

Modelación matemática de la evolución de la temperatura en la banda laminada en caliente^(*)

C. Camurri*

Resumen Se construye un modelo matemático simple que describe la evolución de la temperatura de la banda durante su laminación en caliente en el tren continuo acabador. El modelo calcula las temperaturas finales, a la salida de tren continuo acabador de seis cajas y de bobinado. La simulación predice, en modo satisfactorio, el enfriamiento de la banda, con desviaciones de + 6,5 °C para una caída total media de temperatura en las seis cajas, de 150 °C con un error medio del 4,3 %. Para la temperatura de bobinado, la diferencia es de + 9,2 °C para una caída de temperatura media de 240 °C en la mesa de enfriamiento, con un error medio del 3,8 %.

Palabras clave Modelización matemática. Laminación en caliente. Temperatura en el tren continuo. Temperatura de bobinado.

Mathematical model for the strip temperature evolution on a continuous finishing hot mill

Abstract The goal of this work is to construct a mathematical model to describe the strip temperature evolution at a continuous finishing hot rolling mill. The model predicts in a satisfactory way the strip temperature, with a finishing one (exit of stand 6) with a deviation of + 6.5 °C for a mean temperature drop of 150 °C at the continuous finishing hot mill and a mean error of 4.3 %. It also predicts a coiler temperature with a difference of + 9.2 °C for a mean temperature drop of 240 °C in the cooling table and a mean error of 3.8 %.

Keywords Mathematical modelling. Hot rolling. Finishing temperature. Coiling temperature.

1. INTRODUCCIÓN

El laminador terminador continuo en caliente de la Compañía Siderúrgica de Huachipato posee 6 cajas cuarto, como se señala en la figura 1.

Las dimensiones nominales de los cilindros de trabajo son 700 mm de diámetro y 1.730 mm de ancho, y de los de apoyo, de 1.400 y 1.730 mm, respectivamente. El espesor máximo de entrada a la primera caja es de 24 mm y el mínimo a la salida de la sexta de 1,8 mm. Las temperaturas de entrada son del orden de 1.000 - 1.050 °C y las de término de laminación en caliente, de 850 - 920 °C, según sea la composición y el espesor del acero. A la salida de la caja 6, una mesa de enfriamiento permite bajar la temperatura de la banda hasta la adecuada para su bobinado. La mesa contiene 10 secciones de enfriamiento con agua, con flujo laminar. A su

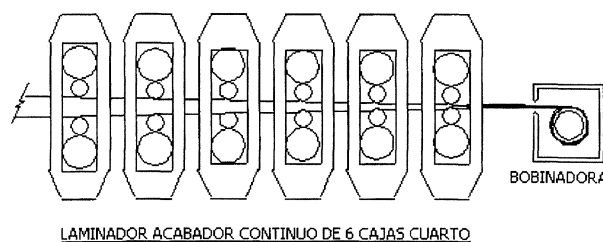


Figura 1. Laminador acabador continuo en caliente.

Figure 1. Continuous finishing hot mill.

vez, cada sección, de 3,66 m de longitud, posee 4 boquillas de agua superiores y 8 inferiores, con flujos de $4,7 \times 10^{-5}$ y 7×10^{-5} m³/s, respectivamente. En la zona superior, las secciones 1 a 3 operan, normalmente, a una presión de 0,035 MPa, las 4 a 6 con una presión de 0,06 MPa y las otras cuatro

(*) Trabajo recibido el día 9 de agosto de 2002 y aceptado en su forma final el día 30 de diciembre de 2002.

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

secciones a una presión de 0,046 MPa. En la zona inferior, la presión de trabajo es de 0,1 MPa. Los controles de temperatura se efectúan a la salida de la caja 6 y a la entrada de la bobinadora.

Las crecientes exigencias de los consumidores en cuanto a calidad y uniformidad de los productos laminados han impulsado a la industria procesadora a optimizar sus esquemas productivos y a utilizar modelos cada vez más ajustados para determinar variables operacionales^[1], entre las que se citan, por ejemplo, esquema de reducciones, abertura y velocidad de rotación de cilindros en cajas en serie y fuerzas entre cuellos de cilindros para lograr un perfil plano en la banda. Todas las variables anteriores se relacionan con la fuerza de laminación dependiente, a su vez, a través del esfuerzo de fluencia, de la temperatura de la banda.

En la literatura existen numerosos modelos al respecto, fundamentalmente mediante diferentes formulaciones de elementos finitos, no siempre de fácil comprensión e interpretación por parte del personal de la industria laminadora. Adicionalmente, los coeficientes de transferencia de calor utilizados y que alimentan a los modelos, por ejemplo, emisividad o coeficientes de transferencia convectivos, normalmente son de valores inciertos, lo que significa que una simulación teóricamente exacta puede desvirtuarse por esa causa. En tal sentido, el objetivo del presente trabajo es construir un modelo fenomenológico simple, cuyos resultados sean de fácil interpretación, que describa la evolución de la temperatura de la banda desde la entrada en la caja 1 hasta la bobinadora, de modo que se puedan simular y prefijar las condiciones operacionales del proceso (velocidad del material, reducción por pase, flujo de agua en boquillas y otras) y, así, obtener las temperaturas de término y de bobinado deseadas para cada composición y espesor de material. Además, los valores de los coeficientes de transferencia de calor utilizados en el modelo se determinarán empíricamente, sobre la base de minimizar las diferencias de temperatura simuladas y experimentales, en un universo de prueba de 100 bandas.

2. MODELACIÓN MATEMÁTICA

Los principales factores que inciden en la temperatura de la banda (Fig. 2) son:

- Conducción de calor desde el interior del acero a la interfaz acero-cilindro.
- Pérdidas por radiación y convección al aire.

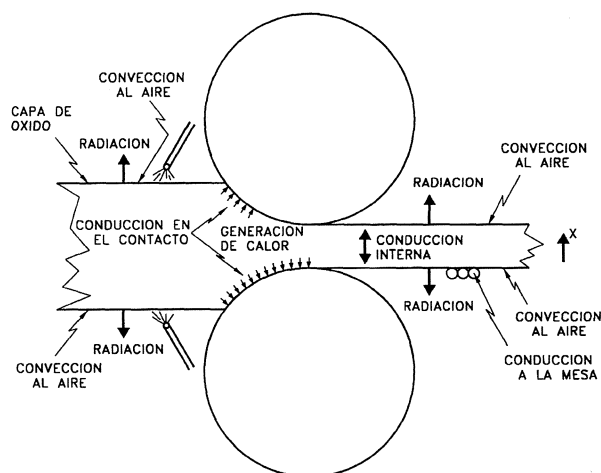


Figura 2. Mecanismos de transferencia de calor en el laminado en caliente.

Figure 2. Heat transfer mechanisms during hot rolling.

- Conducción de calor a los cilindros de trabajo.
- Calor generado por la energía de deformación plástica y la fricción.
- Pérdidas de calor por convección en la mesa de enfriamiento.

A continuación se describen los mecanismos de transferencia de calor señalados, determinándose la variación de temperaturas que producen en la banda.

2.1. Conducción de calor desde el interior del acero a la interfaz banda cilindro

La conducción de calor en la dirección del ancho (deformación plana) y de laminación (altos números de Peclet) puede despreciarse. Por tanto, para la conducción de calor al interior de la banda, se establece la ecuación siguiente:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

considerando, α , k , ρ y c , como difusividad térmica ($\alpha = k/c\rho$), conductividad térmica, densidad y calor específico de la banda, respectivamente.

Resolviendo analíticamente la ecuación (1), es posible calcular el flujo de calor, q , del seno de la banda a la interfaz acero-cilindro, que viene dado por^[2]:

$$q = -k(T - T_c) / (\alpha \pi t)^{0,5} \quad (2)$$

donde, T es la temperatura en el seno de la banda, T_c la temperatura en el contacto banda - cilindro de trabajo, t el tiempo de trabajo y k la conductividad térmica de la banda.

2.2. Pérdidas por radiación y convección al acero

2.2.1. Radiación

Las pérdidas por radiación son importantes en todo el proceso de laminación en caliente. Para calcularlas, se desprecian los flujos laterales y sólo se consideran las caras superiores e inferiores. La banda puede considerarse como un cuerpo gris en un entorno negro, ya que no hay cuerpos reflectantes vecinos. Con tales hipótesis, y realizando un balance de calor tomando una sección de la banda de espesor h , se obtiene la siguiente expresión para la caída de temperatura por radiación, ΔT , de la banda, en un intervalo de tiempo, Δt :^[3]

$$\Delta T = T_1 \left(1 - \left(1 + \frac{6\varepsilon\sigma\Delta t T_1^3}{c\rho h} \right)^{-1/3} \right) \quad (3)$$

siendo,

T_1 , temperatura inicial de la banda

h , espesor de la banda

ε , emisividad de la banda

σ , constante de Stephan-Boltzmann

2.2.2. Convección al aire

El flujo de calor, q_c , cedido por la banda al aire (régimen completamente turbulento, $Re > 5 \times 10^5$), viene dado por:

$$q_c = 0.026 \frac{k_a Re^{0.8}}{L} Pr^{1/3} (T_s - T_a) \quad (4)$$

siendo,

k_a , conductividad térmica del aire.

L , longitud de la banda.

Pr , número de Prandtl del aire.

T_s y T_a , temperatura de la superficie de la banda y del aire, respectivamente.

Re , número de Reynolds del aire.

A partir de un balance calórico, se obtiene la siguiente expresión para la caída de temperatura, ΔT , de la banda, en un intervalo de tiempo, Δt , debido a pérdidas convectivas al aire^[3]:

$$\Delta T = (T_1 - T_a)(1 - \exp(-0.072ka Re^{0.8} Pr^{1/3} \Delta t / C\rho h)) \quad (5)$$

2.3. Conducción de calor a los rodillos de trabajo

Dadas las elevadas presiones de laminación, en esta etapa supondremos perfecto el contacto entre los cilindros de trabajo y la banda y, en consecuencia, el intercambio calórico entre ambos se efectuará sólo por conducción.

La resolución de la ecuación de Fourier, permite evaluar el flujo de calor, q_R , al cilindro, en el contacto banda-cilindro según:

$$q_R = \frac{-k_R (T_R - T_c)}{\sqrt{\pi\alpha_R t}} \quad (6)$$

donde T_R , k_R y α_R son la temperatura, la conductividad térmica y la difusividad térmica del cilindro, respectivamente, y T_c , la temperatura en el contacto banda-cilindro.

A partir de un balance calórico en la zona de deformación, la caída de temperatura ΔT de la banda por conducción a los rodillos es^[3]:

$$\Delta T = \frac{8k_R (T_c - T_R)\Delta h^{1/4}}{\sqrt{\pi\alpha_R v\rho c(h_i + h_f)R^{1/4}}} \quad (7)$$

donde v , velocidad angular de los cilindros

h_i y h_f , espesores de entrada y salida de la caja, respectivamente

Δh , reducción absoluta = $h_i - h_f$

R , radio de los cilindros

La temperatura T_c en el contacto banda-cilindro, puede determinarse a partir de las propiedades físicas y de las temperaturas de los dos cuerpos en contacto^[4], obteniéndose,

$$T_c = \frac{\sqrt{k\rho c T} + \sqrt{k_R\rho_R C_R T_R}}{\sqrt{k\rho c} + \sqrt{k_R\rho_R C_R}} \quad (8)$$

De acuerdo a datos de literatura^[5 y 6], la temperatura, T_R , en el seno de los cilindros se supuso igual a 100 °C.

2.4. Calor generado por la energía mecánica entregada al material

En el laminado de acero en caliente con cilindros del mismo material, alrededor del 50 % de la

fricción generada en la interfaz banda-cilindro, contribuye al calentamiento de la banda (el otro 50 % incrementa la temperatura del cilindro)^[7 y 8]. Adicionalmente, dado el bajo endurecimiento por deformación, la casi totalidad (más del 98 %) de la energía de deformación plástica, tanto en el volumen como en las superficies de discontinuidad, se transforma en calor^[7,8 y 9]. Por ello, en este modelo simple, se considerará que toda la energía mecánica aportada al material se transforma en calor y el correspondiente incremento de temperatura de la banda es^[3]:

$$\Delta T = \frac{1491P\sqrt{\Delta h / R}}{\rho c \sqrt{R\Delta h}(h_i + h_f)\varpi} \quad (9)$$

siendo P, la potencia de laminación expresada en kW. Para calcular la potencia, el momento de laminación se determinó mediante el método del bloque de Sims y, también, mediante el método de líneas deslizantes^[10].

2.5. Pérdidas de calor por convección al agua en la mesa de enfriamiento

Como se señaló en la introducción, las condiciones operacionales en la mesa de enfriamiento dependen, por ejemplo, del espesor y de la composición química del acero de la banda. En el caso de que el enfriamiento se efectúe por una sola cara, realizando un balance de calor en un elemento de la banda, se obtiene una caída de temperatura en ésta, que viene dada por^[3]:

$$\Delta T = (T_1 - T_h)(1 - \exp\left(\frac{-h_c L}{c\rho h f v}\right)) \quad (10)$$

donde,

T_h , temperatura del agua

h_c , coeficiente de transferencia convectivo en la cara superior o inferior de la banda

L, longitud de la zona de enfriamiento (3,66 m)
v, velocidad de la banda.

En caso de que el enfriamiento se efectúe por las dos caras, se reemplaza, en la ecuación (10), h_c por $h_{cs} + h_{ci}$, coeficientes de transferencia convectivos en las caras superior e inferior, respectivamente.

3. PARÁMETROS Y COEFICIENTES USADOS EN LA MODELACIÓN

3.1. Propiedades físicas del acero

En general, las propiedades físicas (densidad, conductividad térmica, calor específico) de los aceros comunes dependen de la temperatura y de la composición química. A partir de datos de bibliografía^[11], tales propiedades se correlacionaron con la temperatura, T, en °C, y el porcentaje de carbono, % C, de la banda, en el modo siguiente:

$$\text{Propiedad} = a_0 + a_1[T] + a_2[\% C] \quad (11)$$

Los valores de las constantes a_0 , a_1 , a_2 y sus coeficientes de correlación se muestran en la tabla I. Dados los buenos resultados obtenidos para la densidad y la conductividad térmica y aceptables para el calor específico no se justifica la búsqueda de una funcionalidad más compleja entre las variables señaladas.

3.2. Factores y coeficientes de transferencia de calor

3.2.1. Factor de emisión

La tabla II muestra valores de emisividad, e, obtenidos de la literatura^[4 y 11-14], para aceros laminados en caliente.

Dada la gran dispersión en los datos obtenidos para el valor de la emisividad, e, en el presente trabajo se ajustaron los mejores valores de ésta, de forma que la diferencia entre las temperaturas de

Tabla I. Coeficientes de regresión y de correlación para las propiedades físicas del acero (Ec.11)

Table I. Regression and correlation coefficients for physical properties of steel (Eq. 11)

Propiedad	Unidades	a_0	a_1	a_2	Coefficiente correlación
Densidad	kg/m ³	8088,600	-0,540	-37,940	0,998
Conductividad térmica	J/m	16,067	0,013	-3,130	0,983
Calor específico	J/kg °C	593,123	0,084	76,442	0,893

Tabla II. Valores de emisividad, ϵ , para el acero, obtenidos de literatura

Table II. Emissivity values, ϵ , for hot steel from literature

Emisividad, ϵ	Referencia bibliográfica	Comentario
0,68	[9]	Para acero con película fina de óxido
0,82	[9]	Para acero poco oxidado
0,77	[10]	
0,80	[2]	Para acero a 950 °C
0,85	[11]	
$\frac{h}{hi(1)} \left(0,58 \left(\frac{hi(1)}{h} - 1 \right) + 0,58 \right)$	[12]	$h_i(1)$: espesor de entrada a la 1ª caja h : espesor en la sección de interés

términos experimentales, determinadas en un universo de 100 bandas de diferentes espesores y composiciones químicas, y las calculadas, fuese lo más baja posible. Los mejores valores resultantes para la emisividad, concordantes con los de la literatura^[12], son:

$$\begin{aligned} \epsilon &= 0,85 \quad \text{para las cajas 1 a 6} \\ \epsilon &= 0,90 \quad \text{desde la caja 6 a la bobinadora} \end{aligned}$$

3.2.2. Coeficiente de transferencia convectivo, h_c , entre la banda y el agua de la mesa de enfriamiento

El coeficiente de transferencia convectivo, h_c , entre la banda y el agua de la mesa de enfriamiento depende del punto de medida sobre la superficie y, también, de la cara. En efecto, su valor sobre la cara superior es distinto al de la cara inferior, debido a las diferentes presiones en las boquillas de agua. Adicionalmente, sobre cada cara existen dos valores de h_c , uno correspondiente a la zona directamente bajo el chorro de agua y el otro que corresponde a la zona entre las boquillas. En bibliografía se encuentran valores distintos para una misma cara y posición^[15 y 16], razón por la cual se procedió análogamente a lo realizado para obtener los valores de la emisividad, ajustando los valores de h_c que proporcionarían las menores diferencias entre las temperaturas experimentales y teóricas, sobre la base del mismo universo de prueba de 100 bandas, utilizado anteriormente. Con ese criterio, los valores de h_c para la caras superior, h_{cs} , e inferior, h_{ci} , se muestran en las tablas III y IV, respectivamente.

Es interesante señalar que, los coeficientes de transferencia de calor para la cola de la banda son superiores a los correspondientes a la cabeza, lo que es atribuible al hecho de que, en la cola, la ve-

Tabla III. Coeficientes de transferencia de calor h_{cs} en la mesa de enfriamiento, cara superior

Table III. Heat transfer coefficients h_{cs} on cooling table, upper face

Secciones	h_{cs} (J/m ² °K.seg)	
	Cabeza banda	Cola banda
1 → 3	1.040	1.625
4 → 6	1.360	1.810
6 → 10	1.475	1.745

Tabla IV. Coeficientes de transferencia de calor, h_{ci} , en la mesa de enfriamiento, cara inferior

Table IV. Heat transfer coefficients, h_{ci} , on cooling table, bottom face

Secciones	h_{ci} (J/m ² °K.seg)	
	Cabeza banda	Cola banda
Todas	285	710

locidad de la banda es mayor, ya que normalmente se lamina con aceleración.

4. RESULTADOS

4.1. Temperatura de salida de la caja 6

Una vez determinados, empíricamente, los coeficientes de transferencia de calor, se procedió a validar el modelo. Para ello, se efectuó un seguimiento de temperatura de 74 nuevas bandas^[3] (temperatura, espesor de entrada a la primera caja y otras condiciones de laminación, como variables

de entrada). Se obtuvo una temperatura teórica de salida de la caja 6 con una diferencia media de $\pm 6,5$ °C, respecto de la real, para una caída total de temperatura de 150 °C en las seis cajas, lo que representa un error medio del 4,3 %. La desviación máxima de temperatura fue de 20 °C, en el 8 % de los casos. La figura 3 muestra la dispersión de los resultados.

4.2. Temperatura de bobinado

El análisis de los datos de 57 nuevas bandas^[3] (temperatura a la salida de la caja 6 y condiciones de operación en la mesa de enfriamiento, como variables de entrada), muestra una temperatura de bobinado teórica, con una desviación media de $\pm 9,2$ °C, respecto del valor experimental, para una caída de temperatura del orden de 240 °C en la mesa de enfriamiento, que representa un error medio en la temperatura del 3,8 %. La desviación máxima fue de 20 °C en el 9 % de los casos. La figura 4 muestra la dispersión de los resultados.

4.3. Evolución de la temperatura en el tramo laminador-mesa de enfriamiento

En la tabla V se detallan las características del material y las condiciones operacionales utilizadas, así como los resultados de la modelación efectuada para estimar la evolución de la temperatura en el trayecto entre la caja 3 y la bobinadora.

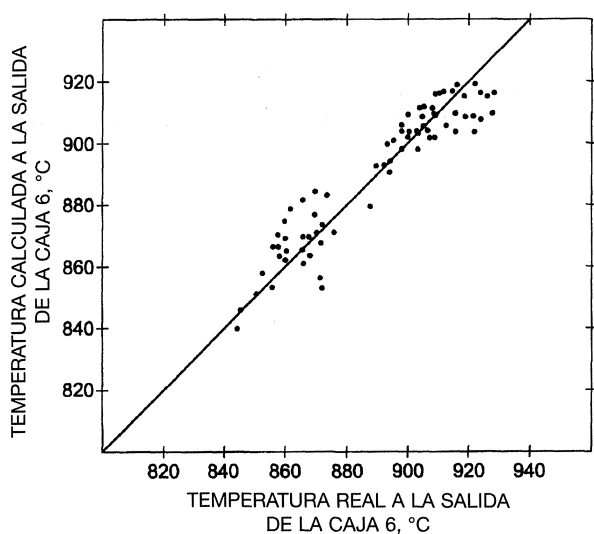


Figura 3. Temperaturas de salida de la caja 6, reales y calculadas.

Figure 3. Real and model finishing temperatures at exit of stand 6.

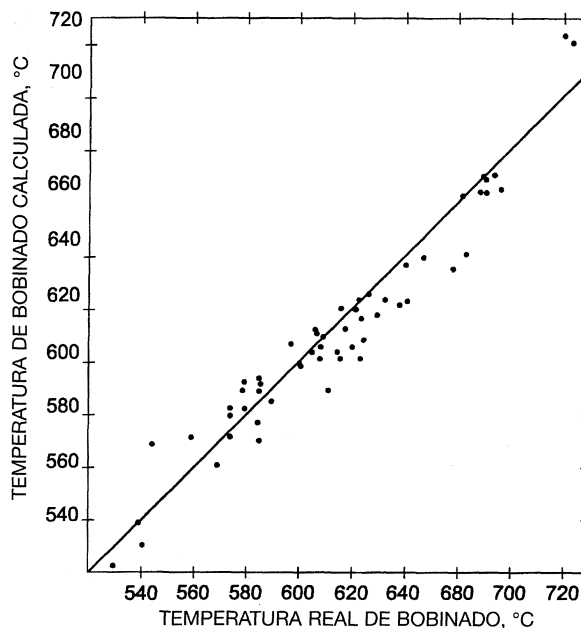


Figura 4. Temperaturas de bobinado reales y calculadas.

Figure 4. Real and model coiler temperatures.

Las temperaturas reales medidas a la salida de la caja 6 y a la salida de la mesa de enfriamiento fueron de 910 y 625 °C respectivamente, comparándose favorablemente con los respectivos valores teóricos de 915,2 y 618 °C^[3].

De la tabla V, es interesante observar la existencia del aporte a la temperatura de la banda debido a la energía mecánica, en las cajas 3 a 5, mientras que en la 6, es irrelevante, ya que al tratarse de una caja acabadora la reducción es muy baja, en este caso 14 %. Nótese que, las temperaturas de la banda a la salida de una caja son superiores a las de entrada a la caja siguiente, por las pérdidas de calor que, entre ellas, sufre el material, fundamentalmente por radiación.

4.4. Análisis de sensibilidad del modelo

4.4.1. Emisividad durante la laminación

Se varía el valor de la emisividad de la banda de 0,85 a 0,75 para estudiar su influencia sobre la temperatura a la salida de la caja 6. Los resultados se indican en tabla VI.

Para todos los espesores involucrados, no se observan aumentos significativos en la temperatura a la salida de la caja 6, al disminuir el valor de la emisividad de la banda de 0,85 a 0,75. En efecto, al disminuir levemente el valor de la emisividad son menores las pérdidas de calor por radiación en

Tabla V. Ejemplo de resultados a partir del modelo

Table V. Example of results from simulation

Dimensiones de la banda a la entrada de la primera caja (mm): 24,7 (espesor), 1.000 (ancho) 28.500 (largo)
Porcentaje de carbono: 0,09

Temperatura de entrada a la primera caja (°C): 1.018

Velocidad tangencial de los cilindros de la caja 6 (m/s) : 7,17

Secciones con enfriamiento al agua en la mesa de enfriamiento: 5 a 10

	Caja 3	Caja 4	Caja 5	Caja 6						
Potencia de Laminación (kW)	3.277	3.239	3.533	547						
Diámetro cilindros de trabajo (mm)	660	678	693	696						
Velocidad tangencial cilindros (m/s)	2,25	3,58	5,41	7,17						
Espesor de salida (mm)	9,3	5,8	3,5	3,0						
Resultados										
Temperatura de entrada	999,4	983,4	964,5	943,4						
Incremento por energía mecánica	22,7	22,7	26,4	4,4						
Pérdidas por conducción a los cilindros	30,2	33,7	39,4	32,7						
Temperatura de salida	991,9	972,4	957,4	915,2						
Mesa de enfriamiento										
Secciones	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Temperatura de entrada (°C)	861,5	856,9	852,4	848,0	843,7	800,7	760	721,6	685,3	651,0
Pérdidas por radiación	3,9	3,8	3,7	3,7	0	0	0	0	0	0
Pérdidas al agua	0	0	0	0	43	40,6	38,4	36,3	34,3	32,4
Pérdidas al aire	0,7	0,7	0,7	0,7	0	0	0	0	0	0

Tabla VI. Efecto del valor de la emisividad en la temperatura de salida de la caja 6

Table VI. Effect of the emissivity value on finishing temperature at the exit of stand 6

Espesor final [mm]	Temperatura de salida caja 6	
	$\epsilon = 0,85$	$\epsilon = 0,75$
2,08	919	926
3,72	909	925
5,87	870	898
7,95	876	890

las primeras cajas y, por tanto, algo mayor la temperatura, T, de la cinta, a la salida de éstas, con lo que las pérdidas calóricas en las cajas siguientes son ligeramente superiores y, finalmente, el efecto global de temperatura a la salida de la caja 6 es, prácticamente el mismo, debido a pequeñas variaciones en la emisividad de la banda.

4.4.2. Emisividad en la mesa de enfriamiento

Se varía el valor de la emisividad de la banda, de 0,9 a 0,8, para el trayecto comprendido entre la salida de la caja 6 y la bobinadora, para el caso de aceros que no requieren enfriamiento con agua, de modo que se pueda apreciar el efecto del valor de la emisividad en la temperatura de bobinado. Los resultados se muestran en la tabla VII.

Tabla VII. Efecto del valor de la emisividad sobre la temperatura de bobinado

Table VII. Effect of the emissivity value on coiler temperature

Espesor final [mm]	Temperatura de bobinado	
	$\epsilon = 0,9$	$\epsilon = 0,8$
2,08	723	736
2,28	721	734
2,07	721	735

Las temperaturas de entrada a la caja 1 eran 1.020, 1.010, 950 y 970 °C para los espesores señalados de 2,08 a 7,95 mm, respectivamente. En este caso, tampoco se aprecia una influencia significativa en la temperatura de bobinado al variar el valor de la emisividad de la banda de 0,9 a 0,8, por las mismas razones explicadas en la sección anterior.

4.4.3. Fracción de la energía de deformación plástica, f , efectivamente transformada en calor

Se disminuye el valor de la fracción f de la energía de deformación plástica, efectivamente transformada en calor, de 1,0 a 0,9, para evaluar su efecto en la temperatura de salida de la caja 6. Los resultados se muestran en la tabla VIII, siendo la temperatura de entrada a la primera caja, de 1.030 °C. En dicha tabla no se observan diferencias apreciables en la temperatura de salida al disminuir la energía calórica por deformación, variando f , de 1 a 0,9. En efecto, y tal como se señala en la tabla V, considerando toda la energía mecánica transformada en calor, los calentamientos máximos obtenidos por ese mecanismo no superan los 27 °C. Ello implica que una pequeña disminución en f no es relevante para efectos de influir en la temperatura de la banda.

5. CONCLUSIONES

El modelo simple propuesto predice, en forma aceptable, la evolución de la temperatura de la banda durante la laminación, con una desviación de $\pm 6,5$ °C para una disminución media total de 150 °C en las seis cajas, lo que representa un 4,3

Tabla VIII. Efecto de la fracción f de energía de deformación plástica transformada en calor en la temperatura de salida de la caja 6

Table VIII. Effect of fraction f of plastic deformation energy transformed in heat on finishing temperature at the exit of stand 6

Espesor final [mm]	Temperatura de salida caja 6	
	$f = 1$	$f = 0,9$
2,08	919	905
2,07	917	903
2,39	840	829

% de error. Para la temperatura de bobinado, la desviación es de $\pm 9,2$ °C para una caída de temperatura media de 240 °C en la mesa de enfriamiento, con un error medio del 3,8 %. Asimismo, el análisis de sensibilidad del modelo frente a valores o factores inciertos (emisividad de la banda, fracción f , de la energía de deformación plástica transformada en calor) indica una buena estabilidad de éste, sin cambios significativos en la temperatura de la banda frente a pequeñas variaciones en los factores señalados.

Finalmente, es interesante resaltar que las principales pérdidas calóricas, en el tren laminador acabador continuo en caliente, se producen por radiación, en el tramo entre la salida de la caja 6 y la mesa de enfriamiento, y por convección al agua en dicha mesa. Los aportes calóricos por energía mecánica no son despreciables en las cinco primeras cajas, mientras que en la sexta son irrelevantes por la baja reducción de área que en ella se produce, al tratarse de una caja acabadora.

REFERENCIAS

- [1] P. PINTO, Tesis de grado, Departamento de Metalurgia, Universidad de Concepción, 1992.
- [2] F. INCROPERA y D. DE WITT, *Fundamentos de Transferencia de Calor*, Ed. Prentice Hall, Mexico, 1999, pp. 226-240.
- [3] O. JIMÉNEZ, Tesis de grado, Departamento de Metalurgia, Universidad de Concepción, 1992.
- [4] F. SEREDYNSKI, *JISI* (1973) 197-203
- [5] R. WILLIAMS y G. BOXALL, *JISI* (1965) 369-377
- [6] Y. SEKIMOTO, *SEAIQ Quarterly* (1977) 48-57
- [7] C. CAMURRI, Tesis Doctoral, Departamento de Metalurgia, Universidad de Concepción, 1992.
- [8] C. CAMURRI e I. WILKOMIRSKY, *Numerical Methods Eng. Appl. Sci.* (1992) 1.287-1.299.
- [9] P. BAQUE *et al.*, *Mise en Forme des Métaux*, Tomo II, Dunod, Paris, 1973, pp. 208-210.
- [10] C. CAMURRI y S. LAVANCHY, *J. Méc. Théor. Appl.* (1984) 747-759
- [11] O. PAWELSKI y W. SCHWENZFEIER, *Stahlheisen Sonderberichte* (1968) 49-68.
- [12] J.M. KAY, *Flat rolling: A comparison of rolling mill types*, Ed. Prentice Hall, Londres, 1979, pp. 57-60.
- [13] P. LEE, *JISI* (1973) 270 -271
- [14] J. KOKADO, *Transac. ISIJ* (1981) 40-46
- [15] H. IZZO, *JISI* (1972) 57-61
- [16] G. TRAJANOV, *Steel USSR* (1975) 551-551