

Modelado del enfriamiento de una barra de acero IRAM 4340

Innovación y Gestión de productos

Javier Rodriguez* -5960 – javirod_9191@hotmail.com

*Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional, Córdoba, Argentina
Maestro M. López esq. Cruz Roja Argentina 5000, Ciudad Universitaria, Córdoba Capital*

UTN.GICAPP@gmail.com

Área temática: **Innovación y Gestión de productos**

RESUMEN

En la producción de barras de Acero IRAM 4340 se realiza el enfriamiento de las mismas en una cama de avance controlado donde se produce el enfriamiento de la barra desde la austenización hasta temperatura ambiente por circulación de aire natural. El análisis del enfriamiento mediante métodos de elementos finitos nos ayudará a obtener las isotermas en la sección en los distintos estados. Relacionando estos valores con los diagramas Tiempo Temperatura Transformación, podremos conocer las propiedades de su microestructura, predecir su comportamiento y haber desarrollado una herramienta que permite verificar la correcta operación de la cama de enfriamiento. La validación y ajuste del modelo fue realizado con mediciones realizadas en la instalación industrial mediante la cámara termográfica avanzada SKF TMTI 2.

Palabras clave

IRAM 4340, Normalizado, Elementos Finitos, Diagrama TTT, Microestructura.

ABSTRACT

In the production of steel bars 4340 IRAM cooling thereof in a controlled bed where cooling occurs bar from austenitization to room temperature by natural air circulation is carried forward. Cooling analysis by finite element methods help us to obtain the isotherms section in different states. Relating these values with diagrams Time Temperature Transformation we know the properties of their microstructure, predict their behaviour and and develop tool for verify the correct operation of the cooling bed. Validation and adjustment of the model was made with measurements in industrial installation by SKF Advanced thermal imager TMTI 2.

1. INTRODUCCION

Las exigencias actuales en la producción de barras de acero en lo que a calidad se refieren, deja un interesante camino por recorrer hacia la determinación de un modelo matemático que represente las isotermas de enfriamiento de una sección a lo largo del tiempo. Lo cual nos ayudará a conocer las características de las estructuras metalográficas, sus composiciones y así predecir el posible comportamiento de las barras cuando son enfriadas durante su proceso productivo. El objetivo de este trabajo, es desarrollar una herramienta que permita programar, controlar y optimizar el funcionamiento de la cama de enfriamiento de barras de acero.

2. DESARROLLO

2.1. Descripción del proceso de enfriamiento del material.

2.1.1. Normalizado

El normalizado es un tratamiento en el que se calienta el acero en la región austenítica 50°C por encima de la temperatura crítica superior, se lo mantiene un tiempo dado que es función del espesor, para homogeneizar la estructura y luego se lo enfría al aire.

Los objetivos del mismo pueden ser ablandar el material para su mecanizado o deformación plástica, afinar la estructura granular, "Normalizar" el material o sea llevarlo a una condición que se toma como normal, luego por ejemplo de un temple u otro tratamiento térmico defectuoso o disminuir la segregación en la composición química y estructural del acero.

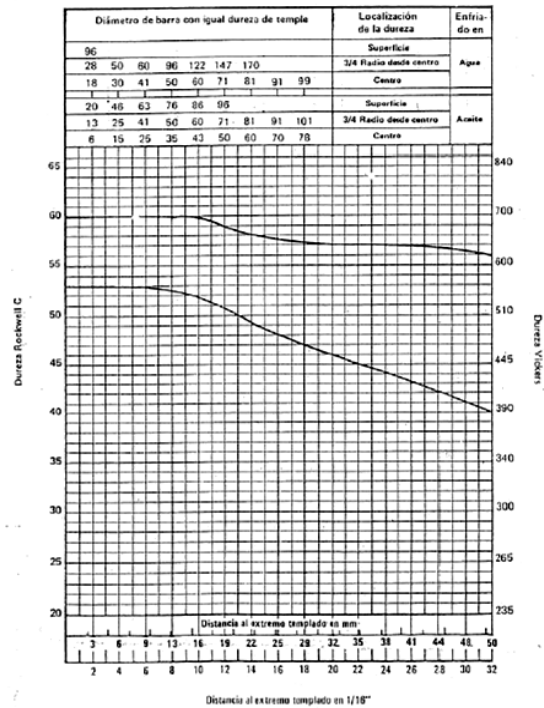
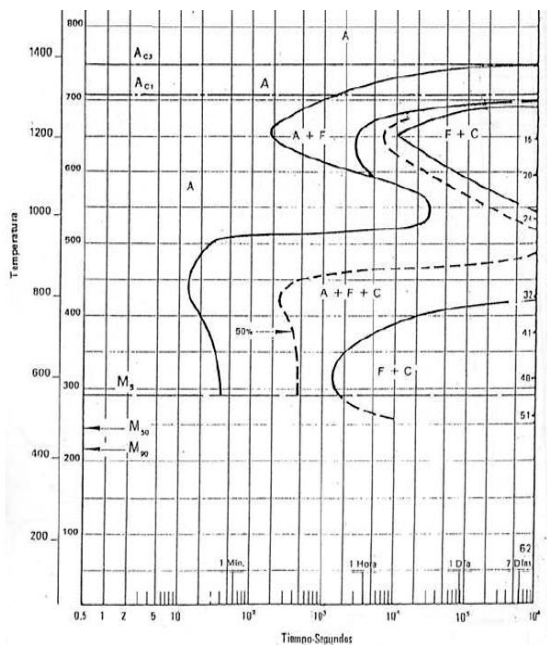


Figura 1 Diagrama Temperatura-Tiempo-Transformación de un acero 4340 y Figura 2 Bandas de templabilidad

La diferencia en la microestructura entre los aceros normalizados y recocidos es el tamaño que presentan las láminas de la perlita. En el recocido se obtiene una perlita gruesa, más blanda que la perlita que se obtiene en el normalizado.

Los rangos de temperatura de austenización que se usan en el normalizado son ligeramente superiores a los empleados en el recocido.

Este tratamiento se aplica en general a aceros de bajo contenido de carbono (<0,3%).

El normalizado es más económico en el cual el enfriamiento del acero se efectúa al aire y no dentro del horno.

La dureza que se logra con este tratamiento es superior a la obtenida con el recocido total, pero a menudo es adecuada ya que el material queda lo suficientemente blando como para efectuar sobre el mismo, los procesos de maquinado o deformación plástica requeridos para fabricar piezas. Basado en Smith [6].

2.2. Mecanismos de transporte de la Energía

Hay varias maneras en las cuales la energía puede ser transportada de una región a otra, desde el punto de vista del continuo pueden ser clasificados en:

2.2.1. Conducción

El mecanismo de la conducción de calor puede explicarse en términos de un experimento frecuentemente usado para medir la conductividad térmica de líquidos y gases:

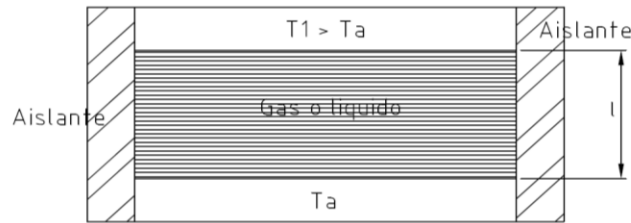


Figura 3 Esquema del experimento de conducción de calor

Si analizamos el flujo de calor a través de un área, encontramos que está relacionado en proporción lineal con la variación de temperatura respecto a la distancia entre las placas:

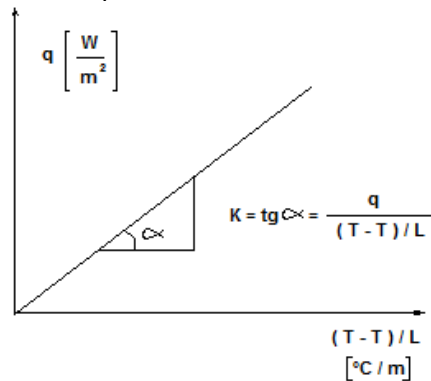


Figura 4 Curva de la conductividad térmica

Dicha relación entre el calor conducido por área por diferencia de temperatura en unidad de longitud se puede expresar como:

$$q = k \frac{T_1 - T_2}{L} \quad k : \left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right] \quad (1)$$

Por ello al proceso de transporte de energía llamado "Conducción de Calor" puede definirse de la siguiente manera:

Conducción de calor es la cantidad de energía transportada por sobre la que es transportada por movimiento de convección y por radiación.

2.2.2. Conductividad térmica

La hipótesis fundamental de la conducción de calor es: "La tasa con la que el calor fluye desde el lado de mayor temperatura de una superficie isotérmica, al lado de menor temperatura, por unidad de área en la unidad de tiempo, es igual a q y vale:

$$q = -k \cdot \nabla T \quad (2)$$

Donde k es un coeficiente positivo denominado conductividad térmica o Ley de Fourier.

$$q_i = k \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (3)$$

Para una superficie arbitraria:

$$\begin{aligned} q_p &= \bar{q} \cdot \bar{n} = q_1 \cdot \alpha_1 + q_2 \cdot \alpha_2 + q_3 \cdot \alpha_3 = q_i \cdot \alpha_i \\ &= -k \left(\frac{\partial T}{\partial x_1} \alpha_1 + \frac{\partial T}{\partial x_2} \alpha_2 + \frac{\partial T}{\partial x_3} \alpha_3 \right) = -k \frac{\partial T}{\partial n} \quad (4) \end{aligned}$$

2.2.3. Radiación

Si se coloca un cuerpo caliente en una cavidad vacía (sin materia) con paredes a una temperatura menor que el cuerpo, este perderá paulatinamente energía hasta que su temperatura sea la misma que la de las paredes. En otras palabras, puede decirse:

Radiación térmica es la energía transportada en ausencia de materia.

La radiación térmica es de la misma naturaleza que la luz visible, rayos X, ondas de radio, etc., radicando su diferencia en su longitud de onda y en la fuente de generación.

Todos los sólidos, líquidos y algunos gases emiten radiación térmica:

Ley de Stefan-Boltzmann:

$$q_{\text{rad}} = \epsilon \sigma T^4 \quad (5)$$

σ : Cte. De Stefan-Boltzmann:

$$\sigma = 5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^2$$

ϵ : Emisividad: $0 < \epsilon < 1$

La tasa a la que la energía es transferida desde el cuerpo a las paredes es igual a la tasa a la que la energía radiante es emitida desde el cuerpo menos la tasa a la cual la energía radiante es absorbida por el cuerpo. Para el caso de un cuerpo gris en una cavidad negra, con su emisividad igual a su opacidad, es decir $\alpha = \epsilon$, se tendrá:

$$Q_{12} = \epsilon \cdot A_1 \cdot \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (6)$$

2.2.4. Convención

La convección, algunas veces identificada como un modo separado de transferencia calórica, se refiere a la transferencia de calor desde una superficie cerrada a un fluido en movimiento, o a la transferencia de calor a través de un plano imaginario en el seno de un fluido en movimiento.

Si el movimiento de fluido esta inducido por una bomba, un ventilador, un fuelle o algún otro dispositivo similar, el proceso se llama "Convección Forzada". Si el movimiento del fluido ocurre como resultado de una diferencia de densidades producida por la misma transferencia de calor, el proceso se llama "Convección lineal o natural".

Este tipo de transferencia de calor puede ser descrito en una ecuación que limita la forma de la ecuación de conducción y es dada por

$$dQ = h \cdot A \cdot dt \quad (7)$$

La constante de proporcionalidad h es un término sobre el cual tiene influencia la naturaleza del fluido y la forma de agitación, y debe ser evaluado experimentalmente. Se llama "Coeficiente de transferencia de calor". Cuando se la escribe en su forma integrada se conoce como la ley de enfriamiento de Newton.

$$Q = h \cdot A \cdot \Delta t \quad (8)$$

2.3. El postulado fundamental de la energía

Expresa que "La tasa de cambio de la energía interna y cinética de una cuerpo" es igual a "tasa a la cual la energía "no mecánica"(calor) es transferida al cuerpo", mas "la tasa a la cual energía mecánica es transferida al cuerpo mediante fuerzas de superficie (trabajo)", mas "tasa a la cual energía mecánica es transferida al cuerpo mediante fuerzas de volumen (trabajo), mas tasa a la cual energía electromagnética es liberada dentro del cuerpo".

2.3.1. Conducción de calor dependiente del tiempo

Consideremos primeramente el flujo calórico en el interior de una placa a temperatura inicial T_0 que es sumergida repentinamente en un fluido a temperatura T_1 . Supongamos que las dimensiones de la placa en las direcciones y , z son muy grandes comparadas con el espesor b de la placa. En el caso de que la resistencia térmica domine el proceso se tendrá la siguiente situación:

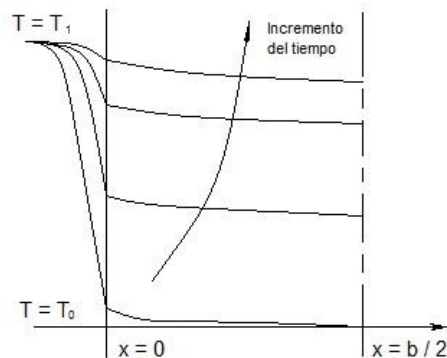


Figura 5 Flujo calórico en la placa en función del tiempo

$$Bi \frac{hb}{k} ; h \ll k/b \quad (9)$$

Partiendo de la ecuación de la Ecuación de conducción de calor y la ley de Fourier de conducción de calor. Se integra la Ecuación de conducción de calor en un recinto arbitrario Ω . Tomando una temperatura promediada en todo el recinto, suponiendo que en toda la frontera Γ la condición de contorno es T_1 para la Ley de Fourier y operando, se obtiene la ecuación de la Tasa de transferencia de calor al medio:

$$\dot{Q} = \langle h \rangle A(T - T_1) = \langle h \rangle A(T_0 - T_1)\theta = \langle h \rangle A(T_0 - T_1)e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (10)$$

2.4. Introducción al método de elementos finitos

El método de los elementos finitos (MEF) es un método numérico general para la resolución de ecuaciones diferenciales muy utilizado en diversos problemas de ingeniería y física.

Es muy usado debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos (en dos o tres dimensiones). Además el método es fácilmente adaptable a problemas de difusión de calor, de mecánica de fluidos para calcular campos de velocidades y presiones o de campo magnético.

Dada la imposibilidad práctica de encontrar la solución analítica de estos problemas, con frecuencia, en la práctica ingenieril, los métodos numéricos, y en particular los elementos finitos, se convierten en la única alternativa practica al cálculo.

2.4.1. Descripción general del MEF y los pasos de análisis

El cálculo de temperaturas, flujos de calor y las fuentes o sumideros térmicos por medio de métodos clásicos de análisis se obtiene a través de la ardua tarea de resolver las ecuaciones que gobiernan el problema, considerando para esto, las condiciones de contorno.

El MEF resulta ser la mejor alternativa para obtener la solución a problemas en sistemas físicos complejos.

Se basa en dividir el cuerpo, estructura o dominio (medio continuo) sobre el que están definidas ciertas ecuaciones integrales que caracterizan el comportamiento físico del problema en una serie de subdominios no intersecantes entre sí denominados elementos finitos. El conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio también denominada discretización.

Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados nodos. Dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito, además un nodo sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos, el conjunto de nodos considerando sus condiciones de adyacencia se llama malla.

Los cálculos se realizan sobre una malla o discretización creada a partir del dominio con programas especiales llamados generadores de mallas, en una etapa previa a los cálculos que se denomina pre-proceso. De acuerdo con estas relaciones de adyacencia o conectividad se relaciona el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo y denominadas grados de libertad.

El conjunto de relaciones entre el valor de una determinada variable entre los nodos se puede escribir en forma de sistema de ecuaciones lineales (o linealizadas), la matriz de dicho sistema de ecuaciones se llama matriz de rigidez del sistema. El número de ecuaciones de dicho sistema es proporcional al número de nodos.

Una importante propiedad del método es la convergencia, si se consideran particiones de elementos finitos sucesivamente más finas la solución numérica calculada converge rápidamente hacia la solución exacta del sistema de ecuaciones.

El análisis, típicamente, consiste en siete pasos. Los pasos 1, 2, 3, 4, 5 y 7 requiere la decisión del usuario, el resto de los pasos pueden ser automáticamente desarrollados por un programa de computadora (software).

- 1- Discretización o modelo de la estructura.
- 2- Definir las propiedades de los elementos.
- 3- Obtención de la matriz de rigidez y fuerza.
- 4- Aplicación de cargas.
- 5- Definición de las condiciones de contorno.
- 6- Solución del sistema de ecuaciones algebraicas.
- 7- Calculo de temperaturas, flujos de calor y demás variables.

2.4.2. Condición inicial

Si la ecuación es dependiente del tiempo ($aT/at \neq 0$), debe ser conocida, además de las condiciones de contorno, la distribución de la temperatura $\vartheta(x_1, x_2, x_3, 0)$ en el instante inicial $t=0$:

$$T(x_1, x_2, x_3, 0) = \varnothing(x_1, x_2, x_3) \quad (11)$$

2.4.3. Método de Rayleigh-Ritz

Según Tirupathi&Ashok (1999) En medios continuos, puede usarse la energía potencial total Π

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_V \sigma^T \epsilon dV - \int_V u^T T dS - \sum_i u_i^T P_i \quad (12)$$

para encontrar una solución aproximada. El método de Rayleigh-Ritz implica la construcción de un campo de desplazamiento supuesto, digamos:

$$u = \sum a_i \phi_i(x, y, z) \quad i = 1 \text{ a } l \quad (13)$$

$$v = \sum a_j \phi_j(x, y, z) \quad j = l + 1 \text{ a } m \quad (14)$$

$$w = \sum a_k \phi_k(x, y, z) \quad k = m + 1 \text{ a } n \quad ; \quad n > m > l \quad (15)$$

Las funciones ϕ_i usualmente son polinomios. Los desplazamientos u , v y w deben ser cinemáticamente admisibles. Es decir, u , v y w deben satisfacer condiciones de frontera específicas. Introduciendo relaciones esfuerzo-deformación unitaria y deformación unitaria-desplazamiento, y substituyendo estas ecuaciones en la ecuación Π , resulta:

$$\Pi = \Pi(a_1, a_2, \dots, a_n) \quad (16)$$

Donde r = número de incógnitas independientes. Ahora, el extremo con respecto a a_i ($i=1$ a r) da el conjunto de r ecuaciones

$$\frac{\partial \Pi}{\partial a_i} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, r \quad (17)$$

2.4.4. Método de Galerkin

El método de Galerkin tal como lo describen Tirupathi&Ashok (1999) usa el conjunto de ecuaciones gobernantes en el desarrollo de una forma integral. Usualmente se presenta como uno de los métodos de residuos pesados (o ponderados). Para nuestro análisis, consideremos una representación general de una ecuación gobernante sobre una región V :

$$Lu = P \quad (18)$$

Los métodos aproximados consisten en hacer igual a cero el residuo relativo a una función pesada W_i .

$$\int_V W_i (L\tilde{u} - P) dV = 0 \quad i = 1 \text{ a } n \quad (27)$$

La selección de la función pesada W_i conduce a varios métodos de aproximación. En el método Galerkin, las funciones pesadas W_i se escogen a partir de las funciones base usadas para construir \tilde{u} . Representemos \tilde{u} por

$$\tilde{u} = \sum_{i=1}^n Q_i G_i \quad (19)$$

Donde G_i , $i: 1$ a n , son funciones base (usualmente polinomios de x , y y z). Se escogen las funciones pesadas como una combinación lineal de las funciones base G_i . Específicamente considere una función arbitraria ϕ dada por

$$\phi = \sum_{i=1}^n \phi_i G_i \quad (20)$$

Donde los coeficientes ϕ_i son arbitrarios, excepto que se requiere que ϕ satisfaga condiciones de frontera homogéneas (cero) \tilde{u} se prescriba. El hecho de que la ϕ anterior se construya de manera similar a \tilde{u} en la ecuación \tilde{u} , conduce a derivaciones simplificadas en capítulos posteriores.

El método de Galerkin puede enunciarse como sigue:

“Escogemos las funciones base G_i . Determinamos los coeficientes Q_i en

$$\tilde{u} = \sum_{i=1}^n Q_i G_i \quad (30) \text{ tales que } \int_V \phi (L\tilde{u} - P) dV = 0 \quad (21)$$

$$\text{Para toda } \phi \text{ del tipo } \phi = \sum_{i=1}^n \phi_i G_i, \quad (22)$$

donde los coeficientes ϕ_i son arbitrarios, excepto por el requisito de que ϕ debe satisfacer condiciones de frontera homogéneas (cero). La solución de las ecuaciones resultantes para Q_i da entonces la solución aproximada para \tilde{u} .

2.4.5. Principio del trabajo virtual

Un cuerpo está en equilibrio si el trabajo virtual interno es igual al trabajo virtual externo para todo campo de desplazamiento cinemáticamente admisible $(\phi, \epsilon(\phi))$ tomado de Tirupathi & Ashok (1999). Elementos finitos en dos dimensiones Ecuación cuasi armónica en dos dimensiones:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + Q = 0 \quad (23)$$

Esta ecuación gobierna el fenómeno de conducción de calor, donde ϕ es la temperatura (incógnita a determinar), k_x y k_y son la conductividad en las direcciones x e y respectivamente y Q el calor interno generado.

Condiciones de contorno:

- A) El valor de la incógnita debe ser especificado en los puntos nodales en el contorno:

$$\phi = \phi_p \quad (24)$$

Matemáticamente, este es llamado "Condición de contorno de Dirichlet".

- B) Se requiere que la carga de contorno exista de la forma

$$k_x \frac{\partial \phi}{\partial x} L_x + k_y \frac{\partial \phi}{\partial y} L_y + q + \alpha (\phi - \phi_a) = 0 \quad (25) ; \text{Tales que } \vec{q} = -k \vec{\nabla} T q_s = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (26)$$

Caso isotrópico $k_x = k_y = k \rightarrow k \frac{\partial \phi}{\partial n} + q + \alpha (\phi - \phi_a) = 0$ Cauchy (27)

$$\left. \begin{array}{l} \text{Para } q = \alpha = 0 \rightarrow \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \\ \text{Para } \alpha = 0 \rightarrow k \frac{\partial \phi}{\partial n} = -q \\ \text{Para } q = 0 \rightarrow k \frac{\partial \phi}{\partial n} = -\alpha (\phi - \phi_a) \text{ Convección} \end{array} \right\} \text{Neumann (28)}$$

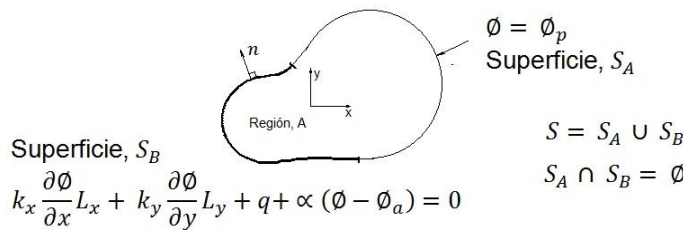


Figura 6 Condiciones de contorno

2.4.6 Métodos de elementos Finitos y la conducción de calor

Tomemos el caso simple de conducción de calor unidimensional de calor en una pared homogénea sin generación interna de calor. Si consideramos a k (Ley de Fourier) como constante, se tiene:

$$dT = -\frac{q}{k} dx \quad (29)$$

"La cantidad de calor transmitida a través de una unidad de superficie es directamente proporcional al coeficiente de conductividad térmica y a la diferencia de temperatura ΔT que existe en los extremos de la pared, e inversamente proporcional al espesor de la pared" por lo que sí es régimen estacionario, q es constante en cada sección, tendremos:

$$T(x) = T_1 - \left(\frac{T_1 - T_2}{L} \right) x \quad (30)$$

Es decir, que la temperatura en una pared homogénea varía linealmente si el coeficiente de conductividad térmica es constante. Aunque esto no siempre sucede, pues existe una fuerte dependencia de la conductividad térmica con la temperatura y, por ende, con x.

2.4.7. Matriz de rigidez y vector de fuerza aplicada elementales

Aplicando el este método a un proceso de transferencia de calor y en dos dimensiones, se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones, del cual se basara el simulador del proceso analizado:

$$\sum_{j=1}^n K_{ij} \phi_j = f_i \mathbf{K} \boldsymbol{\phi} = f_i K_{ij} = C_{ij} \quad (31)$$

$$K_{ij} = \int_A \left[k_x \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + k_y \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right] dA + \alpha \int_{S_B} N_i N_j dS \quad (32)$$

$$f_i = \int_A Q N_i dA - \int_{S_B} (q - \alpha \phi_a) N_i dS + X_i \quad (33)$$

Discretizando se obtiene:

$$\Delta = \begin{bmatrix} 1 & u_i & u_i \\ 1 & u_j & u_j \\ 1 & u_m & u_m \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$K_{ii}^{x,y} = 1 \quad ; \quad K_{ij}^{x,y} = K_{ji}^{x,y} = 0 \quad \forall j \neq i \quad (35)$$

$$\text{Sistemas lineales:} \quad \mathbf{K}^{-x} \underline{x} = \underline{p} \mathbf{K}^{-y} \underline{y} = \underline{q} \quad (36)$$

2.4.8. Primeros pasos en el desarrollo del modelo

El primer paso en el trabajo con MEF es el diseño de la estructura para realizar el análisis. Se tendrá en cuenta la mitad de una sección de una barra sólida de 100 mm de diámetro y la sección de la porción de aire que lo envuelve.

El diseño primitivo de la estructura, que en primer lugar tendrá en cuenta el sólido, será la mitad de la sección circular. A su vez la sección estará dividida según la imagen adjunta, cuyos pasos en la línea horizontal serán de 10 mm. Por último, las sub áreas resultantes (triángulos) son limitadas por diagonales, necesarias para realizar los cálculos en dos dimensiones.

La estructura se presenta en dos dominios distintos por un lado el Plano ξ que presenta la configuración nombrada y por el otro lado el dominio denominado Plano W resultante de aplicar las propiedades matemáticas correspondientes para transformar y simplificar las ecuaciones de cálculo lineales.

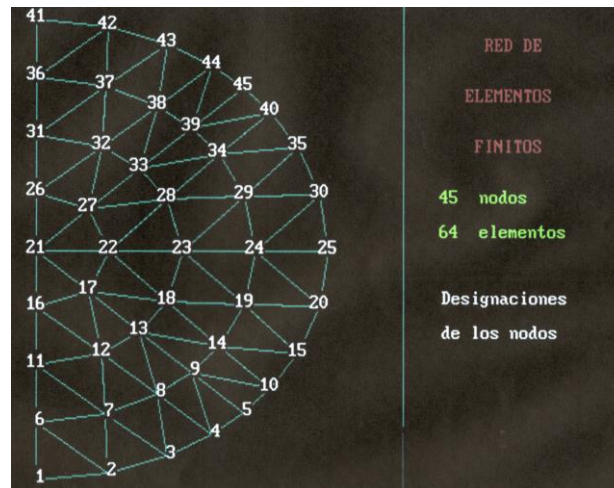


Figura 9 Malla de nodos

3. RESULTADOS

El desarrollo de un modelo para la simulación del normalizado de acero IRAM 4340 requiere del conocimiento de varios aspectos. Por un lado el análisis del proceso de transformación del acero tomando en cuenta la evolución de la transformación en el transcurso del tiempo y en función a la temperatura. Para el análisis de la variación de la temperatura en el proceso de enfriamiento se utilizaron métodos numéricos finitos. En este caso se aplicaron los conceptos teóricos y prácticos del método de Galerkin a un ejemplo simplificado de la realidad.

La validación y ajuste del modelo fue realizado con mediciones realizadas en la instalación industrial mediante la cámara termográfica avanzada SKF TMTI 2.

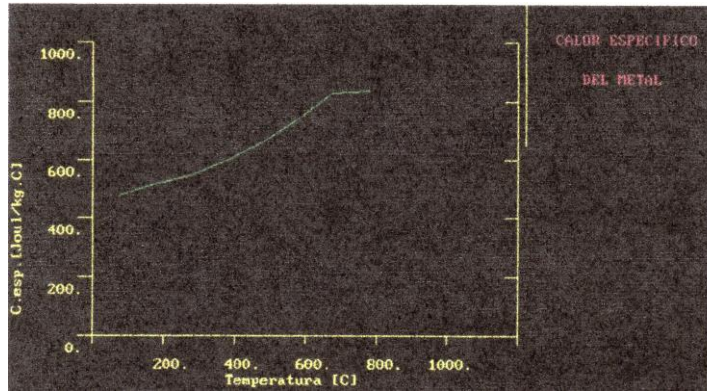


Figura 10 Calor específico del metal

Exteriormente la barra que inicialmente está a 900°C al enfriamiento en aire desde 80°C a 29°C, y el coeficiente de transmisión de calor por convección variable según la zona de enfriamiento.

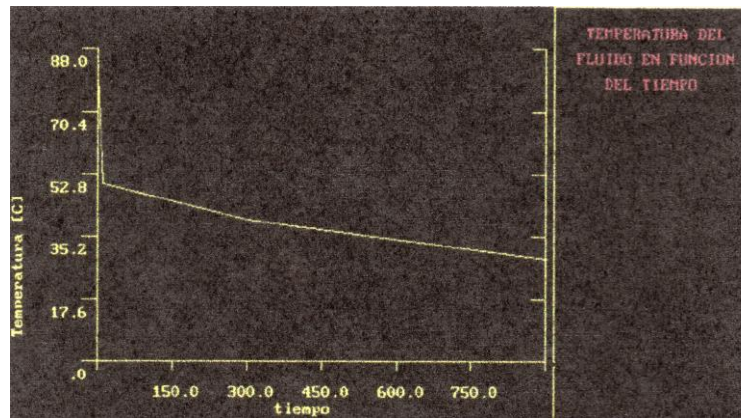


Figura 11 Temperatura del fluido en función del tiempo

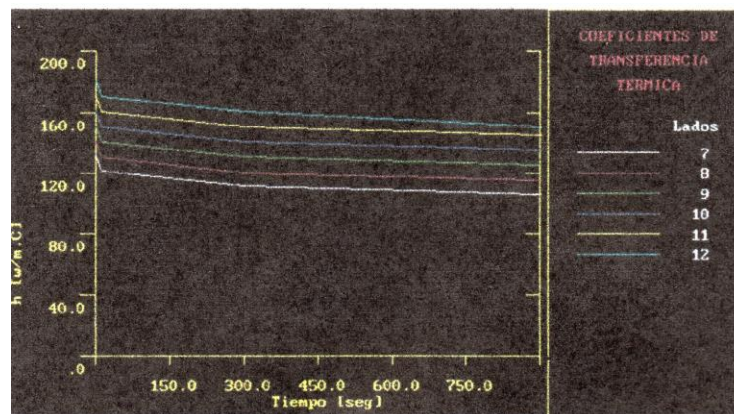


Figura 13 Coeficientes de transferencia térmica

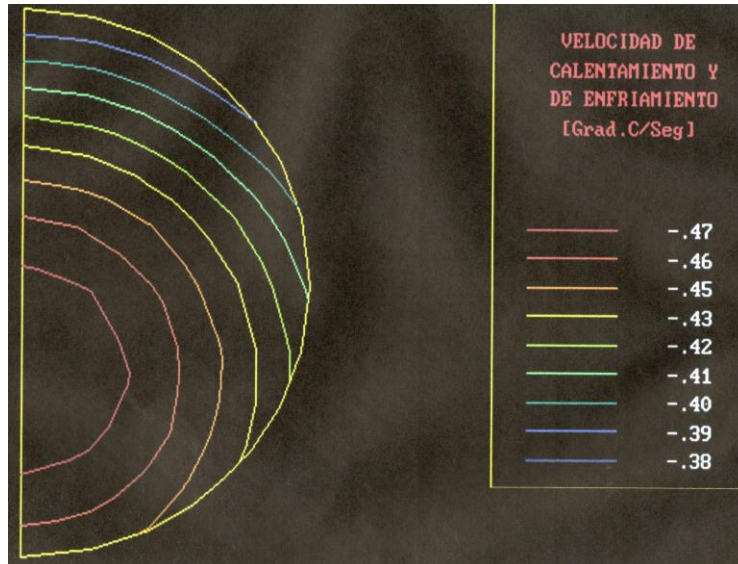


Figura 15 Velocidades de calentamiento y enfriamiento

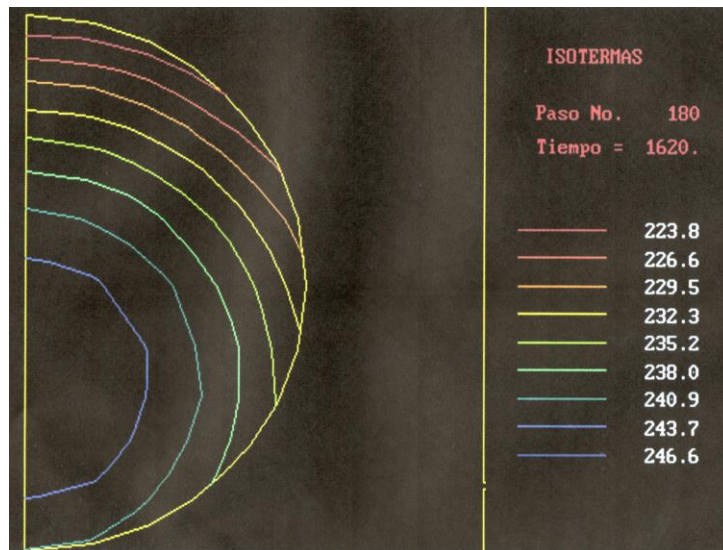


Figura 16 Isothermas

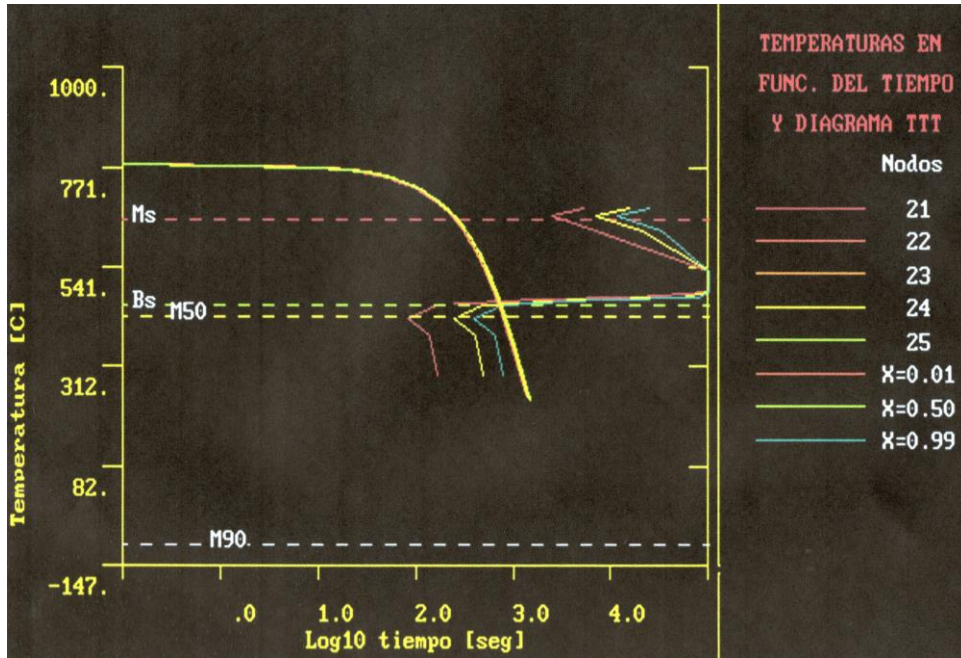


Figura 19 Temperatura en función del tiempo frente a la curva TTT

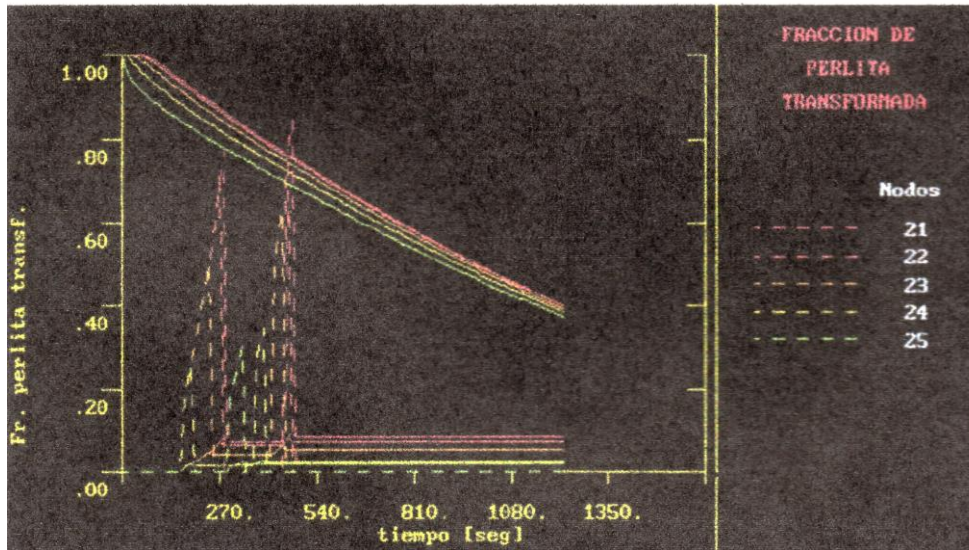


Figura 20 Fracción de perlita transformada

4. CONCLUSION

Se plasmaron los principales conceptos para el desarrollo del modelo simplificado. Se aplicaron estos conceptos a un ejemplo práctico y se realizaron ajustes. Este modelo permitió incluir todas las variables del proceso y nos brindó información con un bajo porcentaje de error con respecto a la realidad sobre las sucesivas transformaciones durante el normalizado de la barra. Esto permitió verificar el correcto funcionamiento y haber desarrollado una herramienta que permite verificar y optimizar la operación de la cama de enfriamiento. La validación y ajuste del modelo fue realizado con mediciones realizadas en la instalación industrial mediante la cámara termográfica avanzada SKF TMTI 2.

Con esta herramienta será posible programar y controlar el funcionamiento de la cama de enfriamiento para distintos tipos de aceros y diferentes diámetros optimizando el proceso de enfriamiento.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Chandrupatla, Tirupathi; Belegundu, Ashok. (1999). *Introducción al estudio del elemento finito en ingeniería*. Mexico. Prentice Hall.
- [2] Anderson, Tanehill & Pletcher. (1976). *Computational fluid mechanics and heat transfer*
- [3] Jakobsson & Ghajar. (1987). *Numerical Solutions of heat conduction and simple fluid flow problems*.
- [4] Perry. (1999) *Chemical Engineer Handbook*. 7° Edición.
- [5] Garrera R., El postulado del continuo *uv.frc.utn.edu.ar imem 2013*
- [6] Smith, 2004, Fundamentos de la ciencia e ingeniería de los materiales]

6. AGRADECIMIENTOS

Agradecer en primer lugar a la UTN, Facultad Regional Córdoba, por la excelente formación profesional y humana brindada, tanto en la carrera de Ingeniería Industrial, como en los Trabajos de Investigación realizados hasta el momento. Además expresar mi gratitud al cuerpo directivo del Grupo UTN GICAPP por los aportes y la incansable paciencia.