

## Oxidación óptima de alambrones de acero de bajo carbono, durante el enfriamiento a la salida de un laminador de barras<sup>(\*)</sup>

C. Camurri\*, O. Candia\* y S. Hermosilla\*\*

**Resumen** Las crecientes exigencias medioambientales exigen que la remoción de óxidos de los alambrones de acero para posterior trefilación se efectúe por medios mecánicos, reemplazando así el tradicional y contaminante decapado. En tal sentido, el objetivo del presente trabajo es determinar las condiciones operacionales en el enfriamiento a la salida del laminador de barras, tales que produzcan un pequeño aumento en la cantidad de óxido total en alambrones de acero de bajo carbono de 5,5 mm de diámetro, a valores óptimos que permitan una adecuada limpieza mecánica previa al trefilado. Adicionalmente, simular, mediante el método explícito de las diferencias finitas, la distribución de temperaturas de esos mismos alambrones, durante el enfriamiento. Se obtiene una buena correlación modelo-experiencia, con diferencias para la temperatura que no sobrepasan el 4 % entre ambos. Por otro lado, se encuentra que, retardando el enfriamiento con agua, se logra incrementar el óxido a los valores promedio exigidos del 0,7 % en peso.

**Palabras clave** Alambrones. Enfriamiento. Porcentaje de óxido. Limpieza mecánica.

### Optimal oxidation of low carbon steel wire rod during cooling at the exit of a bar mill

**Abstract** The increasing environmental exigencies demand that the oxide removal of steel wire rod before drawing is carried out by mechanical means, replacing the traditional descaling, which is polluting. In such sense the objective of the present work is to settle down the operational conditions during the cooling of low carbon steel wire rod of 5.5 mm in diameter in order to have a minimum increase in the amount of rod oxide, so that it is more easily removable by mechanical cleaning before drawing. An additional objective is to simulate by means of the explicit finite differences method the temperature distribution of these wire rod during cooling. A good correlation model-experience is obtained, with temperature differences that do not exceed 4 %. On the other hand it is found that slowing water cooling is results in an increase of the total oxide to values averaging 0.7 % in weight, as specified by the drawing industry.

**Keywords** Wire rod cooling. Oxide percent. Mechanical cleaning.

## 1. INTRODUCCIÓN

Todos los productos obtenidos por laminación en caliente a escala industrial presentan una capa de óxido superficial que debe ser eliminada si, posteriormente, el material va a ser conformado en frío. Es lo que sucede con los alambrones de acero laminados en caliente antes de poder trefilarlos. La remoción de óxidos puede efectuarse por métodos químicos o mecánicos. La limpieza química o decapado se realiza introduciendo el alambroón, durante un cierto tiempo, en una solución de ácido sulfúrico

o clorhídrico. Sin embargo, este método es altamente contaminante, por lo que las exigencias medioambientales han impuesto, en los últimos años, una limpieza de tipo mecánico o decalaminado, consistente en flectar el alambroón, sucesivamente, en diferentes direcciones, previamente al inicio de la trefilación. Un rol muy importante en la eficiencia del decalaminado lo desempeña el tipo de óxido presente y su adherencia. Por ejemplo, una alta proporción de monóxido de hierro, extremadamente duro, induce a que el óxido residual, después del decalaminado, tienda a incrustarse en el

(\*) Trabajo recibido el día 5 de abril de 2001 y aceptado en su forma final el día 25 de febrero de 2002.

(\*) Departamento de Metalurgia, Universidad de Concepción, Casilla 53-C, Concepción-Chile.

(\*\*) Laminador de Barras, Compañía Siderúrgica de Huachipato, Casilla 12-D, Talcahuano-Chile.

alambre durante la trefilación, favoreciendo la ruptura en las últimas matrices<sup>[1 y 2]</sup>. En cuanto a la adherencia, sabido es que ésta disminuye al aumentar el espesor de la capa de óxido superficial. Por ejemplo, se ha demostrado que, en el caso del hierro, la adherencia cae desde 100 a 16 kg/cm<sup>2</sup> cuando el espesor de capa de óxido crece de 90 a 325  $\mu\text{m}$ <sup>[3 y 4]</sup>.

En relación a este último aspecto, se plantea el presente trabajo, cuyo objetivo principal es determinar las condiciones operacionales en el enfriamiento a la salida del laminador de barras, tales que produzcan un aumento en la cantidad de óxido total del alambón, del actual 0,5 %, en peso, a valores del 0,7 % en peso promedio, determinado como óptimo por la industria trefiladora para una adecuada limpieza mecánica previa al trefilado<sup>[5]</sup>. Para cumplir con el objetivo, se modelará y validará la distribución de temperaturas de alambrones de acero de bajo contenido de carbono, calidad SAE 1021, de 5,5 mm de diámetro, durante el enfriamiento a la salida del laminador de barras de la Compañía Siderúrgica de Huachipato (CSH), etapa en la cual se produce la mayor generación de óxido. Adicionalmente, se establecerán las modificaciones en las actuales condiciones operacionales durante dicho enfriamiento, tales que generen porcentajes de óxido del orden del 0,7 % en peso.

La materia prima para el laminador de barras la constituyen palanquillas, de colada continua con secciones únicas de 150 x 150 mm y largos variables entre 6.100 y 6.700 mm, con un peso aproximado de 1.170 kg.

El esquema productivo del laminador de barras se puede separar en tres etapas: el horno de calentamiento de palanquillas, la laminación propiamente dicha y el enfriamiento controlado a la salida del laminador. El proceso comienza con la carga de un paquete de palanquillas en la "Rampa de Carga" para su inspección y posterior introducción al "Horno de Palanquillas".

La temperatura requerida de laminación se encuentra alrededor de los 1.100 °C y se consigue manteniendo una temperatura de bóveda formada por las zonas de calentamiento y de empape de 1.250 °C.

Posteriormente, la palanquilla penetra en la zona de laminación. Esta línea o "Tren de Laminación" (BGV) está formada por el tren de desbaste, tren intermedio y tren de terminación.

El procedimiento de desbaste es la primera etapa de laminación a la que se somete la palanquilla, y lo componen 6 stands o cajas de laminación. El

tren intermedio y terminador, están formados por 10 stands de laminación, cada uno. La velocidad del alambón a la salida del BGV es de 75 m/s.

El efecto de las variables que se controlan en el horno de calentamiento de palanquillas, es influenciado y/o modificado en la etapa siguiente de laminación. Ésto hace que sea trabajoso y delicado asignar resultados a modificaciones llevadas a cabo en el horno. A su vez, en la sección de laminación propiamente dicha, intervienen variables operacionales difíciles de controlar, haciendo que esta etapa sea prácticamente una caja negra. Por las razones anteriores, se decidió actuar solamente en la zona de enfriamiento de la barra, a efecto de realizar los cambios operacionales necesarios para incrementar la cantidad de óxido total de 0,5 a 0,7 %.

### 1.1. Enfriamiento controlado del alambón

El proceso comienza cuando la barra se sitúa en los canales de traspaso provenientes del stand n° 26 (tren de acabado) y finaliza cuando se ha formado el rollo de alambón en el "Foso Formador de Rollo" (FR).

Dentro del enfriamiento, existen dos etapas muy diferentes entre sí que corresponden a dos formas diferentes de enfriar el alambón. En la primera etapa se forma, prácticamente, la totalidad del óxido, por la alta temperatura del alambón y el enfriamiento es con agua mientras que, en la segunda etapa, el enfriamiento se realiza con aire. Ambas partes están separadas físicamente por el cabezal formador de espiras (CFE), como se señala en la figura 1.

El enfriamiento con agua puede efectuarse con tres "Módulos de Enfriamiento Controlado" que permiten bajar la temperatura del alambón hasta la requerida para la formación de la espira. Cada módulo está formado por cámaras de enfriamiento y su disposición en los módulos es la siguiente:

- Módulo 1-M1: cinco cámaras
- Módulo 2-M2: cuatro cámaras
- Módulo 3-M3: cuatro cámaras

Por medio de cada una de estas cámaras entra agua al módulo. A su vez, cada cámara es activada o desactivada, de forma independiente, por medio de válvulas automáticas desde la sala de control central del laminador. Para cada válvula de control existen, sólo, dos opciones: estar completamente abierta o permanecer cerrada. Más detalles operacionales pueden consultarse en la Tesis de Candia<sup>[5]</sup>.

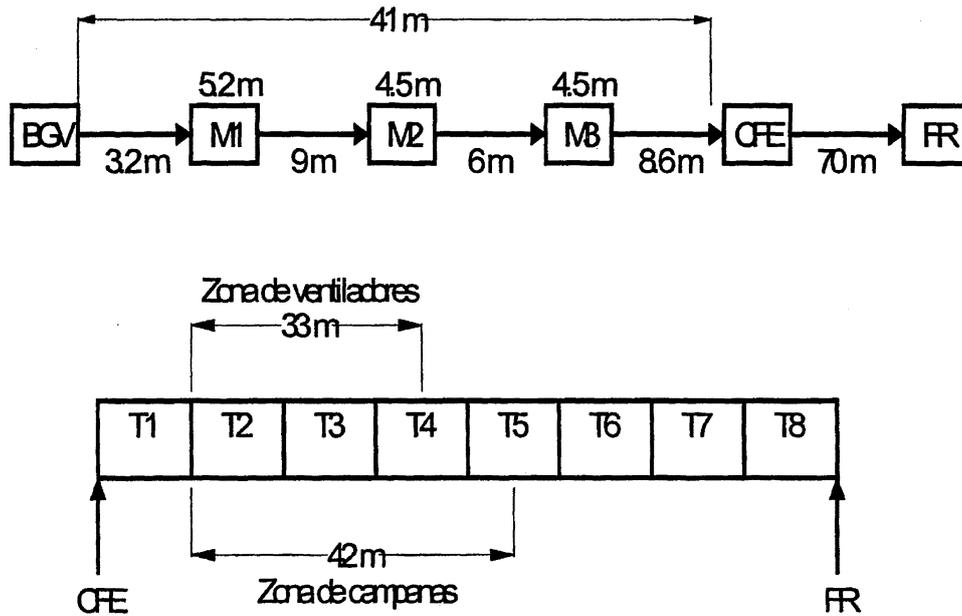


Figura 1. Representación esquemática del enfriamiento con agua y detalle del tapete transportador de espiras.

Figure 1. Schematic representation of the cooling with water and details of the coil conveyor.

El cabezal formador de espiras las deposita en el “Tapete de Enfriamiento” de espiras, el cual las transporta hacia el “Foso de Rollos”, donde el rollo se compacta y amarra para entregar a los clientes.

El tapete de enfriamiento de espiras consiste en un camino dividido en 8 secciones o tramos con distintas velocidades, donde se encuentran, además, 10 ventiladores que permiten acelerar el proceso de enfriamiento, y 14 campanas abatibles que provocan el efecto contrario. En esta etapa del proceso, se confieren al material las características mecánicas y metalúrgicas finales.

El control de la temperatura se efectúa a la salida del laminador y en el cabezal formador de espiras. El control consiste en mantener la temperatura dentro de un rango previamente determinado. Para el caso de alambrones de 5,5 mm de diámetro, calidad SAE 1021, éstas son:  $T_{\text{salida BGV}}$  entre 1.000 y 1.080 °C y  $T_{\text{CFE}}$  entre 870 y 890 °C.

## 2. DESARROLLO

### 2.1. Modelo de transferencia de calor

A continuación, se describe el modelo fenomenológico de transferencia de calor que describe la distribución de temperaturas en el alambroón mientras pasa por toda la primera zona de enfriamiento del

laminador de barras de la CSH, esto es, desde la salida del stand 26 hasta el cabezal formador de espiras, como se señala en la figura 1.

De la ecuación de transferencia de calor en coordenadas cilíndricas se tiene:

$$\rho C_p v_z \frac{\partial T}{\partial z} = k \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (1)$$

con,

$$T = T(r, z), \quad \text{ya que, } z = v_z t \\ v_z \neq 0; \quad v_r = v_\theta = 0$$

donde  $r$ ,  $\theta$  y  $z$  son las coordenadas del alambroón en dirección radial, circunferencial y longitudinal, respectivamente, y  $t$ , es el tiempo.

La contribución de la conducción axial del calor en la dirección de laminación,  $z$ , es irrelevante frente a la convección en la misma, debido a la alta velocidad del alambroón. En efecto, para  $D = 5,5$  y  $v_z = 75 \text{ ms}^{-1}$  el cálculo del número de Peclet <sup>[6]</sup> proporciona,

$$Pe = \frac{Lv_z \rho C_p}{k} = \frac{Lv_z}{\alpha} = \frac{6 \cdot 75}{21,8 \cdot 10^{-6}} = 2,1 \cdot 10^7$$

donde,

L = longitud característica, supuesta 6 metros, correspondiente a la distancia entre el BGV y el CFE dividida entre 7 (zonas de transferencia de calor).

$v_z$  = velocidad del alambón.

$\rho$  = densidad.

$C_p$  = calor específico.

$k$  = conductividad térmica.

$\alpha$  = difusividad térmica

Luego la ecuación a resolver es :

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{k}{\rho C_p v_z} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right] \quad (2)$$

con las siguientes condiciones inicial y de bordes,

$T(R, 0)$  = conocida, a la salida del laminador (BGV).

$$\frac{\partial T}{\partial r}(r=0) = 0, \text{ por simetría.}$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial r}(r=R) \begin{cases} 0, \text{ para el enfriamiento al aire (se desprecian las pérdidas calóricas al aire).} \\ h(T_s - T_{H_2O}), \text{ para el enfriamiento convectivo en los módulos de enfriamiento.} \end{cases}$$

con,

$h$  = coeficiente de transferencia convectivo superficie alambón-agua en zona de módulos.

$R$  = radio del alambón = 2,25 mm.

$T_s$  = temperatura superficial del alambón.

$T_{H_2O}$  = temperatura del agua en la zona de enfriamiento.

La ecuación diferencial parcial (Ec. 2), se resuelve, en este trabajo, mediante el método explícito de las diferencias finitas, con incrementos axiales  $\Delta z = 0,1$  m y radiales  $\Delta r = 0,6$  mm. Como es tradicional, en estos casos, deben encontrarse algoritmos para los nodos internos y para los nodos en los bordes ( $r = 0$  y  $r = R$ ).

Por ejemplo, para los nodos internos y para el nodo en el centro del alambón, se obtienen las fórmulas de recurrencia (3) y (4), respectivamente [7].

$$T_{n,m+1} = T_{n,m} + \frac{1}{v_z} \frac{k}{\rho C_p} \frac{\Delta z}{(\Delta r)^2} \left[ \frac{\Delta r}{r} (T_{n+1,m} - T_{n,m}) + T_{n+1,m} - 2T_{n,m} + T_{n-1,m} \right] \quad (3)$$

$$T_{1,m+1} = T_{1,m} + \frac{1}{v_z} \frac{k}{\rho C_p} \frac{2\Delta z}{(\Delta r)^2} (T_{2,m} - T_{1,m}) \quad (4)$$

con,  $n$  y  $m$  = números que identifican al nodo, en sentido radial y axial, respectivamente ( $n=1$ , corresponde al centro del alambón y  $m = 1$ , corresponde a la sección a la salida del BGV).

Al comienzo del enfriamiento (salida del BGV), la temperatura medida en la superficie del alambón es de 1.000 °C mientras que, en el centro, puede asimilarse a la temperatura de laminación, sensiblemente igual a 1.100 °C. Entre ambas se supuso, en este trabajo, una distribución parabólica de temperatura.

En cuanto al coeficiente de transferencia convectivo en la zona de módulos enfriados con agua, si bien varía con la posición, puede considerarse un valor medio de 8.000 J/s·m<sup>2</sup> °C, de acuerdo a la evidencia experimental [9].

El modelo se aplicará para determinar la distribución de temperaturas del alambón entre el BGV y el CFE para dos condiciones de enfriamiento. La actual de la CSH, consistente en operar sólo con el módulo 2, que conduce al insuficiente porcentaje en peso de óxido, del orden del 0,5 %, y la propuesta en este trabajo que considera operar, sólo con el módulo de enfriamiento 3. En efecto, al retardar el enfriamiento del alambón, es decir, al mantenerlo más tiempo a alta temperatura se espera que el porcentaje de óxido deba incrementarse.

Para ambos enfriamientos, el actual y el propuesto, se dividirá la zona de transferencia en tres zonas: antes de entrar a los módulos (homogeneización de temperatura sin pérdidas al ambiente); después la zona de los módulos 2 ó 3 (con pérdidas convectivas al agua) y, finalmente, la zona entre el módulo correspondiente y el CFE (homogeneización de temperaturas sin pérdidas al ambiente).

## 2.2. Medición experimental del porcentaje de óxido

La medición experimental del porcentaje de óxido se realiza por diferencia de peso entre muestras de alambón oxidado y las correspondientes libres de

óxido. Éstas, se obtienen por inmersión de la muestra de alambón en una solución de ácido clorhídrico durante un tiempo determinado. Trabajos previos<sup>[5]</sup>, establecieron que un tiempo de 30 min es suficiente para disolver totalmente el óxido, si la concentración del ácido se mantiene en el rango 10-50 % vol. HCl.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Modelación matemática de la transferencia de calor

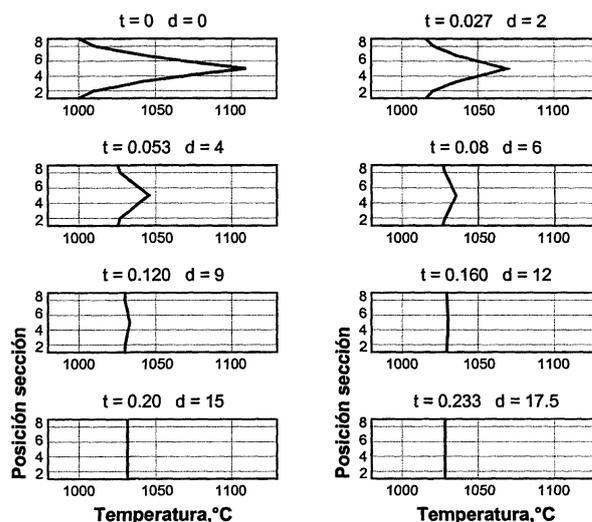
Las figuras 2 y 3 señalan la distribución de temperaturas del alambón entre la salida del BGV y la entrada de los módulos 2 ó 3, respectivamente (según se trate del proceso actual o la modificación propuesta). El tiempo,  $t$ , que aparece en las figuras, está en segundos;  $d$ , es la distancia en metros desde la salida del BGV y, el número en las abscisas es el número del nodo en la sección del alambón.

En ambas figuras se observa una rápida homogeneización de la temperatura, dada la alta conductividad térmica,  $k$ , del acero. La temperatura se hace, prácticamente, constante e igual a los 1.030 °C, a los 14 m del BGV, tardándose 0,187 s en alcanzar esa condición. Como consecuencia de ello, la temperatura de entrada a los módulos 2 ó 3 es la misma, en ambos casos. En cuanto al óxido formado al enfriar con el módulo 3, se tiene más tiempo el alambón a alta temperatura, en relación a un enfriamiento con el módulo 2, lo que debe reflejarse en diferencias entre los porcentajes de óxidos respectivos, tal y como se señala en la sección 3.2.

La figura 4 muestra la distribución de temperatura del alambón dentro de la zona de enfriamiento en los módulos. Nótese que esta distribución es la misma, sea con el proceso actual (sólo módulo 2) o con el propuesto (sólo módulo 3), por cuanto como se señaló, la temperatura de entrada uniforme es la misma, 1.030 °C. En este caso  $t$  y  $d$  se miden desde la entrada al módulo respectivo.

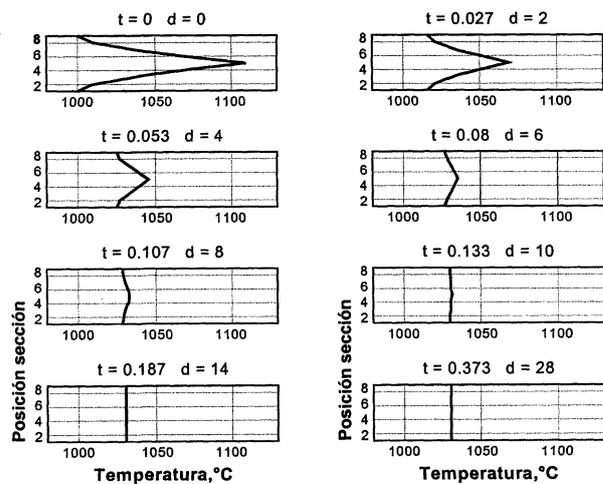
En la figura 4 se aprecia la magnitud de los gradientes de temperatura en la sección del alambón, producto del enfriamiento con agua. En particular, hay una diferencia de 230 °C entre la temperatura de superficie y del centro del alambón, a la salida de los módulos.

En las figuras 5 y 6 se muestra la distribución de temperaturas del alambón en la zona comprendida entre la salida de los módulos 2 ó 3, respectiva-



**Figura 2.** Distribución de la temperatura con el tiempo en una sección del alambón en el enfriamiento al aire, antes de ingresar al módulo 2 (módulo 1 cerrado).

*Figure 2. Temperature distribution with time in a wire rod section during air cooling before entering module 2 (module 1 closed).*

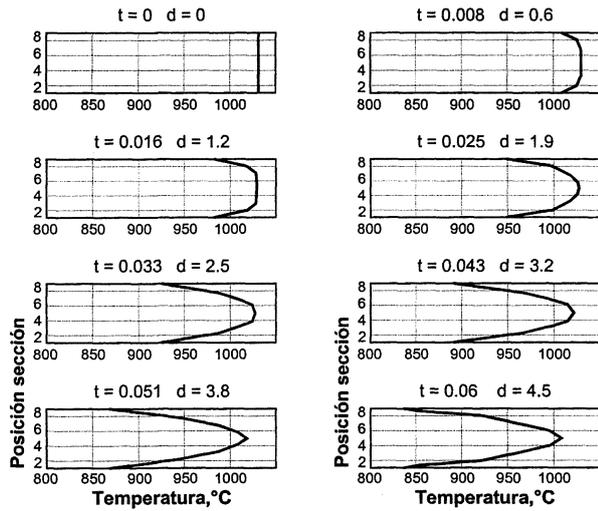


**Figura 3.** Distribución de la temperatura con el tiempo en una sección del alambón en el enfriamiento al aire, antes de ingresar al módulo 3 (módulos 1 y 2 cerrados).

*Figure 3. Temperature distribution with time in a wire rod section during air cooling before entering module 3 (modules 1 and 2 closed).*

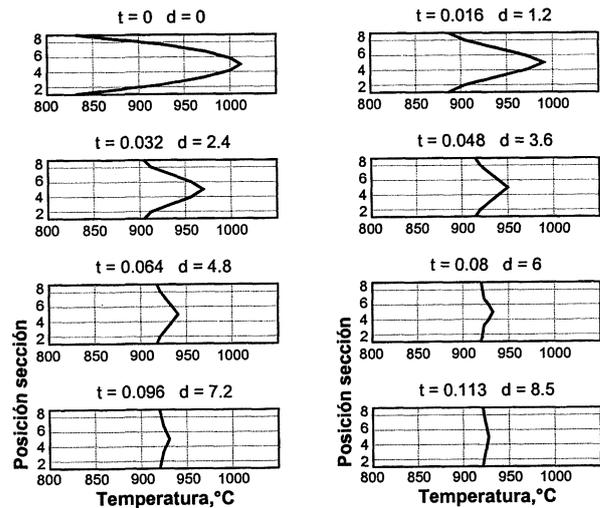
mente, y el cabezal formador de espiras (FE);  $t$  y  $d$  representan el tiempo y la distancia medidos desde la salida del módulo respectivo.

La figura 5 señala que, a 14 m del módulo 2, se produce una homogeneización de la temperatura del alambón, a un valor de 924 °C. En el caso del enfriamiento, sólo con el módulo 3, como la



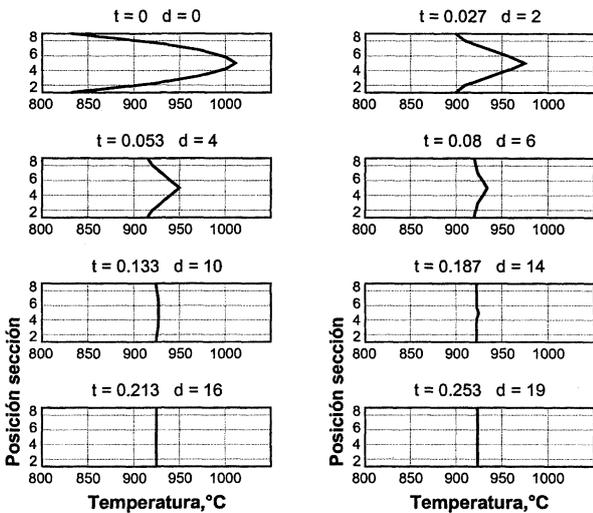
**Figura 4.** Distribución de la temperatura en una sección del alambroón con el tiempo durante el enfriamiento en los módulos (sólo operan módulos 2 o 3).

Figure 4. Temperature distribution with time in a wire rod section during the cooling in modules (only modules 2 or 3 are acting).



**Figura 6.** Distribución de la temperatura con el tiempo en una sección del alambroón en el enfriamiento al aire, después que sale del módulo 3 (sólo opera módulo 3).

Figure 6. Temperature distribution with time in a wire rod section during air cooling after leaving at module 3 (only module 3 is acting).



**Figura 5.** Distribución de la temperatura con el tiempo en una sección del alambroón en el enfriamiento al aire, después que sale del módulo 2 (sólo opera módulo 2).

Figure 5. Temperature distribution with time in a wire rod section during air cooling after leaving at module 2 (only module 2 is acting).

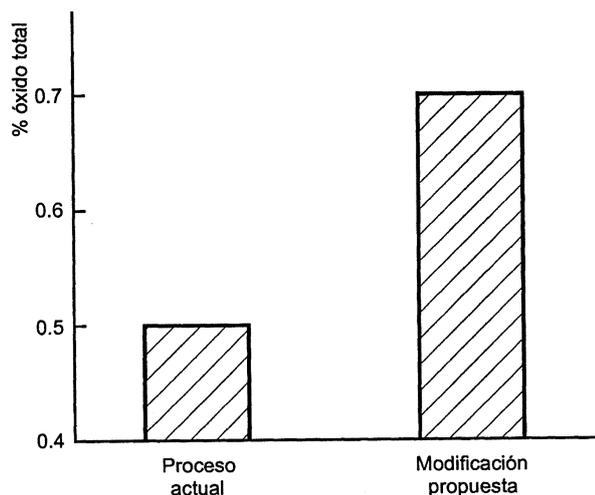
distancia entre éste y el CFE es de 8,5 m, no se alcanza una completa uniformidad en la temperatura del alambroón, como se aprecia en la figura 6. Sin embargo, los valores son sensiblemente iguales a 925 °C.

### 3.2. Validación del modelo de transferencia de calor

Es importante señalar que, con ambas opciones de enfriamiento, sólo módulo 2 o sólo módulo 3, se obtiene, finalmente, una temperatura del alambroón de 923-925 °C en el cabezal formador de espiras, que se compara muy favorablemente, dada la simplicidad del modelo, con el valor experimental medido de 890 °C, con diferencias de +3,7 %. Los valores en exceso, obtenidos por la modelación, se deben a que, en ésta, se despreciaron las pérdidas al aire en las zonas fuera de los módulos.

### 3.3. Porcentaje de óxido del alambroón

En la figura 7, se indica el porcentaje en peso de óxido en el alambroón, determinado según el procedimiento señalado en la sección 2.2, tanto para el enfriamiento actual como para el propuesto. Se observa, efectivamente, que retardando el enfriamiento del alambroón, efectuándolo solo con el módulo 3, el material queda mayor tiempo a alta temperatura, lo que se traduce en un pequeño aumento en la cantidad total de óxido, suficiente para cumplir con las exigencias de la industria trefiladora.



**Figura 7.** Porcentaje total de óxido antes y después de realizar las modificaciones de enfriamiento propuesto.

*Figure 7. Total percentage of oxide before and after conducting the modifications out to the cooling conditions.*

#### 4. CONCLUSIONES

Se establece un modelo simple que permite conocer la distribución de temperaturas en alambrones de acero de bajo carbono, en el enfriamiento entre la salida del laminador de barras y el cabezal formador de espiras, zona en la que se forma la mayor cantidad de óxido. El modelo simula razonablemente bien dicha distribución de temperaturas, con diferencias de +3,7 % respecto a los valores experimentales medidos en el CFE.

Mediante la simulación, es factible conocer el efecto que producen en el perfil de temperaturas determinadas modificaciones operacionales en la zona de enfriamiento y, como consecuencia de ello, en la cantidad de óxido total formado. Si se desplaza el enfriamiento con agua hacia el cabezal formador de espiras se favorece la formación de óxido. En particular, enfriando sólo con el módulo 3, se logran porcentajes en peso de óxido, de 0,7 %, en comparación con el 0,5 % que se obtiene con el proceso actual que involucra, sólo, al módulo 2. Esa pequeña diferencia en la cantidad de óxido, es suficiente como para lograr una adecuada limpieza mecánica mediante el decalaminado.

#### REFERENCIAS

- [1] G. BERANGER, G. HENRY y G. SANZ, *The Book of Steel*, Ed. Lavoisier Publishing Inc., 1996, Cap. 14.
- [2] G. SAMSONOV, *The Oxide Handbook*, Ed. Plenum, New York, EE.UU., 1982, Cap. 2 y 3.
- [3] G. VAGNARD, *Met. Corros. Ind.* (1965) 479-480.
- [4] P. CHARPENTIER, P. RABBIE y J. MANENC, *Mater. Res. Bull.* (1968) 69-78.
- [5] O. CANDIA, Tesis de Título, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, Chile, 2000.
- [6] DPTO. DE INGENIERÍA MECÁNICA, *Tabla de Gráficos y Correlaciones para Transferencia de Calor*, Universidad de Concepción, Chile, 1999, p. 21.
- [7] I. WILKOMIRSKY, *Transferencia de Calor*, Ed. Universidad de Concepción, Chile, 1996, pp. 10-30.