

# ANÁLISIS Y COMPENSACIÓN EN EL CÁLCULO DE TEMPERATURA USADA POR EL MODELO DE *SETUP* DEL MOLINO CALIENTE TRABAJANDO CON 2 DIFERENTES HORNOS DE RECALENTAMIENTO PARA MEJORAR EL ACIERTO DEL ESPESOR EN PUNTA<sup>1</sup>

César A. Villanueva<sup>2</sup>  
Jorge Ramírez C.<sup>3</sup>  
Bernardo Guerra B.<sup>4</sup>

## Resumen

Se emprendió un proyecto en Ternium Planta Churubusco con miras a reducir la cantidad de material descartado/reprocesado en punta de rollo, por quedar fuera de las especificaciones de los clientes internos y externos. Se identificó que la variable de temperatura jugaba un papel predominante en el cálculo que efectuaba el modelo matemático del molino acabador. La temperatura en punta presentaba diferencias entre planchones, al provenir de hornos de recalentamiento con notables diferencias físicas: uno del tipo empujador y el otro del tipo viga caminante. Se desarrolló una modificación para compensar la temperatura estimada de la punta antes de los cabezales de descascarado; temperatura proyectada a partir de la medición en el último pase del molino reversible y afectada por la disipación térmica en las mesas de traslado y el *coilbox*. Como resultado del presente proyecto se logró la reducción de material fuera de especificaciones al aumentar el acierto en punta de 1.19% histórico a un 0.19% para material rolado en los diferentes calibres, químicas y anchos.

**Palabras clave:** Descalibre; Set up; Temperatura.

## ANALYSIS AND COMPENSATION IN TEMPERATURE CALCULATIONS USED FOR THE FINISHING MILL SETUP MODEL IN A HSM WITH 2 DIFFERENT REHEAT FURNACES

### Abstract

A project was undertaken in Ternium Mexico (Churubusco plant) to reduce the amount of material off gauge discarded/reprocessed on head ends, because of internal and external customer specifications. Temperature was identified with a predominant role in the calculation done by the mathematical model of the finishing mill. The temperature differed between slab heads, coming from reheating furnaces with notable physical differences: a pusher type and a walking beam type. We developed a modification to compensate the estimated temperature of the bar before the descaling box; projected temperature based on measurement from the last pass of the roughing mill and affected by heat dissipation in the holding tables and the coil box. As a result of this project it was possible to reduce off gauge head end material from an historic behavior of 1.19% to a 0.19% for rolled material in different sizes, chemical and widths.

**Keywords:** Set Up; Mathematical model; Temperature.

<sup>1</sup> Trabajo a ser presentado en el 47º Seminario de Laminación – Procesos, Productos Laminados y Revestidos, 26 al 29 de octubre de 2010, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Procesos Laminación en Caliente, Planta Churubusco. Av Churubusco 1000 Nte, Frac. Santa Fé, Monterrey, N.L. Mex. CP 64560

<sup>3</sup> Procesos Laminación en Caliente, Planta Churubusco.

<sup>4</sup> Jefe de Sector de Procesos Laminación en Caliente, Planta Churubusco.

## 1 INTRODUCCIÓN

El proceso de producción de acero en Ternium México planta Churubusco está basado en un laminador convencional con proveeduría de planchón nacional y extranjera. Está integrado por 2 hornos de recalentamiento, uno tipo empujador de 280 tons/hr y otro de tipo viga caminante con capacidad de 300 tons/hr. Adicionalmente se cuenta con un laminador reversible con un par de rodillos de trabajo y dos de apoyo, con 2 motores de 6000 HP y un molino canteador integrado con dos motores de 1200 HP.

A la entrada del molino acabador se tiene un coilbox con capacidad máxima de 23 Tons, el molino acabador cuenta con 6 castillos en tándem, el cual tiene una potencia total instalada de 37500 HP.

La mesa de enfriamiento es de flujo laminar con un flujo máximo de 6,330 m<sup>3</sup>/hr.

Al final de la línea se tiene un par de enrolladores con 2 motores de 1200 HP. Para cada uno de las secciones del proceso, se cuenta con un modelo matemático adaptivo.



Figura 1 Layout, Planta Churubusco México

Como parte del esfuerzo enfocado a la mejora continua y buscando la optimización del rendimiento de nuestros productos, se emprendió un proyecto que buscaba en una primera fase identificar las variables críticas que impactaban en el acierto en el espesor de la lámina, para posteriormente mejorar su desempeño.

El modelo actual de setup del molino acabador está basado en el método de cálculo SIMS.<sup>(1-3)</sup> La ecuación general de la fuerza utilizada está dada como:

$$F = L * Q * K * A$$

donde

$L$  = Longitud del arco de contacto

$$L = \sqrt{(R * (h_{out} - h_{in}))}$$

$R$  = Radio del rodillo de trabajo

$h_{out}$  = Espesor de salida.

$h_{in}$  = Espesor de entrada

$Q$  = Factor geométrico.

La ecuación general del cálculo de  $Q$  es:

$$Q = \frac{1}{2} * \left(\frac{1-r_{in}}{r_{in}}\right)^{1/2} * \left[ \Pi * \tan^{-1}\left(\frac{1-r_{in}}{r_{in}}\right)^{1/2} - \left(\frac{R}{h_{in}}\right)^{1/2} * \ln\left[\left(\frac{y}{h_{in}}\right)^2 * (1-r_{in})\right] \right] - \frac{\Pi}{4}$$

donde la  $r_{in}$  es la reducción en el pase.

El ángulo en el punto neutro está dado por:

$$\phi = (\tan(T_1 + T_2) * \text{sqrt}\left(\frac{h_{out}}{R * 1000}\right))$$

El ángulo en la mordida está dado por:

$$\alpha_s = a \cos\left(1 - \frac{(h_{in} - h_{out})}{(2 * 1000 * R)}\right)$$

Simplificando algunos términos, se tiene que:

Cálculo de  $T_1$

$$T_1 = \frac{\Pi}{8} * \left(\frac{h_{in}}{R}\right)^{1/2} * \ln(1-r)$$

Cálculo de  $T_2$

$$T_2 = \frac{1}{2} * \tan^{-1}\left(\frac{r}{1-r}\right)^{1/2}$$

Cálculo de  $y$  (espesor en el punto neutro).

$$y = 2 * R * (1 - \cos(\phi_{in})) + h_{in}$$

Cálculo de  $T_3$

$$T_3 = 2 * \Pi * T_2$$

Cálculo de  $T_4$

$$T_4 = \left(\frac{R}{h_{in}}\right) * \ln\left[\left(\frac{y}{h_{in}}\right)^2 * (1-r)\right]$$

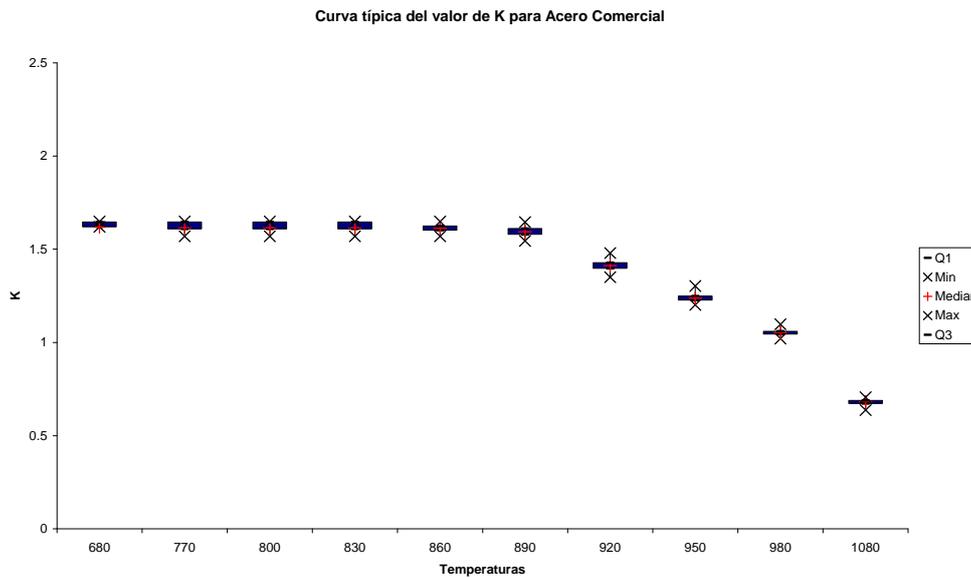
Por lo que el valor de  $Q$  queda de forma simplificada como:

$$Q = \frac{1}{2} * \left(\frac{1-r}{r}\right)^{\frac{1}{2}} (T_3 - T_4) - \frac{\Pi}{4}$$

A = Ancho

K = Resistencia a la deformación.

El valor de K es el esfuerzo a la cedencia de un acero al carbono base; considerando la razón de deformación de un acero base contra el valor de deformación del producto a laminarse; esta valor además es afectado por la tensión de cedencia a una temperatura determinada, la química de la pieza a laminarse (en función de una ecuación de carbono equivalente)<sup>(4)</sup> y correcciones en línea adaptativas.<sup>(5)</sup>



**Figura 2** Curva típica de valores de K en función de la temperatura

Las variables críticas analizadas que impactan en la predicción del modelo fueron: la química del acero, temperatura (homogenización de perfiles térmicos entre los hornos y la barra de transferencia) y asociado a lo anterior, la optimización de reglas de programación.

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

*El defecto fuera de espesor en punta era un problema crónico del laminador en caliente de Churubusco siendo la principal causa de descarte y/o reproceso en líneas posteriores con un valor histórico de 1.19% de la producción mensual (Fig 3). En la búsqueda de su reducción, se recurre a la metodología DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Implementar y Controlar) para atacarlo.*

Tendencia de Punta Descalibrada  
Antes de las Acciones

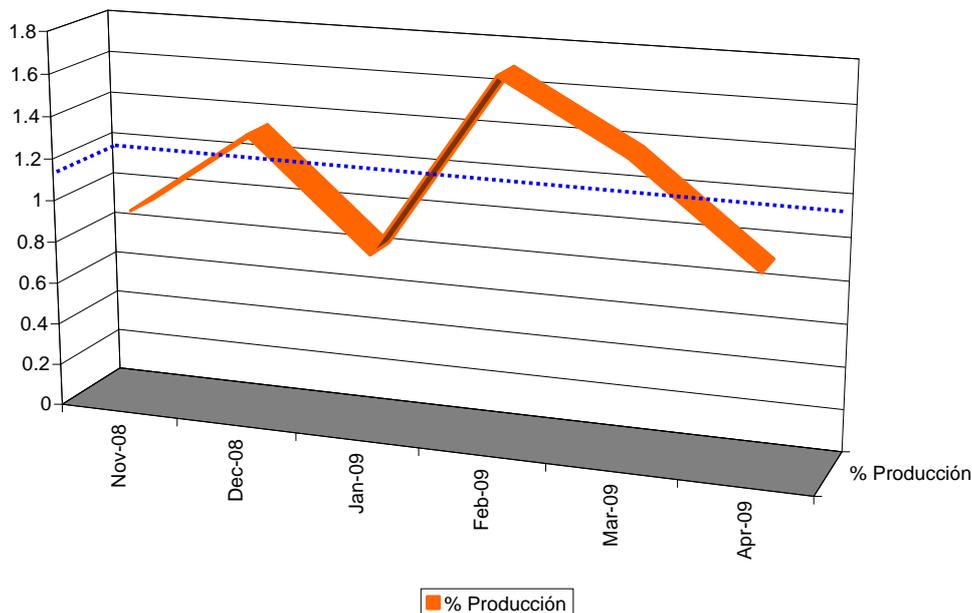


Figura 3 Tendencia de material con descalibre en punta antes de las acciones.

Durante el análisis de las variables antes descritas, una de las primeras variables que se analizaron fue el impacto de la ecuación del carbono equivalente en la ecuación del modelo adaptivo esto y debido a la dispersión de químicas que se tienen por la gran variedad de proveedores de planchones con las que trabaja el laminador. Este primer esfuerzo aunque no arrojó los resultados esperados en el objetivo principal, si permitió caracterizar los aceros y con esto, se agrupó en base a su desempeño en el laminador. Modificando de las reglas de programación por grados de acero en una forma más congruente

Un siguiente estudio se enfocó a las variaciones de temperatura entre barras. Como resultado de este análisis se observó que el modelo sobreestimaba la resistencia a la deformación con diferencias de temperatura mayores a 25°C entre barras.

Estas diferencias tan grandes entre barras están directamente relacionadas por las diferencias físicas entre los hornos de recalentamiento. En la Fig 4, se muestran las variaciones en el acierto de espesor en punta en ½ ASTM para todos los productos, en donde se observa que a mayor diferencia de temperaturas entre barra y barra, el acierto en punta disminuye esto debido a una sobrecompensación del modelo del setup.

La laminación en caliente es dependiente del mantenimiento apropiado de las distribuciones de temperatura a lo largo del proceso. Las dificultades en la medición llevan a una situación donde muchos puntos de temperatura no son medidos y deben ser controlados a través de modelos predictivos.

El modelo de puesta a punto del molino acabador, se alimenta con las temperaturas de cola enviadas por el modelo del reversible/canteador en el último pase y estimadas a su paso por las mesas de traslado y coilbox.

Antes de los cambios

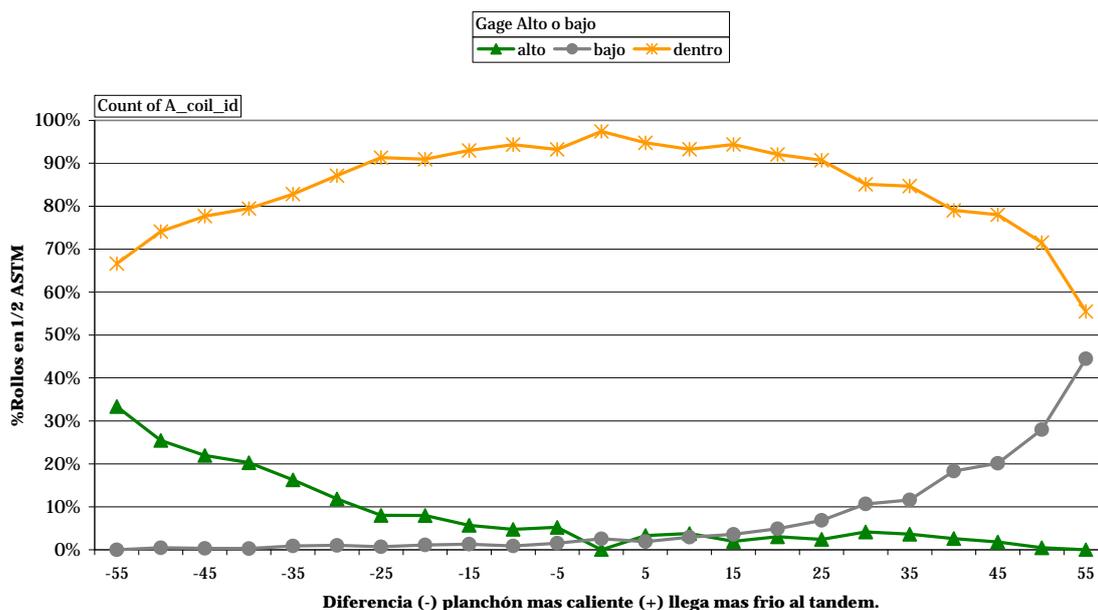


Figura 4 Variaciones en el % de acierto de espesor en punta en 1/2 ASTM entre barra y barra antes de las acciones

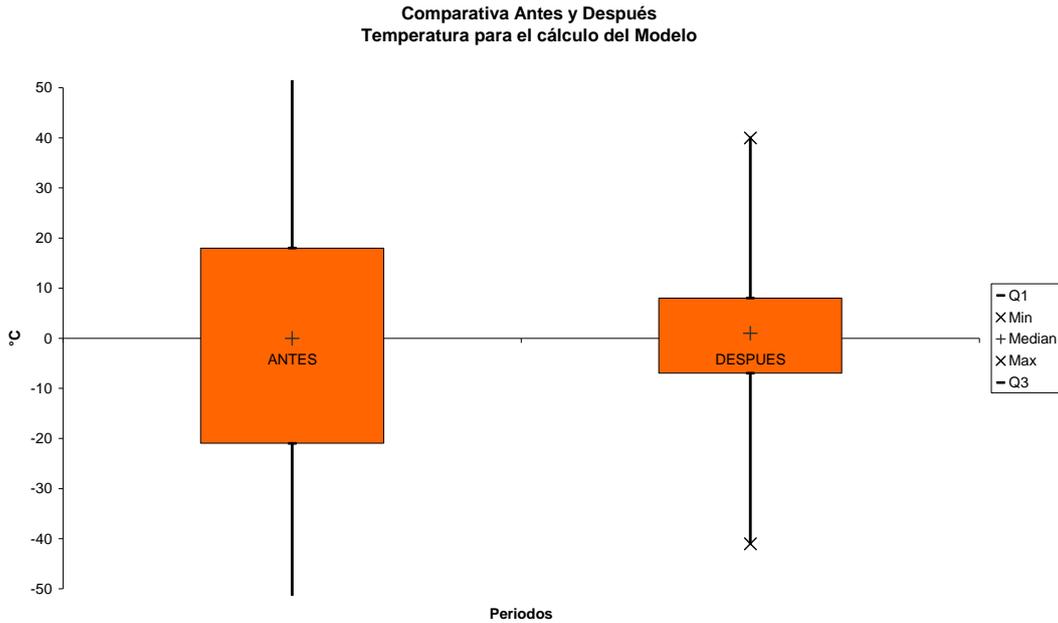
Diferencias importantes entre barras complican el tener un buen acierto del modelo de setup.

### 3 RESULTADOS

Originalmente, la temperatura de entrada al molino acabador se calculaba partiendo de la temperatura medida en la cola de la barra de transferencia durante el último pase del molino reversible y tomando en consideración, la pérdida de temperatura en la mesa de traslado y en el *coilbox*.

La forma de calcular anteriormente mencionada se modificó considerando para el cálculo de fuerzas una temperatura de entrada al molino acabador ponderada que toma en consideración además de la temperatura medida en la cola de la barra de transferencia durante el último pase del molino reversible restando la pérdida de temperatura por radiación en las mesas así como la pérdida de temperatura en el *coilbox*.

El resultado de esta temperatura es afectado con una cierta ponderación modificable a valores entre 0 y 1, se maneja una ponderación similar para la temperatura de largo plazo, logrando con esto una modulación de las variaciones de temperaturas presentes entre barra y barra amortiguando las variaciones de temperatura entre barras haciendo al modelo más estable a largo plazo (Fig. 5).

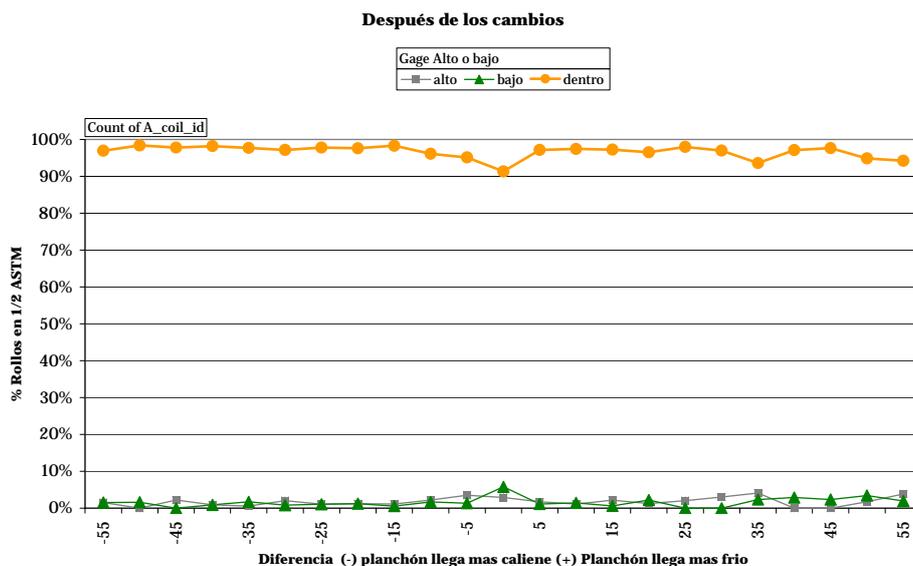


**Figura 5** Comparativa de temperatura para predicción de modelo del molino acabador, antes y después de los cambios.

#### 4 DISCUSIÓN

Debido a que actualmente no se tiene un modelo que controle las adaptaciones en función del horno del cual proviene la pieza a laminar, se requirió modificar el código del modelo permitiendo amortiguar las variaciones provocadas por las diferencias físicas entre ambos hornos de recalentamiento ya mencionadas.

Después de las modificaciones efectuadas del amortiguamiento en la temperatura que ve el modelo (Fig 5), se logró mejorar el desempeño en el espesor en la punta en el molino acabador, llegando a valores promedio superiores al 99% (Fig. 6).

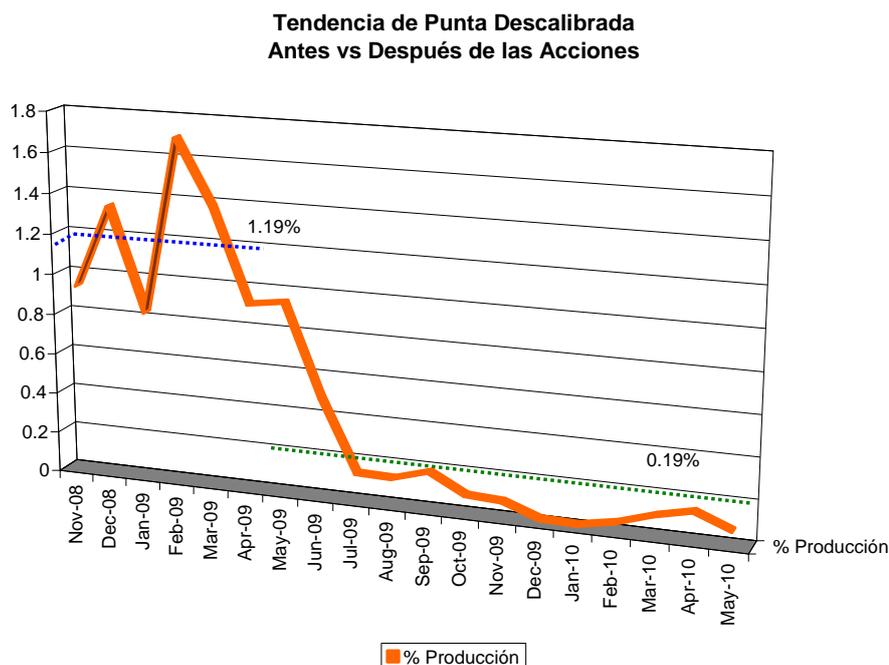


**Figura 6** Variaciones en el % de acierto de espesor en punta en 1/2 ASTM entre barra y barra después de las acciones

Los resultados obtenidos muestran una mejora significativa en el cumplimiento en el espesor a lo largo de todo el rollo, principalmente en la punta.

Esta mejora contribuyó también a la disminución de problemas de variación de ancho en punta debido a una mejor predicción barra a barra.

Después de las modificaciones al modelo, en cuanto a la predicción de la temperatura, se obtuvo una mejora significativa en el desempeño del laminador, la cantidad de materiales reprocesados en las líneas posteriores y los porcentajes de desperdicio por el descalibre en la punta de los rollos fue muy evidente el efecto en la mejora (Figura 7).



**Figura 7** Tendencia en % de caídas de Punta Descalibrada antes y después de las acciones efectuadas.

## 5 CONCLUSIONES

El modelo de puesta a punto, el factor determinante en el acierto al espesor en la punta fue el amortiguamiento de las variaciones de la temperatura entre barra y barra, generado esto por las características físicas de ambos hornos.

Se analizaron opciones de modificar la formula del carbono equivalente en el modelo que calcula la deformación del material para el calculo de la fuerza en el modelo de SIMS, ninguna de las formulas que existen en la literatura dio una ventaja significativa en la mejora del desempeño del calibre en la punta.

Las mejoras significativas observadas en los porcentajes de desperdicio de materiales por el desacierto del espesor en la punta fueron de 1.19% en los meses.

anteriores, llegando a valores actuales de 0.19% de la producción del molino caliente.

Una mejora adicional fue la disminución significativa en los rollos acinturados en la punta.

Mejoras adicionales en las puntas descalibradas pueden darse si se adapta un modelo que pueda discernir las temperaturas de llegada al laminador considerando el horno en el modelo.

## 6 RECONOCIMIENTOS

Este trabajo ha sido gracias al apoyo, orientación y colaboración de todas las áreas de Ternium México. A la dirección industrial y a la gerencia de laminación planos.

## REFERENCIAS

- 1 R.B. Sims. "The Calculation of Roll Force and Torque in Hot Rolling Mills". Institution of Mechanical Engineers, Vol. 168, 1954, pp. 191-219.
- 2 Ramírez C., Jorge. "Modelo semifísico de Laminación en Caliente". Reporte Interno, 1997.
- 3 T.M. Maccagno y autores, "Determination of Recrystallization Stop Temperature from rolling mill logs and comparison with laboratory Simulation Results, ISIJ International, Vol 34 (1994), No. 11 pp. 917 -922.
- 4 H. Ford and J.M. Alexander. "Simplified Hot-Rolling Calculations". Journal of the Institute of Metals, paper No. 2258, April 1964, pp. 397-404.
- 5 Finish Mill Setup User's Guide, GE Drive Systems GEH-6160.