

CONTROL EN EL CONSUMO DE RODILLOS DE APOYO (5%Cr), UTILIZADOS EN LOS MOLINOS DE LAMINACION EN CALIENTE¹

Alfonso Hernandez²
Luis Alfonso Borjon²
Waldemar Braatz³
Marcelo Rebellato³
Rumualdo Servin⁴
Laura G. Castruita⁴

Resumen

El desarrollo tecnológico en el proceso de laminación ha permitido que actualmente se utilicen rodillos de apoyo forjados con 5% de cromo, los cuales tienen mejores propiedades mecánicas, sin embargo este tipo de rodillos requieren de un mantenimiento más estricto y un control de desbastes en el que se involucran las principales variables de laminación, sin afectar el rendimiento, calidad del producto y mejorando la eficiencia del rodillo durante su desempeño operativo; este trabajo nació de la necesidad de aprovechar al máximo la vida útil del rodillo y controlar el consumo de rodillos de apoyo en el molino Tandem de Laminación en caliente. Utilizando variables de campo y aplicando las teorías científicas de Archard, Hertz y Kapadia, las cuales han sido previamente establecidas, se llegó al desarrollo de un modelo matemático aplicable para controlar y eficientar el consumo de material rectificado en el cuerpo de los rodillos de apoyo después de cada campaña de laminación. El modelo ya fue probado en los molinos de Línea de tira de Laminación en caliente de AHMSA y tiene un margen de error de $\pm 5\%$, los beneficios obtenidos han sido el incremento en la producción de 7 a 10 millones de toneladas por rodillo, que representan un 42 % más de lo establecido.

Palabras clave: Rodillo de apoyo, Línea de tira, Molino Tandem.

CONTROL IN THE CONSUME OF BACKUP ROLLS (5%Cr), USED IN TANDEM HOT STRIP MILL

Abstract

Technological development in the hot strip rolling currently use forged backup rolls with 5% chromium, which have better mechanical properties, however this type of rolls require a strict maintenance and control of dressing; considering the main variables of hot strip rolling, also without influence the performance, quality of strip and improving the efficiency of the roll along their operation; this project star with the necessity of increase the operation life of the roll and controlling the use of backup rolls in the tandem hot mill. Using field variables and applying scientific theories Archard, Hertz and Kapadia, which have been previously established, obtain the development of mathematical model used to control and optimize the consume of dressing material in the backup roll after hot rolling campaign. The mathematical model has already been tested in the tandem hot strip mill from AHMSA and it has a margin of error of $\pm 5\%$, the benefits obtained are increase the production from 7 to 10 million tons per roll, which represent 42% more than established.

Key words: Backup roll, Hot strip, Tandem mill.

¹ Trabajo a ser presentado en el 48º Seminario de Laminación – Procesos, Productos Laminados y Revestidos, 24 al 27 de octubre de 2011, Santos, SP, Brasil.

² Altos Hornos de México S.A de C.V, Email – direccion_acero@gan.com.mx

³ Villares Rolls, Email – rolls@villares.com.br

⁴ Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica-UAdeC, Email – romualdoservinc@prodigy.net.mx

1 INTRODUCCION

El mundo moderno está construido con la fortaleza del acero, el proceso siderúrgico es uno de las más importantes a nivel mundial ya que es proveedor de materia prima para una infinidad de industrias, entre las que destacan es la automotriz, construcción, alimentaria, etc. El proceso de laminación en caliente es uno de los más utilizados para la producción de acero. Un molino de laminación en caliente por lo general tienen seis castillos, que utiliza cuatro rodillos, dos son de trabajo y tienen contacto directo con la lamina, dos rodillos de apoyo, estos tienen contacto con los rodillos de trabajo como se muestra en la Figura 1.

Los rodillos de laminación son una de las herramientas más costosas en el proceso de laminación,⁽¹⁾ es por eso que resulta interesante controlar el consumo de rodillos de apoyo, eficientando al máximo el rectificado de estos después de cada campaña de laminación. Las campañas de laminación de los rodillos de apoyo son muy prolongadas. En la Figura 1, se puede apreciar la representación grafica del desgaste que se produce debido al contacto mecánico con el rodillo de trabajo, así como la presión que se ejerce sobre el cuerpo de trabajo.

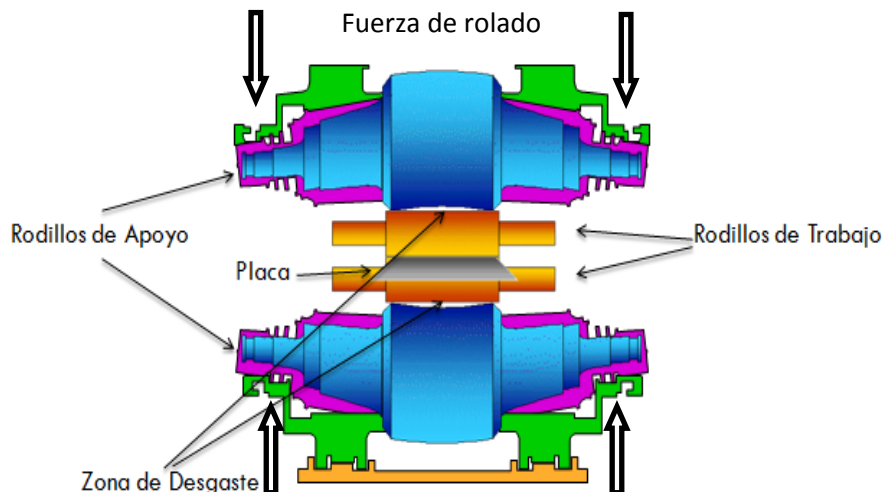


Figura 1. Representación de la zona de desgaste de los rodillos de apoyo que están en contacto con los rodillos de trabajo.

Los rodillos son sometidos a grandes volúmenes de trabajo, además de extremas temperaturas, obviamente se necesita una gran resistencia a fracturas y fallas⁽²⁾ considerando que los rodillos son los insumos más caros en el proceso de laminación, es importante especificar que es lo que desgasta al rodillo, por todo lo anterior se vuelve importante determinar cómo se genera el desgaste de los rodillos en Laminación en Caliente.⁽³⁾

Las propiedades mecánicas requeridas para los rodillos de laminación varían dependiendo de la etapa del proceso en la línea de rodado, inicialmente la resistencia a las altas temperaturas y la tenacidad en general del material son las variables dominantes y posteriormente la resistencia al desgaste de abrasión se vuelve el factor más importante, el rendimiento aun no está bien definido ya que pueden influir varios factores: masa o longitud de la lamina producida por milímetros de material utilizado ó total de toneladas de producto procesado por conjunto de rodillos por campaña de laminación.⁽⁴⁾

La experiencia ha demostrado que el desgaste aumenta rápidamente después de producir una cantidad específica de acero laminado; de ahí que los cambios de rodillos deben hacerse después de cierta producción para evitar desgastes catastróficos,⁽⁴⁾ posteriormente se les da un mantenimiento a los rodillos, dentro del cual se considera el rectificar la superficie del cuerpo del rodillo para eliminar el material fatigado mecánicamente debido al contacto constante con el rodillo de trabajo.

En los últimos años se han propuesto algunos modelos que actualmente se encuentran en operación, los cuales consideran una serie de valores empíricos basados en la experiencia industrial. Otra desventaja es que las unidades de desgaste obtenidas en la aplicación del modelo no corresponden a una variable conocida como lo es el volumen, peso o longitud. Tal caso de estos modelos es el que aplica Oike,⁽⁵⁾ el cual estima que el desgaste se puede calcular mediante la ecuación:

$$C_m = \alpha \sum_{j=1}^n \left[\frac{P_i}{w_i l_i} \right]^a (r_i l_i)^b \frac{L_i}{\pi D} \delta_i(z)$$

En donde:

C_m = Desgaste

$\delta_i(z) = 1$ Cuando $0 < z \leq w_i/2$

$\delta_i(z) = 0$ Cuando $z > w_i/2$

i = Numero de pases de rolado

n = Número total de pases de rolado

P = Fuerza separadora

w = Ancho de la tira

l = Arco de contacto

r = Reducción

L = Longitud de la tira

D = Diámetro del rodillo de trabajo

α, a, b = Coeficientes empíricos que dependen del material laminado, temperatura de la lámina, lubricación, enfriamiento, etc.

En la década de los 1980, el desarrollo de la instrumentación avanzada (microscopio electrónico de barrido, instrumentos para el análisis de la superficie, etc.) facilito la investigación sobre el estado de las superficies permitiendo la identificación de los mecanismos presentes durante el desgaste, tanto a nivel de laboratorio como en la industria.⁽⁶⁾

2 DESARROLLO DEL MODELO

Los rodillos de apoyo de un castillo de cuatro, tienen como función soportar la carga de rolado que se transmiten al rodillo de trabajo y este a su vez transmite la deformación a la lamina tal como se muestra en la Figura 1. La continua rotación de los rodillos hace que una fuerza de compresión actúe de forma repetida sobre las superficies de contacto entre los rodillos de trabajo y de apoyo. Esto provoca que ocurra fatiga de contacto, que después de cierto período de trabajo produce deformaciones en las zonas superficiales de los rodillos.⁽⁷⁾

La superficie de los rodillos de apoyo no están en contacto directo con la lamina, sin embargo el contacto con el rodillo de trabajo genera un desgaste que es relativamente pequeño comparado con el que sufre el rodillo de trabajo, por esa

razón, las campañas de los rodillos de apoyo son mucho más largas que las de los rodillos de trabajo, pudiendo llegar a permanecer en un castillo trabajando hasta 28 días con tan solo pequeños paros de molino para inspeccionarlos superficialmente. Cuando no se tiene un control del desgaste y la fatiga mecánica del rodillo de apoyo se puede generar pequeñas micro-grietas que pudieran provocar daño severo, en este caso, es necesario eliminar el defecto aplicando un maquinado superficial, sin embargo este proceso reduce significativamente su vida útil y afecta su desempeño.

2.1 Desgaste

En la Figura 2, se representa gráficamente la teoría de Archard⁽⁸⁾ para dos superficies que se encuentran en contacto deslizándose una sobre otra sometidas a una carga, la cual establece la siguiente fórmula:

$$V = \frac{K_{abr} Lx}{H}$$

En donde:

V = Volumen del material removido

K_{abr} = Coeficiente de desgaste abrasivo

L = Carga aplicada

x = Distancia recorrida

H = Relación de Dureza

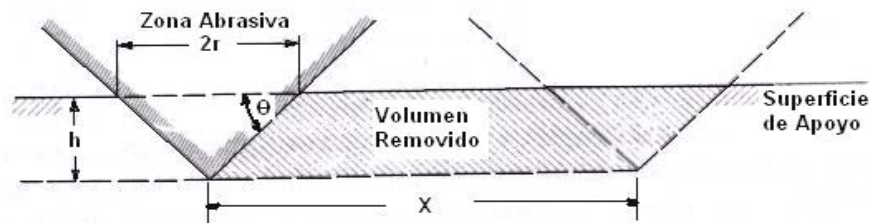


Figura 2. Desgaste de un material aplicando la teoría de Archard.

En la Figura 3, se representa gráficamente la teoría de Hertz,⁽⁹⁾ la cual establece las formulas de área de contacto para dos superficies cilíndricas que se encuentran en contacto, con sus respectivas variables, estas formulas son las siguientes:

$$a = \left(\frac{3PR}{4E^*} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad P_0 = \frac{3P}{2\pi a^2} = \left(\frac{6PE^{*2}}{\pi^3 R^2} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}, \quad \frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}$$

En donde:

a = Longitud de arco de contacto

P = Carga normal

- R = Radio relativo de curvatura
- E^* = Módulo elástico efectivo
- P_0 = Presión máxima
- R_1, R_2 = Radio de cada una de los cilindros
- E_1, E_2 = Modulo de elasticidad de cada uno de los cilindros

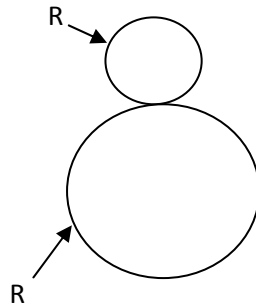


Figura 3. Área de contacto considerando 2 superficies

La Figura 4, nos muestra gráficamente el área de contacto mecánico que existe entre los rodillos de laminación, en donde se puede apreciar claramente el ancho del cuerpo del rodillo y el arco de contacto.

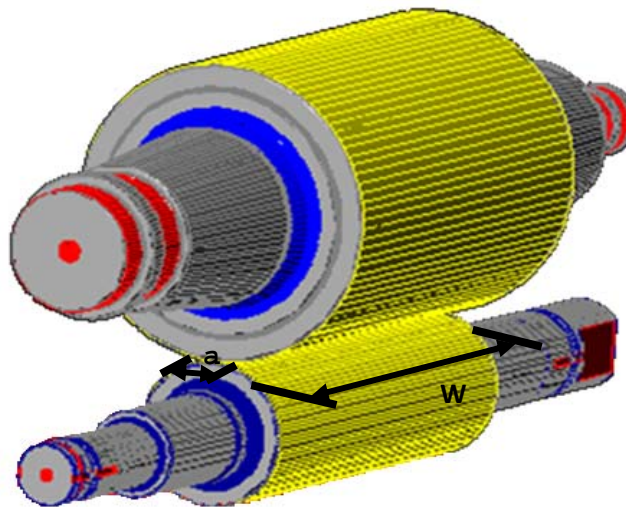


Figura 4. Representación del contacto mecánico entre dos rodillos de laminación.

Si se aplica la teoría de Archard⁽⁸⁾ al proceso de laminación, se considera que el volumen de material removido en el rodillo es el material que se desgaste y equivale al área de contacto entre los dos rodillos por la altura desgastada Ah , aplicando este principio, despejando la altura del material desgastado h nos queda de la siguiente manera:

$$h = \frac{K_{abr} Lx}{HA} \tag{1}$$

Considerando que $\frac{L}{A}$ representa la presión de una carga sobre un área determinada se puede sustituir en la ecuación (1) P_0 , considerando que se está buscando la presión máxima de contacto, de tal modo que la ecuación (1) queda de la siguiente manera:

$$h = \frac{K_{abr} P_0 x}{H} \quad (2)$$

Sustituyendo la ecuación de presión máxima de Hertz [9] en la ecuación (2), nos queda de la siguiente manera:

$$h = \frac{K_{abr} \left[\frac{6PE^{*2}}{\pi^3 R^2} \right]^{\frac{1}{3}} x}{H} = \frac{K_{abr} \left[\frac{6PE^{*2}}{\pi^2 \pi R^2} \right]^{\frac{1}{3}} x}{H} \quad (3)$$

La Figura 4 ilustra el contacto mecánico entre los dos rodillos de laminación, donde se puede apreciar que el área de contacto $A = aW$. Aplicando la teoría de contacto elástico de Hertz,⁽⁹⁾ en la que el área establece un radio relativo de curvatura R , en la cual el área de contacto es $A = \pi R^2$, además de considerar la distancia de contacto a , se puede sustituir en la ecuación (3) por el área de contacto establecida anteriormente para el proceso de laminación, quedándonos la siguiente ecuación:

$$h = \frac{K_{abr} \left[\frac{6PE^{*2}}{\pi^2 aW} \right]^{\frac{1}{3}} x}{H} \quad (4)$$

En donde:

W = Ancho del cuerpo de rodillo

a = Arco de contacto

El proceso de laminación es un proceso en el que el material de mayor dureza se encuentra girando y la ecuación básica de desgaste fue generada a partir de un modelo en el que el material duro se mueve en línea recta sin girar, por tal motivo para el desarrollo del modelo se debe de multiplicar la ecuación (4) por un factor que relaciona el arco de contacto entre dos cilindros, el cual es $\frac{D_1}{D_2}$, de tal manera que la ecuación (4) quedaría de la siguiente manera:

$$h = \frac{K_{abr} \left[\frac{6PE^{*2}}{\pi^2 aW} \right]^{\frac{1}{3}} x \frac{D_1}{D_2}}{H} \quad (5)$$

Con la ecuación (5) se puede calcular el valor unitario de la altura que se desgasta el rodillo de laminación para cada planchón que es procesado, sin embargo una campaña de laminación consta de varios planchones laminados, variando de acuerdo con la programación de la producción, por tal motivo el valor total del desgaste por campaña de laminación corresponde a una sumatoria de valores acumulándose los desgaste desde el primer planchón hasta el número de planchón indefinido n , además de considerar que la longitud total de la lamina se identifica con la variable L , la cual es equivalente a la distancia recorrida x , por lo tanto la ecuación final del modelo matemático quedaría de la siguiente forma:

$$h = \sum_1^n \frac{K_{abr} \left[\frac{6PE^{*2}}{\pi^2 aW} \right]^{\frac{1}{3}} \frac{L}{D_1} \frac{D_1}{D_2}}{H} \quad (6)$$

En donde:

K_{abr} = Coeficiente de desgaste abrasivo $\left(\frac{mm^3}{kNm} \right)$

E^* = Módulo elástico efectivo $\left(\frac{N}{mm^2} \right)$

a = Longitud de arco de contacto (mm)

P = Carga de laminación (Fuerza de rolado) (N)

L = Longitud total de la lámina (m)

H = Relación de Dureza

W = Ancho del cuerpo de rodillo (mm)

D_1 = Diámetro del rodillo de trabajo (mm)

D_2 = Diámetro del rodillo de apoyo (mm)

h = Material desgastado (mm)

2.2 Fatiga Superficial

Los rodillos de apoyo requieren de un mantenimiento preventivo después de cada campaña de laminación, el cual consiste en inspeccionar superficialmente para verificar que no existan grietas que pudieran propagarse durante la operación hasta que el rodillo sufra un accidente, además de esta inspección es necesario eliminar el material que sufrió fatiga debido al trabajo mecánico a que fue sometido durante la campaña de laminación. Kapadia,⁽¹⁰⁾ establece en su teoría que el material fatigado durante el proceso de laminación está compuesto por cuatro capas, las cuales son: Corrosión, el cual consiste en una pequeña capa de entre 0.05 y 0.10 mm de material que se oxida y corroe debido a la temperatura y humedad en contacto con el rodillo. Deformación, el cual consiste en una segunda capa de material que sufre deformación mecánica debido a las fuerzas de rolado que se aplican en los rodillos de apoyo, las cuales provocan un efecto de compresión entre las superficies de los rodillos, el cual produce como efecto la deformación antes mencionada y mide aproximadamente 0.10 mm. Agrietamiento, el cual consiste en una superficie que contiene pequeñas grietas producidas por el contacto mecánico entre los rodillos, pudiendo llegar a medir hasta 0.20 mm, y por último, la Zona Fatigada, la cual es una región de la superficie que debido al contacto mecánico genera un tratamiento

termo mecánico, el cual consiste en incremento de dureza debido a los constantes periodos cíclicos de carga que producen la compresión de las superficies, esta zona de fatiga puede llegar a medir hasta 0.45 mm. La representación grafica de esta teoría se muestra en la Figura 5.

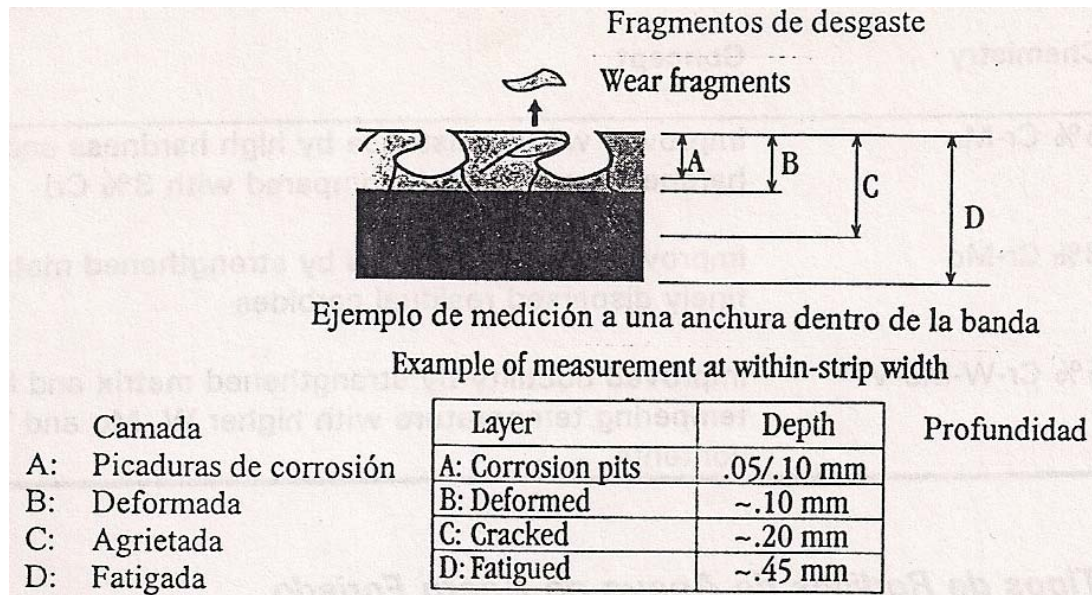


Figura 5. Superficie de material fatigado, aplicando la teoría de B.M Kapadia

El material fatigado es una variable muy difícil de cuantificar, para nuestro caso definimos al material fatigado con la variable h_1 y aplicamos la teoría de Kapadia⁽¹⁰⁾ con las siguientes condiciones:

- Si el material desgastado h , es menor a 0.45 mm, el material fatigado h_1 , se considerara igual a 0.45 mm, por lo tanto, el material que se debe de rectificar es de 0.45 mm, (Si $h < 0.45$, entonces $h_1 = 0.45$ mm).
- Si el material desgastado h , es mayor a 0.45 mm, el material fatigado h_1 , se considera que será igual al material desgastado h , por lo tanto el material que se debe de rectificar deberá de ser la misma cantidad de material que se desgasto durante la campaña de laminación (Si $h > 0.45$ mm, entonces $h_1 = h$).

3 RESULTADOS

Los tiempos muertos en un molino de laminación representan pérdida de productividad que se transforman en perdida de dinero, por lo cual se requiere un control adecuado en el cambio de rodillos, sobre todo en los rodillos de apoyo, ya que por su volumen y peso, se requiere de tiempos prolongados para cambiarlos, además es indispensable llevar un estricto control en el rectificado de los rodillos que elimine al máximo el desperdicio de material, para llevar a cabo este control se toman en cuenta dos variables, las cuales son:

- Desgaste del cuerpo del rodillo, la cual se calcula aplicando la ecuación (6) del modelo desarrollado.
- Material fatigado, la cual se determina aplicando la teoría de Kapadia.⁽¹⁰⁾

El control de diámetros en los rodillos de laminación nos lleva a establecer una ecuación, la cual se aplica para determinar el nuevo diámetro que debe de tener el

rodillo después de que se ha rectificado para regresar a operación, esta ecuación nos quedaría de la siguiente manera:

$$\phi_1 = \phi_0 - h - h_1 \quad (7)$$

En donde:

- ϕ_1 = Diámetro que se debe de dejar rectificado (mm)
- ϕ_0 = Último diámetro de la campaña (Diámetro anterior de rectificado) (mm)
- h = Altura de material desgastado (mm)
- h_1 = Altura de material fatigado (mm)

En la ecuación anterior se considera la altura del material desgastado, el cual se calcula con la ecuación (6), desarrollada aplicando las teorías de Archard⁽⁸⁾ y Hertz.⁽⁹⁾ La ecuación (7) considera también la altura del material fatigado el cual se determina aplicando la teoría de Kapadia.⁽¹⁰⁾

En la Tabla 1, se muestran la hoja de control de un rodillo de apoyo, el cual ha sido monitoreado aplicando el modelo descrito anteriormente.

Tabla 1. Hoja de control para el rectificado del rodillo de apoyo 8614

Ubicación		Diámetro (mm)		Material (mm)		
Castillo	Posición	Anterior ϕ_0	Nuevo ϕ_1	Desgastado h	Fatigado h_1	Rectificado
F-2	Superior	1238.300	1237.444	0.406	0.450	0.856
F-5	Inferior	1237.444	1236.174	0.635	0.635	1.270
F-3	Inferior	1236.174	1235.058	0.558	0.558	1.116
F-2	Superior	1235.058	1234.380	0.228	0.450	0.678
F-4	Inferior	1234.380	1233.416	0.482	0.482	0.964
F-4	Inferior	1233.416	1232.400	0.508	0.508	1.016
F-5	Inferior	1232.400	1231.646	0.304	0.450	0.754
F-2	Superior	1231.646	1230.993	0.203	0.450	0.653
F-2	Superior	1230.993	1230.315	0.228	0.450	0.678
F-3	Inferior	1230.315	1229.249	0.533	0.533	1.066

4 DISCUSION Y CONCLUSIONES

El material fatigado tiene relación directa con el desgaste, cuando el desgaste es mínimo quiere decir que el contacto mecánico en conjunto con las variables operativas no influyeron considerablemente para que el material se desgastara, y por lo tanto la fatiga superficial también es mínima, sin embargo cuando existe un valor considerable de desgaste debe de existir también un valor considerable de fatiga. Aplicando este criterio en el proceso de laminación, cuando se laminan espesores delgados de acero, las velocidades en combinación con los diámetros de los rodillos y las cargas de laminación influirán directamente en el desgaste de los rodillos y por consiguiente existirá una relación directa con la fatiga superficial. Cuando se tiene pleno conocimiento de estas dos variables se puede establecer un parámetro de control que no ponga en riesgo la operación del molino y la calidad del producto procesado.

El material fatigado en un rodillo de laminación varía alrededor de 0.45mm cuando el desgaste es menor a este mismo valor, para desgastes mayores a 0.45 mm se considera que el desgaste es igual al material fatigado.

El modelo desarrollado anteriormente predice el cálculo del material que se desgatará en cada campaña de laminación y complementándolo con los estudios de fatiga mecánica, se puede establecer un control para el rectificado de los rodillos de apoyo, existe un margen de error que puede variar en un 5%, el cual puede reducirse considerablemente si se continúa con la línea de investigación. Este modelo se aplica actualmente en AHMSA y ha traído como resultado la disminución de costos al incrementar la producción de 7,000,000 a 10,000,000 de toneladas producidas durante toda la vida útil del rodillo de apoyo.

REFERENCIAS

- 1 Ohkomori, Cause and prevention of spalling of backup rolls for hot strip mill, Transactions of the ISIJ, 1988, p. 4.
- 2 J.A Schey, Tribology in Metalworking – Friction, Lubrication and Wear, American Society for Metals, Metals Park, OH, 1983, Chapter 6 p.249 and 312
- 3 M. Chausovich, Rolling of Metallic Materials, Veselin Maslesa, Sarajevo, 1983, 30, p.1-2
- 4 S. Spuzic, Wear of hot rolling mill rolls: an overview, Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 1994, 176, p. 264.
- 5 V.B. Ginzburg, Steel Rolling Technology, Theory and Practice, Marcel Dekker, New York, 1989, p. 505.
- 6 A. Suarez, J. Velez, Study on wear proposed by Archard, Redalyc, 2005, 72, p. 28
- 7 Nakagawa M.A, Consideration and decision of suitable regrinding amount of backup roll for 4-High mills, [J] Hitachi Review, 1975, 33, p 467-472
- 8 R.D. Arnell, P.B Davies, J. Halling, T.L Whomes, Tribology, Principles and Design Applications, The Macmillan Press Ltd., Springer – Verlag Nueva York, Estados Unidos de America, 1993, Chapter 2 p. 54 and Chapter 3 p. 71.
- 9 K.L Johnson. Contact Mechanics. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 1985, Chapter 2 p.36-53.
- 10 B. M. Kapadia, Iron And Steel Society, Rolling Mills Rolls – Fundamentals and Practice, Monterrey N.L, México. 1998, Lecture IV p.6.