cambio de fase y predicción de la distribución de las microestructuras, como así también la estimación de los coeficientes de transferencia de calor resolviendo el problema de calor inverso. Es posible realizar una predicción de dureza mediante la simulación y mapeo de los resultados de un ensayo Jominy [6] o mediante el modelo de Maynier [7], sin embargo por una cuestión de espacio estos aspectos no se discutirán en este trabajo.

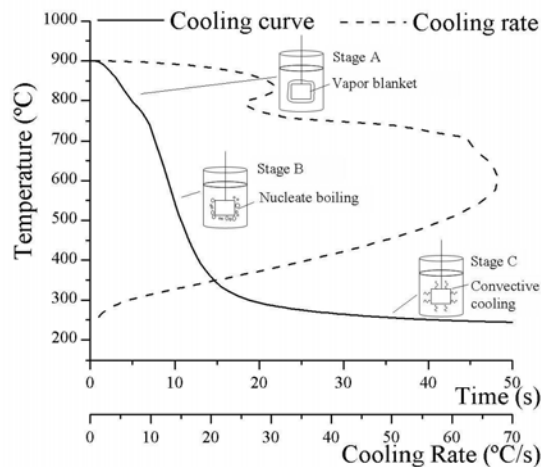


Figura 1 Etapas del enfriamiento en un proceso de temple

2.2. Ecuaciones de transmisión de calor aplicadas en el proceso de templado

El objetivo principal es el cálculo de distribución espacial y temporal de temperatura dentro de una probeta durante el calentamiento y enfriamiento, acoplados con la evolución de los cambios de fase de austenita a ferrita, perlita, bainita y martensita.

La ecuación de calor a resolver es:

$$\nabla \cdot (k(\vec{r}, T) \nabla T) + Q(T, \vec{r}, t) = c(\vec{r}, T) \rho(\vec{r}, T) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

con $k(\vec{r}, T)$, $c(\vec{r}, T)$, $\rho(\vec{r}, T)$ conductividad térmica, calor específico y densidad del material respectivamente. La temperatura $T(\vec{r}, t)$ está sujeta a las condiciones iniciales:

$$T(\vec{r}, t = 0) = T_0(\vec{r}) \quad ; \quad \vec{r} \in \Omega \quad (2)$$

con las siguientes condiciones de contorno en la superficie de la probeta:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h_i (T - T_{qu}) \quad \text{en } \Gamma_i, i = 1, \dots, p \quad (3)$$



$h_i(T)$ son los CTC correspondientes a las distintas secciones del contorno Γ (Figura 2) y T_{qu} la temperatura del medio de temple. En cada una de las p zonas de enfriamiento, el CTC es fuertemente dependiente del mecanismo de transmisión de calor que gobierna el flujo de energía.

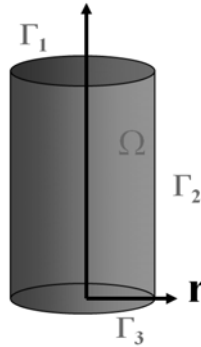


Figura 2 Dominios de cálculo

La generación de calor por unidad de volumen debida a la transformación microestructural es:

$$Q(T, \vec{r}, t) = \rho \sum_{k=1}^4 H_k(T) \frac{dX_k}{dt} \quad (4)$$

donde X_k representa la fracción volumétrica de austenita transformada en la fase k ($k=1$: ferrita, 2 : perlita, 3 : bainita, 4 : martensita) y $H_k(T)$ el correspondiente calor de transformación.

La solución de estas ecuaciones se realiza mediante el método de elementos finitos para la discretización del dominio bidimensional axisimétrico, y un esquema de Crank-Nicholson de diferencias finitas para la variable temporal.

2.3. Modelización de la transformación de fase durante el proceso de enfriamiento

La transformación de fase durante el proceso de enfriamiento puede separarse en el tipo difusiva y no difusiva y está gobernada por los diagramas de transformación isotérmica (diagramas TTT).

La transformación del tipo difusiva de austenita en ferrita/perlita/bainita es modelada mediante la ecuación cinemática de Johnson-Mehl-Avrami (JMA) [8]. La evolución temporal de cada fracción volumétrica puede representarse por:

$$X_k(\theta) = f_{\max k} \left\{ 1 - \exp[-a_k \theta^{b_k}] \right\} \quad (5)$$

donde X_k es la fracción volumétrica de austenita transformada en la fase k , $f_{\max k}$ la máxima fracción volumétrica transformable de la fase k a esa temperatura, a_k y b_k los parámetros cinéticos, generalmente dependientes de la temperatura y la fase.



La ecuación de JMA es válida sólo para transformaciones isotérmicas, por lo cual la curva de enfriamiento debe aproximarse mediante una serie isotermas correspondientes a pequeños pasos de tiempo (Figura 3). En la ecuación (5), θ es un tiempo virtual que no posee relación con el tiempo real del proceso t , y representa el tiempo empleado en alcanzar la transformación de una dada fracción volumétrica de austenita bajo condiciones isotérmicas.

La transformación no difusiva de austenita a martensita es calculada usando la ecuación propuesta por Koistinen y Marburger [9]:

$$X_M(\theta) = (1 - X_F - X_P - X_B) \{1 - \exp[-c_M (M_S - T)]\} \quad (6)$$

donde c_M es una constante y M_S la temperatura de inicio de martensita, que depende del grado del acero.

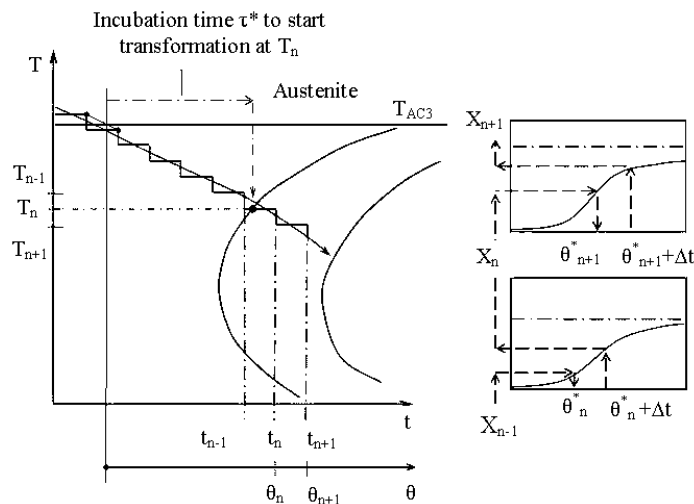


Figura 3 Aproximación de la curva de enfriamiento superpuesta en el diagrama TTT. Relación entre t y θ

2.4. Estimación de los coeficientes de transmisión de calor

En los procesos de tratamientos térmicos la energía es removida de la superficie de la pieza por convección y/o radiación. En algunos casos, los CTC no son conocidos previamente y en otros casos es deseable optimizarlos en el sentido de lograr que la pieza tratada alcance una evolución térmica preestablecida. A partir de mediciones de temperatura en el interior y/o la superficie de la pieza es posible resolver el problema de calor inverso para determinar la variación de los coeficientes en el tiempo que mejor satisfaga las demandas de producción. La dependencia de estos del tiempo puede aproximarse en forma constante a tramos o mediante una función poligonal, cada una definida por una serie de parámetros $h_i^{(r)}$ ($r=1, \dots, p$; $i=1, \dots, q$) como se muestra en la Figura 4.



Llamando T_k^m a la temperatura medida y T_k^c a la temperatura calculada numéricamente, en esos puntos, uno puede plantearse el problema de obtener los valores de los CTC h_i que minimizan la función de error:

$$S = S(h_i^{(r)}) = \sum_{k=1}^n (T_k^m - T_k^c)^2 \quad (7)$$

siendo n el número total de mediciones de temperatura, es decir, el número total de puntos de tiempo por cada punto medido.

Diversos algoritmos de optimización como la estimación de error se presentan en [10].

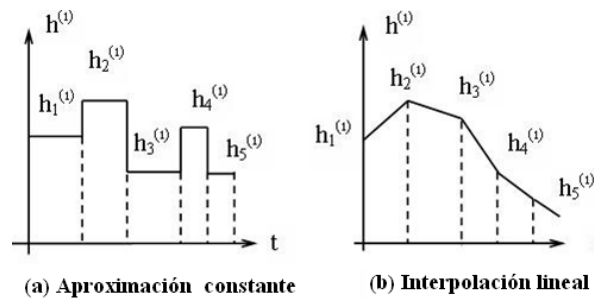


Figura 4 Aproximación temporal de los coeficientes de transmisión térmica

2.5. Método calorimétrico

Como alternativa a la medición de temperatura en la probeta, Kuyucak en [4,5] prescinde de la misma y propone estimar la evolución de la temperatura en la probeta a partir de la medición de la temperatura del MT, próxima a la superficie del espécimen en cuestión, mediante un balance calorimétrico. El principio consiste en que el calor que entrega la pieza es tomado por el MT, existiendo una correspondencia unívoca entre ambos. La temperatura promedio de la pieza y su tasa de enfriamiento en un momento determinado del temple pueden ser derivadas del conocimiento de las temperaturas iniciales del MT y de la pieza a templar, la temperatura de equilibrio y las capacidades caloríficas.

El balance calorimétrico en cuestión responde a:

$$m_{qu}.c_{qu}(T).dT_{qu} = m_p.c_p(T).dT_p \quad (8)$$

con:

m_p y m_{qu} masa de la pieza y del MT; $c_p(T)$ y $c_{qu}(T)$, calor específico del material de la probeta y del MT función de la temperatura; dT_p y dT_{qu} , diferenciales de temperatura de la pieza y del MT, respectivamente.

Asumiendo $c_{qu}(T)$ constante el ensayo debido a una muy baja variación de temperatura del baño y una intensa agitación del baño que permite asumir un flujo de calor uniforme en la



superficie de la probeta, podemos calcular el calor transferido por la probeta al MT [3] en un tiempo t como:

$$m_{qu}.C_{qu}.[T_{qu}(t) - T_{qu}(0)] = \int_0^t q_p(t).A_t.dt \quad (9)$$

con $q_p(t)$ flujo de calor; A_t área total de la pieza; $T_{qu}(t)$ evolución de temperatura del MT en el tiempo.

Si se conoce la evolución de la temperatura del baño puede expresarse la evolución del calor transferido como:

$$q_p(t) = \frac{m_{qu}.C_{qu}}{A_t} \cdot \frac{dT_{qu}(t)}{dt} \quad (10)$$

3. IMPLEMENTACIÓN DE LOS ENSAYOS

3.1. Medición de temperatura

La propuesta es implementar un ensayo dual, es decir, diseñar un calorímetro con la instrumentación correspondiente para realizar el ensayo propuesto por Kuyucak, pero siguiendo los lineamientos para la medición de temperatura conforme a [2], de forma que los resultados según ambas técnicas sean directamente comparables, buscando finalmente trabajar sólo con el método calorimétrico. Es por esto entonces, que se plantea el diseño a partir del uso de una probeta de INCONEL 600 cilíndrica según la Figura 5.

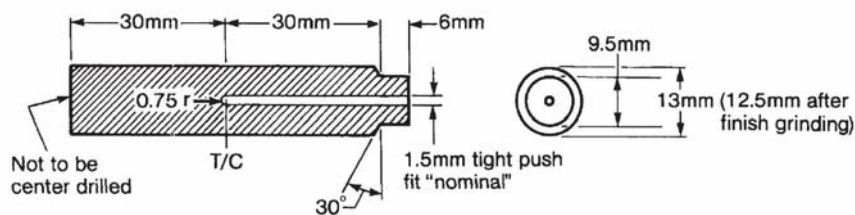


Figura 5 Dimensión de la probeta (extraído de ASTM D6482)

La medición de temperatura en la probeta se realiza con un termopar tipo K de INCONEL 600 con vaina flexible y unión aislada de diámetro 1,5 mm y largo 1 m con su respectivo cable autocompensado; mientras que la medición en el baño se realiza con un termopar tipo K de inmersión, rígido y con cable autocompensado. El principio de funcionamiento de los termopares exige la existencia de una temperatura de referencia constante y diferente de la temperatura que se quiere medir. Es por esto que se debe utilizar un amplificador de señal de termopares con compensación de junta fría para Juntas Tipo K. Este dispositivo produce una señal proporcional a la temperatura medida (10 mV/°C) y provee una exactitud de la temperatura de junta mayor a la de la temperatura de operación registrada, es decir, el error



de mantenimiento de la Temperatura de Referencia de Juntura es menor que el error correspondiente a la señal de salida.

La señal eléctrica es medida y guardada por un Adquiridor de Datos, desarrollado en base a un microprocesador ARM Cortex-M3, el cual procesa los datos guardándolos en memoria I²C para su posterior análisis. El mismo consta de conectividad USB para la descarga de las mediciones a una computadora. Los niveles de salida del amplificador de señal de termopares con compensación de juntura fría son acondicionados convenientemente para que puedan ser medidos por el Conversor Analógico Digital del microprocesador ARM Cortex-M3.

El traslado de la probeta desde el horno hasta el calorímetro se realiza de forma manual, en un tiempo menor a 3 segundos utilizando un tubo soporte con largo de 200 mm (Figura 6).

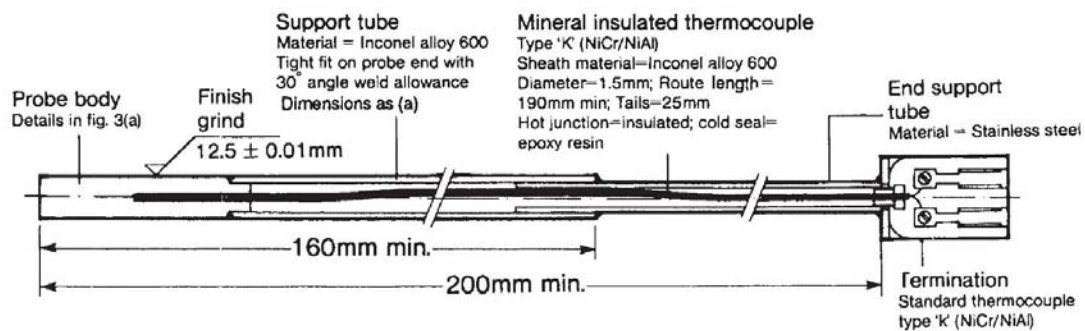


Figura 6 Conjunto probeta/soporte/termopar (extraído de ASTM D6482)

Se ha desarrollado un programa ad hoc que mide y procesa la información obtenida por el termopar, construyendo la curva de enfriamiento y luego derivándola para obtener la curva correspondiente a la tasa de enfriamiento. Finalmente ha desarrollado un código ad hoc para la resolución del problema de calor inverso que permita obtener el coeficiente de transferencia de calor.

3.2. Diseño del calorímetro

Partiendo del diseño indicado en [1-2] se incorporan algunas modificaciones con el objetivo de permitir la dualidad de ensayos y mejorar a su vez características térmicas. Un aspecto a los efectos de estudiar los mecanismos de transferencia de calor es la transparencia del recipiente, de forma tal de poder grabar el ensayo. Por esto, la cuba consiste de un recipiente de vidrio Pyrex, que permite realizar ensayos de aceites, cuyos aditivos son un problema para el caso del PMMA, por ejemplo, con dimensiones de 125 x 60 x 205 mm (Figura 7).

El volumen de MT conforme a [1-2] es de 1,5l. Sin embargo, para tener una correcta sensibilidad del ensayo de Kuyucak debido a que este volumen ocasionaría una variación de



temperatura del MT muy baja en algunas condiciones, se propone un diseño que permite disminuir el volumen de la cuba utilizando una tapa superior reemplazable y agregando suplementos en la zona inferior de la misma (Figura 8), alcanzando un volumen total del baño de 1 l. De esta manera el flujo del líquido se realiza a través de perforaciones existentes en el tabique central. El recipiente incorpora una aislación térmica de 100 mm de espesor de lana mineral, sujeta al mismo a través de un contenedor exterior de policarbonato (Figura 7).

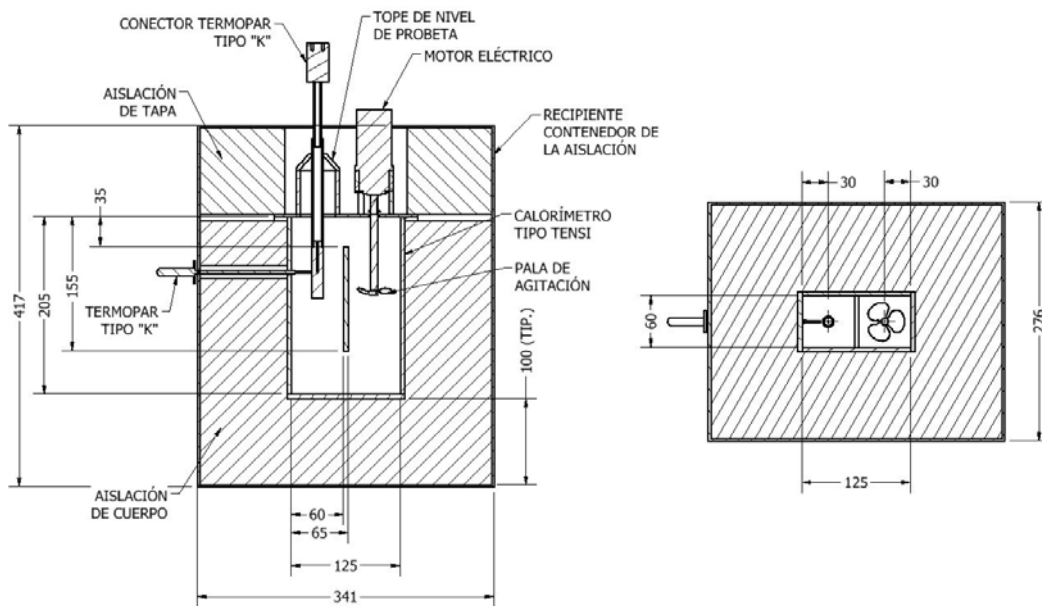


Figura 7 Esquema de la máquina de ensayo

El sistema de agitación constará de un motor con velocidad controlada a 1000 rpm y una hélice de 50 mm de diámetro y 3 aspas con un ataque de 42 mm, conforme a [2]. La calibración de la velocidad de giro es efectuada con un tacómetro óptico comercial.

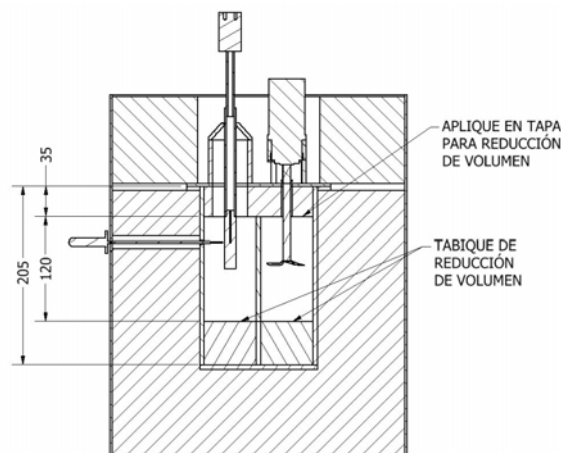


Figura 8 Corte de la máquina de ensayo con los accesorios necesarios con contenido de 1 l



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

4. RESULTADOS

Se ha trabajado durante el desarrollo de este proyecto y previamente [3,6], en el estudio de diversos MT minerales y recientemente vegetales como una alternativa ecológica de los medios tradicionales tanto en el estudio de las características térmicas [11-13], como así también en el estudio de las tensiones residuales [14-15]. Para esto se ha trabajado en conjunto con investigadores de Brasil, donde se han realizado los ensayos hasta la fecha, y EE.UU. Con el diseño y construcción de este equipo se busca lograr mayor independencia en las líneas de investigación, como así también desarrollar íntegramente la actividad en el país.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Se ha logrado un diseño que permite el estudio de MT para baños con y sin agitación, permitiendo registrar visualmente las diversas etapas de enfriamiento y mecanismos de transferencia de calor. Con la finalización de la construcción del equipo se busca profundizar el estudio del método calorimétrico, el cual no ha sido hasta el momento desarrollado y difundido, según el conocimiento de los autores.

6. REFERENCIAS

- [1] ASTM D6200 – 01, Standard Test Method for Determination of Cooling Characteristics of Quench Oils by Cooling Curve Analysis, 2012.
- [2] ASTM D6482 - 06, Standard Test Method for Determination of Cooling Characteristics of Aqueous Polymer Quenchants by Cooling Curve Analysis with Agitation (Tensi Method), 2011.
- [3] G. S. Sarmiento, J. F. Bugna, L. Canale, R. Muñoz, R. Agnelli , G. Totten, A. Canale, Modeling quenching performance by the Kuyucak method, MSEA, Vol. 459, Issues 1–2, pp.383–389, 2007
- [4] S. Kuyucak; P. Newcombe; P. Bruno; R. Grozdanich y G. Looney, “Quench time measurement: as a process control tool, part I”. Heat Treating Process, Jan/Feb, pp. 60-63, 2005.
- [5] S. Kuyucak; P. Newcombe; P. Bruno; R. Grozdanich y G. Looney, “Quench time measurement: as a process control tool, part II. Heat Treating Process, March/April, pp. 42-44, 2005
- [6] G. Sánchez Sarmiento, A. Gastón y G. Totten, Computational Modeling of heat treating processes by use of HT-MOD and Abaqus, LAAR, Vol. 41, pp. 217-224, 2011.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

- [7] Maynier P, Dollet J, Bastien P. "Hardenability concepts with applications to steels", AIME, New York, NY, pp. 518-544, 1978.
- [8] Johnson, A.W. and R.F. Mehl, "Reaction kinetics in processes of nucleation and growth", Trans. AIME 135, pp. 416–425, 1939.
- [9] Koistinen, D.F. and R.E. Marburger, "General equation prescribing the extent of the austensite transformation in pure iron-carbon alloys and plain carbon steels", Acta Metall., 7, pp. 50–60, 1959.
- [10] D. Said Schicchi, A. Gastón and G. Sánchez Sarmiento "Error estimation in the inverse heat conduction problem applied to the simulation of heat treatment", MECOM 2012, Salta, Argentina.
- [11] D. Schicchi, G. Belinato, G. Sarmiento, R. Simencio, G. Totten, A. Gastón & L. Canale "Comparison of Oxidation Stability and Quenchant Cooling Curve Performance soybean Oil and Palm Oil". JMEP, Vol 22, Issue 7, pp. 1929-1936, 2013.
- [12] E.Carvalho, L. Canale, G. Sarmiento, E. Agaliois, J. Carrara, D. Schicchi & G. Totten "Heat Transfer Properties of a Series of Oxidized and Unoxidized Vegetable Oils in Comparison with Petroleum Oil-Based Quenchants" JMEP, Vol 22, Issue 7, pp. 1871-1878, 2013.
- [13] R. Simencio, L. Canale, D. Schicchi, E. Agaliois, G. Totten & G. Sarmiento "Epoxidized Soybean Oil: Evaluation of Oxidative Stabilization and Metal Quenching/Heat Transfer Performance". JMEP, Vol 22, pp. 1937-1944, 2013.
- [14] D. S. Schicchi, R. Simencio, G. S. Sarmiento, G. Totten, L. Canale "Epoxidized soybean oil/FAME blends as metal quenchants: part II -quenching and residual stress performance", IFHTSE 20th Congress, Beijing, China, 2012.
- [15] R. L. Simencio, D. Schicchi, R. Penha , G. Sarmiento, L. Canale, G. Totten, "Utilização do óleo de soja epoxidado e blendas com éster metílico de óleo de soja como fluidos de têmpera: parte II – têmpera e tensões residuais", 20 CBECIMAT, 4-8 Novembro 2012, Joinville, SC, Brasil.