

# FRICCIÓN EN EL ARCO DE CONTACTO Y SU EFECTO SOBRE LA SUPERFICIE LAMINADA DE LA HOJALATA EN UN LAMINADOR EN FRÍO<sup>1</sup>

Jorge J. Alday<sup>2</sup>  
Enrique Bossi<sup>3</sup>

## Resumen

En laminación en frío de aceros, la fricción en el arco de contacto es afectada por varios factores, entre los cuales se encuentran: la velocidad de laminado, la dureza y rugosidad superficial de cilindros y chapa, la condición fisico-química de la superficie de la chapa, la lubricación y la temperatura de cilindros y chapa. Las características del modelo microscópico impreso sobre la superficie de la banda laminada en frío, están asociadas a la condición de fricción, tal cual ha sido reconocido por J. A. Schey y W. L. Roberts, entre otros autores. En este trabajo, se efectuaron pruebas en el laminador de cuatro puentes de Siderar sobre material base para hojalata. Por observación microscópica de réplicas de la superficie de hojalata laminada, se estableció el régimen de fricción de este tren y su relación con la rugosidad inicial de los cilindros de trabajo y otros parámetros operativos. El comportamiento analizado, sugiere una deficiencia en la refrigeración del tren de laminación en frío en cuestión para ciertos valores de rugosidad en los cilindros de trabajo.

**Palabras claves:** Lubrificação do laminador a frio; Atrito no laminação a frio

## FRICCIÓN EN THE ROLL BITE AND ITS EFFECT ON ROLLED TINPLATE SURFACE IN A TANDEM COLD MILL

### Abstract

The actual friction in the roll bite is affected by many factors in cold rolling of steel, the important ones are: rolling speed, surface roughness and hardness of the rolls and strip, strip surface physical chemistry condition, lubrication, roll and strip temperatures. The characteristics of the microscopic pattern on the surface of cold rolled strip are associated to the friction condition as it has been recognized by J. A. Schey and W. L. Roberts. In this paper, rolling tests are carried out in a four stand tandem cold mill on tinplate coils. Microscopic observations on as-rolled tinplate surface replicas, set the friction regime in this mill and it is related to initial work roll roughness in the last stand and others operative parameters. The behaviour observed, suggests a low efficiency of the cooling system in the mill when the work rolls have some high roughness values on its surface.

**Key Words:** Cold rolling friction; Cold rolling lubrication; Oil pits.

<sup>1</sup> Trabajo a ser presentado en el 45º Seminario de Laminación – Procesos, Productos Laminados y Revestidos, 21 al 24 de octubre de 2008, Ipojuca - Porto de Gainhas - PE

<sup>2</sup> Asistencia y Servicio Técnico – Area Steel – D.A. Stuart S.A. – [jalday@cablenet.com.ar](mailto:jalday@cablenet.com.ar)

<sup>3</sup> Asistente de Producción – Laminación en Frío – Ternium Siderar – Pta. Gral Savio – [ebossi@ternium.com.ar](mailto:ebossi@ternium.com.ar)

## 1 INTRODUCCION

Para mantener el control de la fricción entre cilindros y material, hoy se emplean en forma extendida dispersiones o emulsiones de aceite en agua. Estos sistemas lubricantes son heterogéneos y consisten en una distribución discreta de gotas de aceite suspendidas en agua, equilibrio que se obtiene por medio de un sistema de emulgentes y cierto grado de agitación mecánica.

En el caso de las dispersiones, se emplean emulgentes de tipo catiónico/no iónico y para las emulsiones esos emulgentes son de naturaleza aniónico/no iónico.

Estos sistemas heterogéneos son caracterizados por la distribución del tamaño de las gotas de aceite, y como regla general las dispersiones presentan distribuciones más centradas y con mayor diámetro medio de partículas (típicamente 20-50 $\mu$ m) que las emulsiones (típicamente <10 $\mu$ m).

El mecanismo por el cual estos sistemas discretos actúan como lubricantes efectivos en el arco de contacto, es explicado actualmente por dos formalismos teóricos: 1) Teoría del plate-out y 2) Teoría de la concentración dinámica.<sup>(1)</sup>

La teoría del plate-out es aplicable, con limitaciones, a las bajas velocidades de laminado y básicamente enuncia que las gotas de aceite que poseen carga eléctrica debida a la presencia de los emulgentes, se van adhiriendo sucesivamente a la superficie metálica de cilindros y chapa, coalescen y las van cubriendo con una película continua de aceite.

La teoría de la concentración dinámica, presenta un mejor acuerdo entre los valores teóricos de la película de aceite obtenida y los valores experimentales, para las velocidades de deformación típicas de los procesos industriales. Fundamentalmente, propone un mecanismo de inversión de la emulsión, por efectos de la presión y de la mayor viscosidad del aceite para soportar el incremento de presión que se verifica hacia el interior del arco de contacto. De modo, que al interior de la mordida ingresa prácticamente aceite puro y el agua es expulsada.

Por otro lado, la tribología distingue tres regímenes de lubricación en función de la severidad del contacto metal-metal. En el régimen por capa límite, se produce contacto metálico entre las superficies en movimiento relativo y la capa lubricante es de dimensiones moleculares. En el otro extremo, el régimen hidrodinámico supone la separación de las superficies metálicas por una capa lubricante. Entre esos extremos, el régimen mixto involucra en cierto grado, una proporción de los dos anteriores.

Es decir, una manera de poder estudiar el régimen de lubricación en el cual se ha llevado a cabo el trabajado mecánico, surgiría del análisis de la superficie trabajada en cuanto a aspecto microscópico y rugosidad.

En tal sentido, investigaciones realizadas en la laminación de aluminio por Schey,<sup>(2)</sup> han llevado a reconocer cuatro superficies típicas que representan el estado de lubricación por análisis microscópico de las huellas impresas sobre la superficie. Esta misma situación ha sido observada en laminación de cobre y acero por otros investigadores.<sup>(3)</sup>

La superficie de tipo I, al microscopio presenta impresiones denominadas cavidades hidrodinámicas originadas por la presencia de gotas de aceite, transversales a la dirección de laminación y en cantidad tal que prácticamente no se observa transferencia de las marcas longitudinales provenientes de la superficie rectificada de los cilindros de trabajo. Predomina en este estado un régimen de lubricación hidrodinámico.

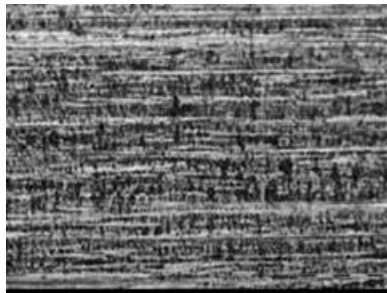
En la superficie tipo II, se observa una menor densidad de cavidades hidrodinámicas y estas se encuentran fragmentadas. Comienzan a aparecer las líneas longitudinales típicas del rectificado de los cilindros.

En la superficie tipo III, las cavidades hidrodinámicas prácticamente desaparecen, y las marcas de rectificado de los cilindros se presentan bien definidas, manifestando así un régimen de lubricación por capa límite.

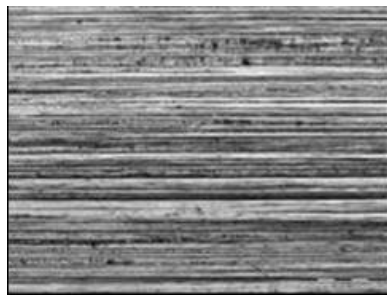
Finalmente, en superficie tipo IV, se observa daño superficial en forma de algunos puntos que son barridos al pasar el material por la zona de deslizamiento delantero.

En la Figura 1, se observa una micrografía a 100x de una superficie de acero laminado en frío con una reducción total de 89%. Esta superficie estaría de acuerdo con la clasificación de Schey, en el Tipo II, con una importante contribución hidrodinámica, pero ya es evidente la impresión de la superficie de los cilindros. Esta topografía está en el límite superior de la superficie Tipo II.

En la Figura 2, el régimen de lubricación presenta una gran componente de capa límite, con algunas pequeñas cavidades hidrodinámicas que aún ubican a esta superficie en Tipo II, pero a punto de pasar a Tipo III.



**Figura 1-** Superficie Tipo II con fuerte componente hidrodinámica Rugosidad Ra : 7,7 μinch – Microscopia óptica 100X



**Figura 2-** Superficie Tipo II con fuerte componente de mecanismo por capa límite Rugosidad Ra 11,0 μinch– Microscopia óptica 100X

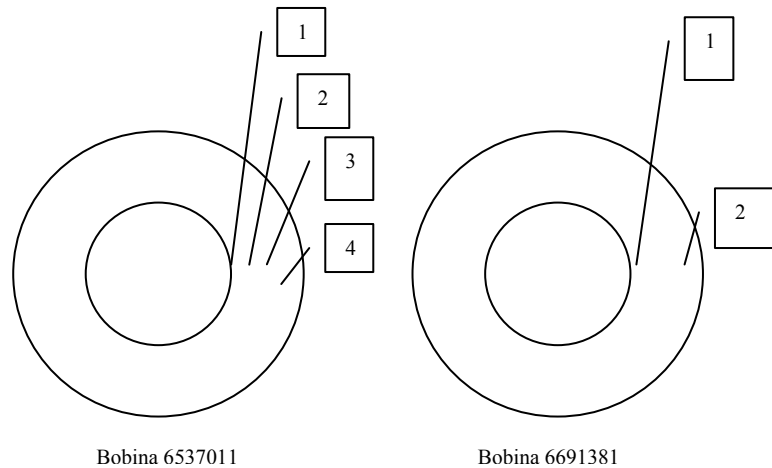
Con los conceptos anteriores, se pretende en este trabajo analizar el estado de fricción obtenido en el laminado de material base para hojalata, en el laminador en frío de cuatro puentes de Ternium Siderar planta Gral. Savio.

Para ello, se han analizado las variables de laminado y la superficie obtenida en una bobina de hojalata a diferentes velocidades de proceso y con una evolución casi constante de fuerza del puente 4 de punta a cola de bobina.

En segundo lugar, se analiza la superficie y variables de laminado de una segunda bobina de hojalata, en la cual se observó un aumento de fuerza de punta a cola del 12,1% en el puente 4, a velocidad de laminación constante.

## 2 MATERIALES Y MÉTODO

Se tomaron como casos de estudios las bobinas 6537011 y 6691381 de material base para hojalata y se efectuaron réplicas metalográficas de acetato de la superficie, sobre ambas caras, en las posiciones que se indican a continuación:



**Figura 3** - Posiciones de muestreo de las bobinas ensayadas.

Las posiciones (1), (2) y (3) de la primera bobina están ubicadas antes de la soldadura de decapado, mientras que la posición (4) está en la segunda bobina simple.

La posición (1) de la segunda bobina está al principio de la primera bobina simple y la (2) al final de la segunda.

Las características relevantes de cada bobina son las siguientes:

**Tabla 1** - Características del material laminado

Bobina	Espesor Final mm	Ancho mm	Espesor LAC mm	Grado Acero	Cequiv	TFL Media °C	TB Media °C
6537011	0,196	881	1,8	7010	0,139/0,144	880	631
6691381	0,196	841	1,8	7010	0,147/0,142	865	625

Ambas bobinas han tenido un programa de reducciones porcentual similar en el laminador en frío:

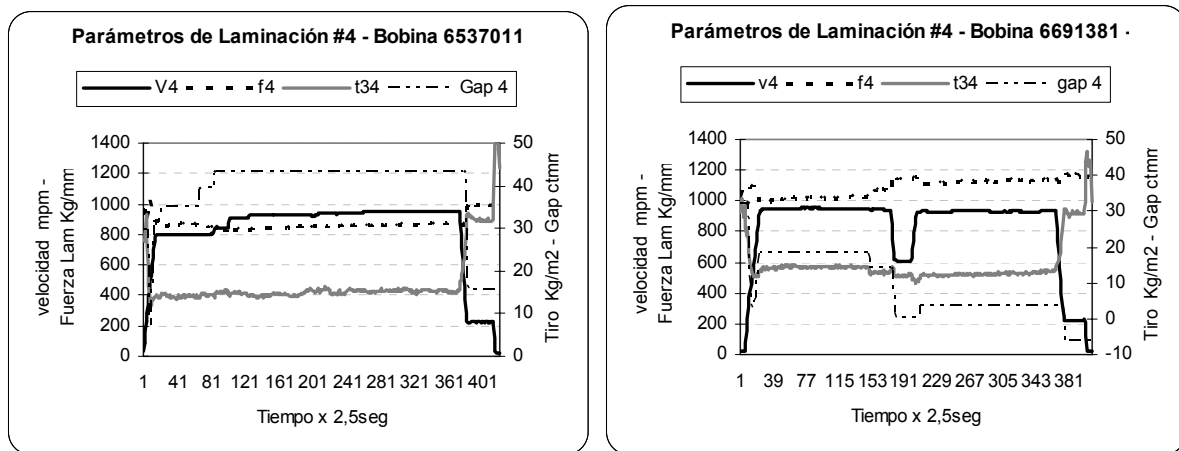
**Tabla 2** - Programa de Reducciones del Laminador en Frío

Bobina	Reducción #1 (%)	Reducción #2 (%)	Reducción #3 (%)	Reducción #4 (%)
6537011	35,8	48,9	48,0	36,2
6691381	35,3	49,1	48,2	36,1

**Tabla 3** - Características de los Cilindros de Trabajo de #3 y #4 usados

Bobina	Puente 3			Puente 4		
	Ra Superior µinch	Ra Inferior µinch	Desgaste km	Ra Superior µinch	Ra Inferior µinch	Desgaste km
6537011	20,3	15,7	167	10,7	10,7	22
6691381	15,7	18,0	52	11,3	14,7	15

La diferencia de parámetros de laminación (V4: velocidad puente 4 mpm, f4: fuerza específica de laminado Kg/mm, t34: tiro específico 3-4 Kg/mm<sup>2</sup>, Gap4: apertura de cilindros ctm) de estas bobinas se representan en los gráficos siguientes:



**Figura 4** - Parámetros de Laminado #4 de cada bobina muestreada

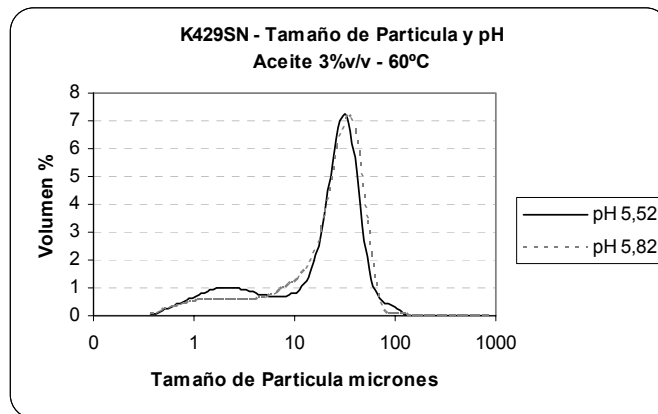
En el caso de la bobina 6537011, se observa un comportamiento de la fuerza de laminado casi constante de punta a cola ( $\Delta f = 32 \text{ Kg/mm}$ ) una vez estabilizada la velocidad en 940mpm. Por otro lado, se ve en el caso de la bobina 6691381 una variación de fuerza de punta a cola de alrededor del 12,1% ( $\Delta f = 122 \text{ Kg/mm}$ ).

La composición de la dispersión lubricante de aceite en agua clarificada, que se empleó en cada bobina es similar:

**Tabla 4** - Análisis de la Dispersión de Laminado empleada como lubricante.

Bobina	Temperatura °C	Aceite Total % v/v	SAP mgKOH/g	pH	ESI 16 minutos (%)
6537011	60	3,3	156	5,60	6
6691381	63	3,4	160	5,70	8

El aceite usado corresponde a la marca comercial K429SN<sup>®</sup> de D.A.Stuart S.A, y como se ha indicado antes, es un aceite de laminación que forma en agua una dispersión catiónica. La distribución de tamaños de las gotas de aceite para esta formulación, en el rango de trabajo de pH usado a 60°C es de 26,5µm promedio a pH 5,5, y de 28,2µm a pH 5,8 lo cual indica una lubricidad prácticamente equivalente en el rango de pH mencionado. En la figura 5 se observa la distribución de tamaño de partículas obtenidas con un contador Coulter Counter LS100Q, en el rango de pH en que se hicieron las pruebas con las bobinas analizadas.



**Figura 5** - Distribución de tamaño de partícula de la dispersión de laminado obtenida con un analizador Coulter Counter LS100Q

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 6 se representan las micrografías ópticas a 100X de las superficies de los cilindros del #3 superior e inferior (a y b), y del #4 superior e inferior (c y d), junto con el promedio de rugosidad Ra de la zona micrografiada.

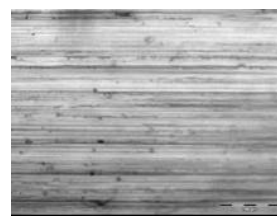
En la Figura 7 se observan las micrografías de la superficie superior e inferior de la chapa en estado de laminación, de la bobina 6537011, en distintas longitudes de la misma según se indicó en Figura 3.

Como primer comentario, resulta evidente que la topografía superficial de los cilindros de trabajo del #4 ha sido transferida a la cara inferior de la chapa, pero es difusa en la cara superior. La densidad de cavidades hidrodinámicas es mucho mayor en cara superior que en la cara inferior, lo cual indica una diferencia de fricción notable en cada cara.

En segundo lugar, no se observa una degradación significativa del régimen de fricción con el desarrollo de la bobina y en las distintas velocidades en cara superior. En cara inferior, hay un cambio más notable de topografía con el desarrollo de la bobina, de modo que se ve una transición hacia un régimen de capa límite hacia el final de bobina.



(a) Cilindro #3 Superior Rug Ra: 20,3 μinch



(b) Cilindro #3 Inferior Rug. Ra: 15,7 μinch

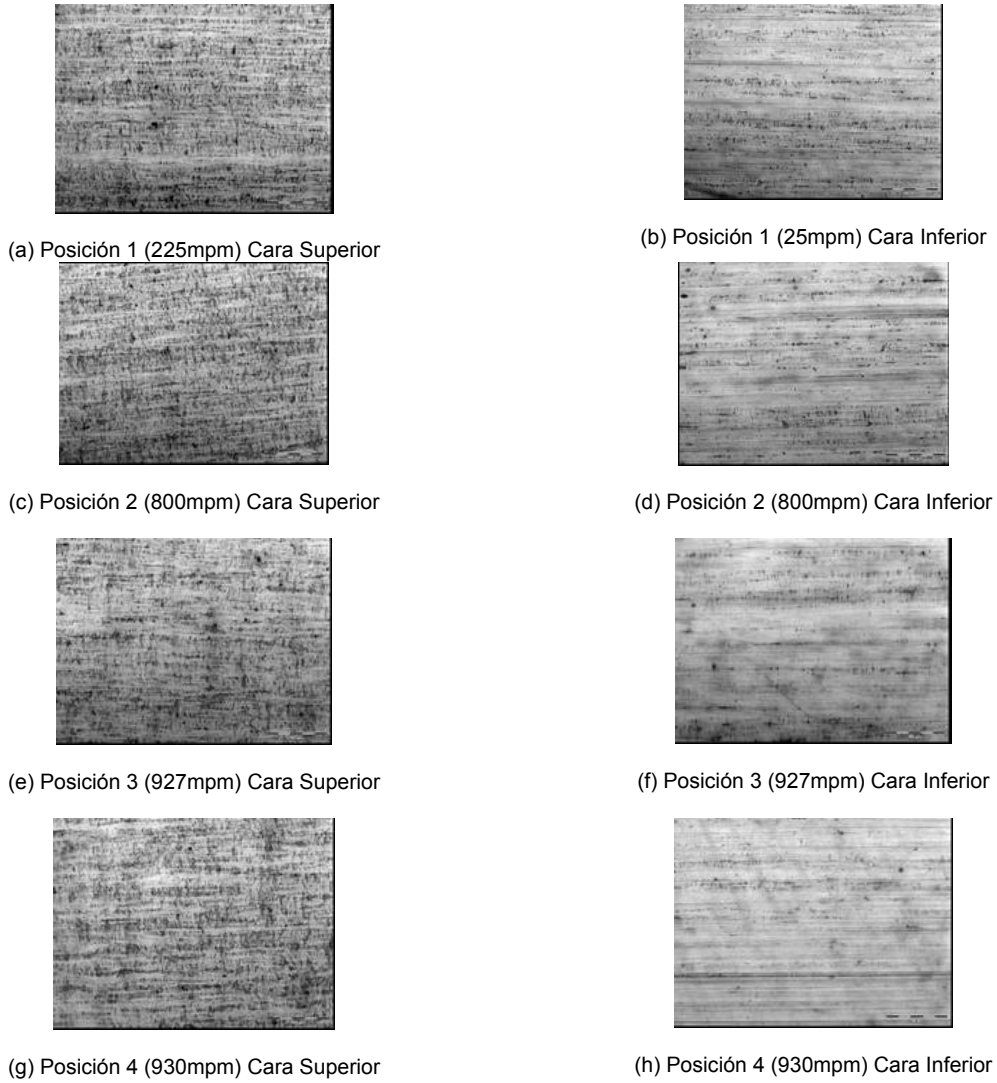


(c) Cilindro #4 Superior Rug. Ra: 10,7 μinch

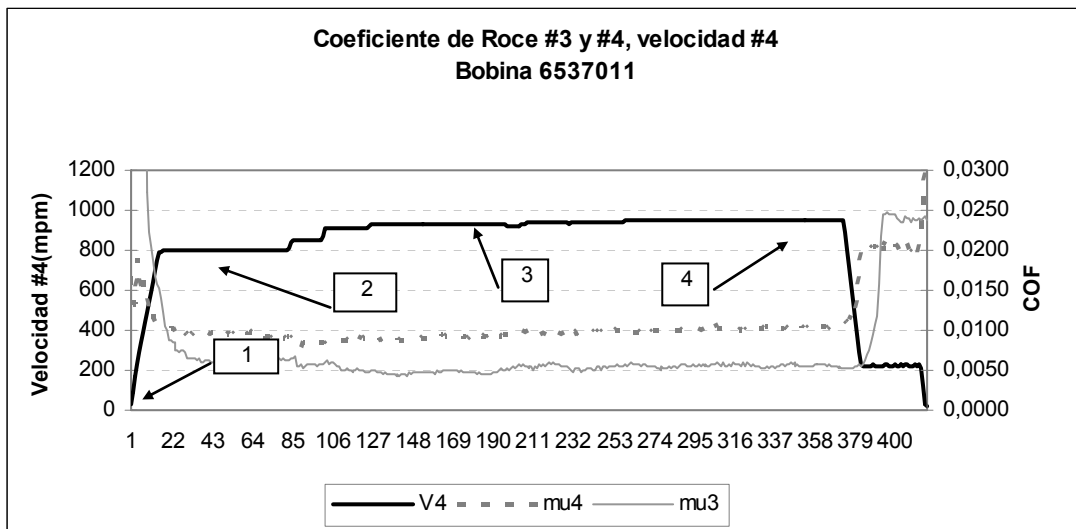


(d) Cilindro #4 Inferior Rug. Ra: 10,7 μinch

**Figura 6** - Micrografías 100x y rugosidades medias Ra de la superficie de los cilindros de trabajo superior e inferior de los dos últimos puentes



**Figura 7** - Micrografías 100X de la chapa en estado de laminación cara superior (a,c,e, g) y cara inferior (b, d, f, h) Bobina 6537011 – Posiciones según se detalla en Figura 3.



**Figura 8** - Coeficiente de roce en #3 y #4 – Bobina 6537011

En la Figura 8 se ha representado para la bobina 6537011, la evolución de la velocidad y el coeficiente de rozamiento de los puentes 3 y 4, calculado con el modelo simplificado de Roberts, de acuerdo a la fórmula:

$$\mu = 2\{\sqrt{(2t/D'r)}\} \cdot \{(f(1-r)/\sigma_c - \sigma_1)\} \cdot \{\sqrt{(2/D'tr)} - 1 + 1,25r\}$$

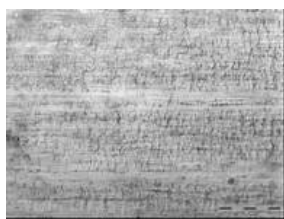
en donde  $\mu$ : coeficiente de rozamiento  
 $\sigma_c$ : resistencia a la deformación (Kg/mm<sup>2</sup>)  
 $\sigma_1$ : promedio de la tensión trasera y delantera del puente (Kg/mm<sup>2</sup>)  
 $t$ : espesor de salida (mm)  
 $D'$ : diámetro corregido de los cilindros de trabajo (mm)  
 $r$ : reducción fraccional (0 a 1) del puente  
 $f$ : fuerza de laminación específica (kg/mm)

Se observa desde el inicio a fin de bobina, un insignificante incremento del coeficiente de rozamiento, que justificaría así la poca variación que se registró en la topografía superficial de la Figura 7.

En la Figura 9, se ven las micrografías a 100x, igual que el caso anterior, pero para la bobina 6691381, en las posiciones señaladas en la Figura 3.

En este caso se observa un cambio más significativo del régimen de fricción en cara superior e inferior, a medida que se desarrolla el proceso de laminación. Además, entre cara superior e inferior no hay tanta diferencia de superficie como el caso anterior.

Coincidente con la situación física observada, la evolución del coeficiente de rozamiento para esta bobina sufre una variación más importante de punta a cola, como se puede ver en la Figura 10. El valor medio de  $\mu$  es mayor para este caso ( $\mu_3 = 0,0188$  y  $\mu_4 = 0,0363$ ) que para la bobina analizada anteriormente ( $\mu_3 = 0,0081$  y  $\mu_4 = 0,0108$ ). La gran diferencia entre los  $\mu$  de ambas bobinas, se debe posiblemente a que en el caso de la primer bobina, los cilindros del #3 presentaban un mayor desgaste que en el caso de la segunda, como ya se ha mencionado en sección II, además la bobina 6691381 tiene una mayor resistencia a la deformación (mayor  $C_{eq}$ , menor TFL y TB).



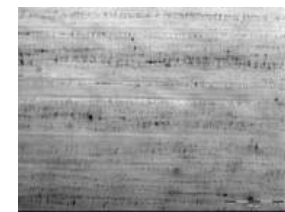
(a) Posición 1 (949mpm) Cara Superior



(b) Posición 1(949mpm) Cara Inferior



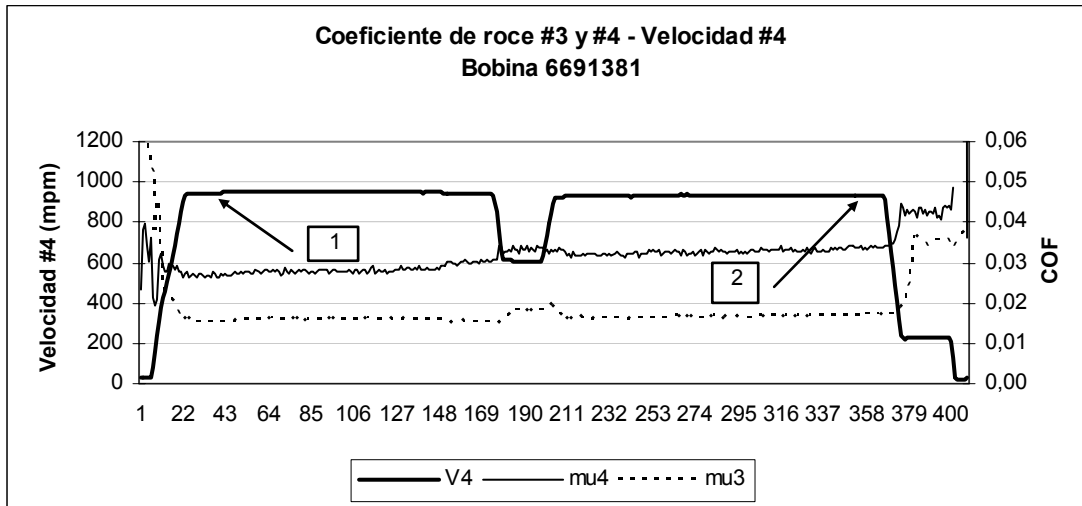
(c) Posición 2 (933mpm) Cara Superior



(d) Posición 2 (933mpm) Cara Inferior

**Figura 9** - Micrografías 100X de superficie de la chapa en estado de laminación Bobina 6691381





**Figura 10** - Coeficiente de roce en #4 – Bobina 6691381

De la historia previa de cada bobina, de las variables de laminación en frío y de los resultados observados sobre la superficie de la chapa pueden resumirse los siguientes aspectos:

- La bobina 6537011 presenta un menor  $C_{eq}$ , mayor TFL, mayor TB, menor rugosidad de #4, mayor desgaste en puente previo y una lubricidad similar que la bobina 6691381.
- Esta situación, con esos parámetros ligeramente diferentes es suficiente para ser evidenciados por el coeficiente de rozamiento calculado para el #4, que es mayor para la segunda bobina.
- La observación microscópica de la superficie es sensible también a las diferencias mencionadas, como se desprende de la mayor densidad de cavidades hidrodinámicas observadas en el caso de la bobina 6537011.
- Posiblemente la diferencia de superficie superior e inferior en ambas bobinas, es influenciada por la superficie del hot band que también presenta diferencia entre caras <sup>(5)</sup>, pero también debe señalarse que el sistema de refrigeración del tandem puede ser insuficiente para espesores ultrafinos, por cuanto se ha encontrado en las mediciones históricas de los últimos dos años, diferencias de temperatura promedio de 5°C entre cilindro de trabajo superior e inferior (siendo éste último el más caliente) en el caso del puente 4.

#### 4 CONCLUSIONES

La observación microscópica de la superficie laminada ha mostrado ser un método sensible al estado de fricción que se establece en el laminado en frío de material base para hojalata, permitiendo apreciar el régimen de lubricación mixto que se establece en el laminado de espesor ultrafino.

Pequeñas variaciones de factores de proceso como composición química del acero, temperaturas de laminación en caliente, composición del lubricante y rugosidad de cilindros, que aún estando en rango de especificación, producen estados perfectamente diferenciables, tanto matemática como físicamente, en el laminador en frío. Esta alta sensibilidad es consecuencia de un sistema de refrigeración muy

limitado en caudal, lo cual se manifiesta en las notables diferencias observadas entre cara superior e inferior de la chapa.

El aumento gradual de fuerza de laminación en la misma bobina a gap constante, es otra evidencia de la deficiencia en el sistema de refrigeración de cilindros y chapa.

En casos extremos, el incremento de fuerza provoca problemas de forma en la banda laminada.

## REFERENCIAS

- 1 S. Schmid & W. Wilson – Lubrication Engineering – Feb 1996 – Vol 52, 2. 168 - 175
- 2 J. A. Schey – Journal Institute of Metal 1962 – 1963 – 91 – 360
- 3 P. Thomson & J. Hoggart – The Journal of the Australian Institute of Metals – Vol.12 , 3 Aug 1967
- 4 W. Roberts – Cold Rolling of Steel – M. Dekker Inc. 1978 – p. 296
- 5 J. Alday & E. Ubici – 15<sup>th</sup>. IAS Rolling Conference – p. 93 - 102