



amplia y más profunda que le permitirá en un futuro, no tan solo participar de grandes proyectos como aplicadores de su especialidad, sino también como originadores de la ingeniería preliminar, conceptual y detallada de esos grandes proyectos integrales que hoy se edifican en un México que se innova en su mayor proporción con tecnologías externas.

De esta manera, se estará generando en el estudiante de las ingenierías un interés por participar en equipos de trabajo multidisciplinarios en el que la cooperación entre iguales lo induzcan en una forma colaborativa-competitiva a la investigación que sustente y fundamente sus aportaciones e intervenciones que, además de incrementar sus conocimientos, lo estarán proyectando como un planificador y administrador ejecutivo de esos grandes proyectos que hoy llegan a nuestro país con una ingeniería desarrollada en otras latitudes y tan solo para ser aplicadas. La Ingeniería es, hoy por hoy, una de las carreras del futuro, por ello, las instituciones educativas nacionales deben contraer el compromiso de educar al universitario de Ingeniería para que desarrolle aptitudes de alta calidad y pertinencia que le permitan desarrollar altos índices de desempeño en su futuro ejercicio profesional con base en un aprendizaje sustentado en la investigación científica.

FUENTES DE CONSULTA

ALCOCER S. (2008), Secretario General de la UNAM: Educación en Ingeniería, XXXV Conferencia Nacional de Ingeniería (ANFEI). Tomado de la red: www.anfei.org.mx/XXXV_CNI_2.pdf; 14 de Marzo 2001

COLLAZOS C., GUERRERO L. y VERGARA A. (2001); Un cambio en el rol del profesor en referencia a Johnson D., Tercer Congreso de Educación Superior en Computación. Tomado de la red: <http://www.dcc.uchile.cl/~luguerre/papers/CESC-01.pdf>. 18 de Marzo 2011

GARCIA R. (1991). Diccionario Larousse Usual. México: Larousse

HUBAND, F. (2008); Avances de la Educación en Ingeniería; Director Ejecutivo de la American Society for Engineering Education; ASTM Standarization News, Entrevista Sept.-Oct. 2008. Tomado de la red: http://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPSO08/provocative_sps08.html. 16 de Marzo 2011.

LAZO Q.G. y CARDENAS B. L.(2004), Educación en Ingeniería en México; ITESM, Tomado de la red: www.science.oas.org/Ministerial/Inge/MEXICO_%20Lazo.pdf. 16 de marzo 2011.

KRICK .E.V. (2006). Introducción a la Ingeniería y al Diseño en la Ingeniería. México: Limusa.

REVELO N. Eduardo y RIVAS V. (2008), El Proyecto Integrador como investigación en el Aula; I Congreso Latinoamericano de Enseñanza en Diseño; Fundación de Academia de Dibujo Profesional. Tomado de la red: www.palermo.edu/dyc/congreso-latino/pdf/Revelo.pdf. 18 de marzo 2011

VILLA R. E. (2011) Director del CONACYT; 1ª. Reunión Ordinaria de Consejos y Organismos Estatales de Ciencia y Tecnología, A. C.. Tomado de Diario de Xalapa, General, p8A, Jueves 17 de Marzo, 2011.



Modelado del funcionamiento del Molino Tandem para procesos de laminación en caliente

Carlos Arturo Vega Lebrún
Genoveva Rosano Ortega
Rumualdo Servín Castañeda
Liliana Ibeth Barbosa Santillán



Resumen

En líneas de producción de acero para laminación en caliente, los molinos centrales de la línea de fabricación tienen la función de conformar el acero y proporcionar las propiedades a la lámina. El molino tándem se encuentra calibrado para estos fines, el cual limita el espesor de la cinta y remueve la capa superficial. Durante el trabajo de estos molinos, es viable la implementación de un modelo matemático que permita detectar el comportamiento de los rodillos de apoyo que son utilizados en la línea de producción. Este artículo consiste en evaluar la serie de variables principales durante el proceso de laminación en caliente, para lo cual los rodillos de apoyo son quienes reciben las mayores cargas durante su operación y establece un modelo matemático que permite detectar sus comportamientos. En la toma de decisiones de los procesos de fabricación, el contar con un modelo matemático permite además de analizar la información, evaluar el comportamiento de las variables y tomar las mejores decisiones para decidir la continuidad de la producción, la sustitución de alguno de los rodillos, la rotación y el mantenimiento de estos o la suspensión de la producción para evitar fallas que afecten la calidad de la producción y aumenten los costos por mantenimientos correctivos.

Abstract

Manufacturing line core mills, at steel production lines for Hot Strip Rolling, have the function to shape the steel and provide the characteristic steel sheet properties. Tandem mill has been set up for these purposes, which restricts the strip thickness and removes the surface layer or scale. During these mills work it is feasible to implement a mathematical model that enable to detect the used backup roll behavior during this production line phase. This article consists on the assessment of a main variable series during the hot strip rolling, where the backup rolls are the ones which receive the loads during the operation, and establishes a mathematical model to enable to detect their behavior before the changes in these variable values. For the decision making about manufacturing and business, counting with a mathematical model and experimental design of their performance allows to analyze the information, to observe the behavior of the variables and their

Centro Interdisciplinario de Posgrado - Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, Docente de Posgrado de la Universidad de Xalapa
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica - Universidad Autónoma Coahuila
Centro Universitario de Ciencias Económico Administrativas - Universidad de Guadalajara

values and to make the best decision to analyze the results and decide about the production work continuity, the importance of some rolls replacement, their own turnover, their maintenance or the production stoppage in order to prevent failures which affect the production quality and increase the corrective maintenance costs.

Palabras Clave: Optimización y Modelado de Producción de acero, Laminación en Caliente, Campañas de Laminación.

Laminación en Caliente

La laminación en Caliente es uno de los procesos más importantes en la industria acerera; a continuación se describen brevemente las etapas principales:

- Horno de recalentamiento: La temperatura de los planchones se eleva a 1,300°C para que tengan las propiedades adecuadas para la deformación mecánica.
- Rompedor Horizontal de oxido: Una serie de chorros de agua de alta presión remueven la capa de oxido formado en la superficie de los planchones.
- Molino desbastador: Se realiza la reducción vertical y horizontal para producir el planchón de transferencia. En algunos casos es reversible, el planchón se mueve hacia delante y atrás hasta reducir la barra de transferencia.
- Molino Continuo: Conocido también como molino acabador, en este molino es donde se obtiene el espesor y ancho deseado.
- Enrolladores: La cinta proveniente del Molino continuo es enrollada manteniendo una tensión constante proporcionada por el último castillo del Molino continuo, existiendo una temperatura determinada de enrollado.

Molino continuo.

Para la laminación en caliente por lo general se tienen seis molinos, de los cuales los primeros tres son desbastadores y los últimos tres son acabadores, estos molinos constan de cuatro rodillos, dos son de trabajo y tienen contacto directo con la lamina, la cual se encuentra entre un rango de 1000 °C hasta 800 °C a la salida y dos rodillos de apoyo, estos tienen contacto con los rodillos de trabajo como se muestra en la figura 1.

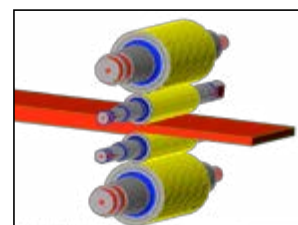


Figura 1. Rodillos de trabajo y apoyo para laminación en caliente.

La presión que los rodillos ejercen en el planchón da como resultado una reducción de 203.2 a 1.8 mm según sea la especificación del cliente, sin embargo este proceso es uno de los más costosos para la industria siderúrgica por los elementos que integra (Ohkomori, 1988).

Las campañas de laminación de los rodillos de apoyo son muy prolongadas. En la Figura 2, se puede apreciar la representación grafica del desgaste que se produce debido al contacto mecánico con el rodillo de trabajo, así como la temperatura y presión que se ejerce sobre el cuerpo de trabajo.

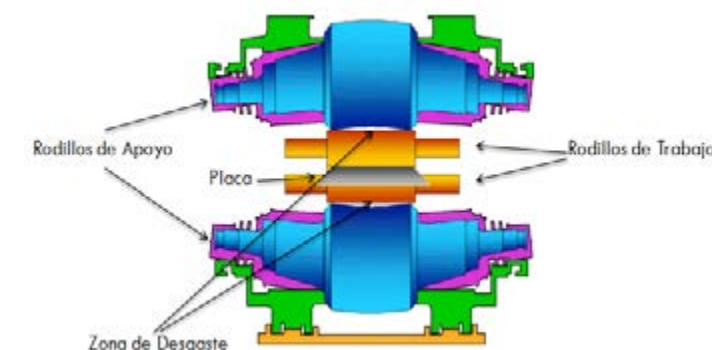


Figura 2. Representación de la zona de desgaste de los rodillos de apoyo que están en contacto con los rodillos de trabajo.

Desgaste de Rodillos de laminación en Caliente.

Los rodillos son sometidos a grandes volúmenes de trabajo, además de extremas temperaturas, obviamente se necesita una gran resistencia a fracturas y fallas (Schey, 1983) 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 detectar cómo se genera el desgaste de los rodillos en Laminación en Caliente (Chausevich, 1983). Las propiedades mecánicas requeridas para los rodillos de laminación varían dependiendo de la etapa del proceso en la línea de rolado, mientras que inicialmente es 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 en caliente producida por milímetros de material utilizado ó total de toneladas de producto procesado por conjunto de rodillos por campaña de laminación (Spuzic, 1994).

Tipos de Desgaste en los rodillos.

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 (Spuzic, 1994), por lo que es necesario identificar los procesos que desgastan a estos elementos, los cuales se mencionan a continuación:

Abrasión: Este elemento es uno de los componentes dominantes, está presente en el total del desgaste durante el proceso (Ginzburg, 1989). Teniendo presencia de escalas de oxido de alta dureza poca elasticidad en la superficie del acero caliente, generalmente la abrasión se puede conceptualizar como dos cuerpos o tres cuerpos de desgaste (Lundberg, 1993) y (Gahr, 1987), se espera que sea de modo importante el deterioro de los rodillos ya que se forman micro-cortes, micro-fatiga y micro-grietas que perjudica la calidad del laminado del acero (Ginzburg, 1989), este desgaste depende de la forma y la dureza de las partículas abrasivas, se produce deformaciones ya sea de micro corte o de elasticidad en la superficie y en las capas interiores del rodillo por el contacto, esto da como consecuencia la formación de grietas (Jahanmir, 1981).

Fatiga Térmica: En este punto la superficie del rodillo es altamente forzado al trabajo ya que sube el calentamiento por el contacto al acero, pero también la temperatura baja por la inyección de agua, el estrés que se produce en el rodillo es demasiado variable y deforma las capas plásticas del rodillo por la exposición de enfriamiento en la superficie. Cuando el rodillo trabaja más de lo normal se generan grietas térmicas que pueden producir la fractura total del rodillo (Lundberg, 1993), existen también algunas formas de corrosión, fatiga o estrés por corrosión, las cuales son también responsables del desgaste de los rodillos (Williams, 1965).

Adhesión: este fenómeno es definido como la transferencia del rodillo de trabajo al rodillo de apoyo causando la pérdida de la calidad del producto, se produce más fácilmente a la reducción de pases, el primero de estos es el que causa mayor fricción y como consecuencia el mayor desgaste, posteriormente los siguientes pases se tienen menos fricción (Corbett, 1990).

MODELADO MATEMATICO.

Desde la década de los 50, se ha trabajado fuertemente en la formulación de modelos que permitan expresar matemáticamente la variación del desgaste durante el contacto de superficies en movimiento, sin lograrse un avance significativo. Las principales dificultades se originan en la presencia de factores microscópicos, entre los cuales puede mencionarse la calidad superficial, las heterogeneidades del material y la temperatura localmente desarrollada, elementos normalmente dejados de lado por la mecánica clásica. La mayoría de los modelos reportados en la literatura han sido desarrollados para sistemas tribológicos específicos, un par de materiales en par-



tícula, una geometría de contacto determinada y un ambiente lubricante definidos sometidos a condiciones de operación también definidas.

En las primeras investigaciones sobre desgaste se obtuvieron ecuaciones empíricas de la forma $AW = KF \cdot v \cdot t^n$ donde AW = pérdida de masa, F =Fuerza, v =Velocidad y T =Tiempo; (en donde abc son constantes), desarrolladas para obtener datos específicos útiles en la construcción de motores y componentes de maquinaria.

En la década de los 80, el desarrollo de la instrumentación avanzada (microscopio electrónico de barrido, instrumentos para el análisis de la superficie, etc.) facilitó 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. (Suarez, 2005).

METODOLOGIA DE DISEÑO

En la industria acerera se crean varios productos, algunos ejemplos son vigas, varilla, planchones, placa rollada en caliente y en frío, lámina galvanizada, etc. El acero en su etapa de producción primaria en la colada continua, normalmente se produce en espesores de aproximadamente 8 pulgadas de espesor (203.2 mm), por anchos variables, para posteriormente ser transformada a una placa o lámina rollada en caliente.

La lámina debe pasar por los molinos universal y tándem (cuando se trata de laminación plana), estos aplican una fuerza de rolado para laminar el planchón hasta dejarlo al espesor que el cliente desee. Cuando se trata de un molino Minimill se omite el uso del molino universal y el planchón se recibe directamente de la colada continua con espesores que varían entre 2 y 2 ½ pulgadas (50.8 y 63.5 mm).

Los molinos de laminación en caliente normalmente están compuestos de cuatro rodillos, dos de apoyo que son los que soportan las cargas de trabajo y dos de trabajo que son los que están en contacto directo con la lámina.

Los rodillos de apoyo de un castillo de cuatro rodillos para productos planos tienen como función soportar la carga de rolado que se transmiten al rodillo de trabajo y este a su vez transmite la deformación de la lámina tal como se muestra en la figura No 3.



Adhesión: este fenómeno es definido como la **transferencia del rodillo de trabajo al rodillo de apoyo** causando la pérdida de la calidad del producto, se produce más fácilmente a la **reducción de pases**, el primero de estos es el que causa **mayor fricción** y como consecuencia el **mayor desgaste**, posteriormente los siguientes pases se tienen menos fricción (Corbett, 1990).

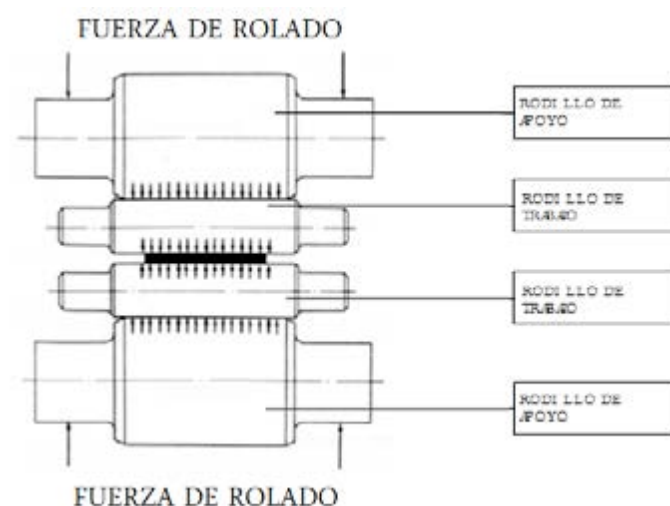


Figura 3. Representación gráfica de las cargas de rolado y principio fundamental del proceso de laminación.

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 (Nakagawa, 1975).

En el caso de los rodillos de trabajo, la fatiga no llega a representar un problema, debido a que el desgaste superficial provocado por las altas cargas de laminación y el contacto directo con los planchones de metal de alta temperatura, hacen que su campaña en el molino sea relativamente corta. Normalmente una campaña de laminación para este tipo de rodillos puede variar de 6 a 10 horas de trabajo, dependiendo de las variables de laminación de cada molino en particular.

La superficie de los rodillos de apoyo no están en contacto directo con el planchón, sin embargo el contacto directo 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. Esto es particularmente serio cuando se tiene en cuenta que los costos asociados a los rodillos de laminación están entre los mayores gastos de una planta siderúrgica, ya que son componentes fabricados con acero forjado y su estructura tiene un alto contenido de aleación (Ohkomori, 1988).

En la figura 4, se muestra la metodología de trabajo de esta investigación, la cual identifica las variables que afectan el funcionamiento y desgaste de los rodillos de apoyo de un molino Tándem de Laminación en caliente, se hace un comparativo con otras investigaciones y son utilizados los conceptos básicos de la teoría de Hertz (Jhonson, 1985) y Archard (Arnell, 1993). Como resultado se propone el siguiente modelo matemático soportado y sustentado.

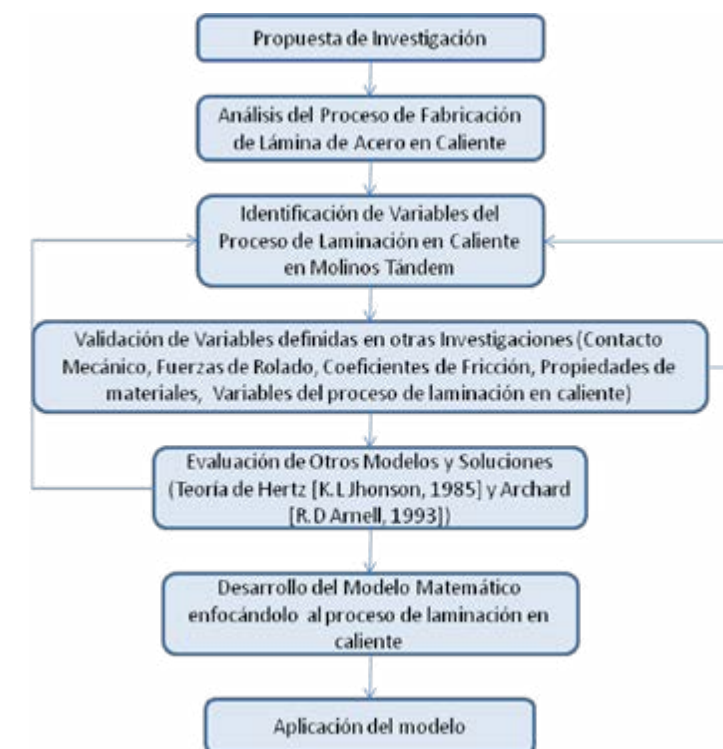


Figura 4 Metodología y Técnica de Diseño

DESARROLLO DEL MODELO

La mayoría de los modelos de desgaste existentes utilizan una serie de variables analizadas y coeficientes empíricos que se han desarrollado a lo largo de la experiencia, para este análisis se contempla analizar las siguientes variables:

- Número de pases de laminación
- Número de castillo de laminación
- Cargas de laminación
- Ancho del cuerpo del rodillo
- Longitud total de la lámina
- Área de contacto
- Diámetro del rodillo de trabajo
- Diámetro del rodillo de apoyo
- Propiedades mecánicas del rodillo de trabajo (módulo de elasticidad y dureza)
- Propiedades mecánicas del rodillo de apoyo (módulo de elasticidad y dureza)
- Coeficientes de desgaste

La dureza de los rodillos de laminación es la variable que se toman por levantamiento directamente en el área de trabajo, el resto de las variables consiste en una toma de datos en planta, específicamente en los molinos de laminación, control de procesos, control de calidad y taller de rectificadores; no se toman en cuenta otras variables como la vibración mecánica y cargas horizontales, debido a que su impacto en el desgaste de los rodillos del molino no es significativo.



En la teoría de contacto elástico, se estableció las ecuaciones de Hertz para superficies no conformantes debido a la presión de contacto entre ellas (Jhonson, 1985), estas ecuaciones son:

$$a = \left(\frac{3PR}{4E^*} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

$$P_0 = \frac{3P}{2\pi a^2} = \left(\frac{6PE^{*2}}{\pi^3 R^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

En donde:

- = Longitud de arco de contacto
- = Carga normal
- = Radio relativo de curvatura
- = Módulo elástico efectivo
- = Presión máxima

El radio relativo de curvatura R está definido por la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (3)$$

En donde R1 y R2 representan los radios de cada una de las esferas o cilindros que están en contacto como se muestra en la Figura 5.

El módulo de elasticidad efectivo está definido por la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1}{E_1} + \frac{1-\nu_2}{E_2} \quad (4)$$

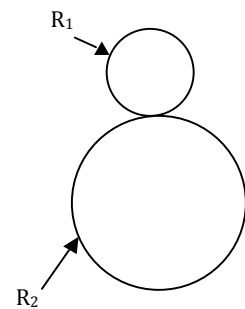


Figura 5.- Área de contacto considerando 2 superficies cilíndricas

En la ecuación de desgaste abrasivo, aplicando la teoría de Archard (Arnell, 1993), se estableció la siguiente fórmula:

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

En donde:

- = Volumen del material removido
- = Coeficiente de desgaste abrasivo
- = Carga aplicada
- = Distancia recorrida
- = Relación de Dureza

Si se aplica la ecuación (5) en el proceso de laminación se considera que el volumen de material removido en el rodillo es el material que se desgasta y equivale al área de contacto entre los dos rodillos por la altura desgastada, aplicando este principio, despejando la altura del material desgastado nos queda de la siguiente manera:

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

Considerando que representa la presión de una carga sobre un área determinada se puede sustituir en la ecuación (6), considerando que se está buscando la presión máxima de contacto, de tal modo que la ecuación (6) queda de la siguiente manera:

$$h = \frac{K_{abr} P_0 x}{H}$$

Sustituyendo la ecuación (2) en la ecuación (7), queda de la siguiente manera:

$$h = \frac{K_{abr} \left[\frac{6PE^{*2}}{\pi^3 R^2} \right]^{\frac{1}{3}} x}{H} = \frac{K_{abr} \left[\frac{6PE^{*2}}{\pi^2 \pi R^2} \right]^{\frac{1}{3}} x}{H} \quad (8)$$

La Figura 6 ilustra el contacto mecánico entre los dos rodillos de laminación, donde se puede apreciar que el área de contacto. Aplicando la teoría de contacto elástico de Hertz (Jhonson, 1985), en la que el área establece un radio relativo de curvatura R, en la cual el área de contacto es, además de considerar la distancia de contacto, se puede sustituir en la ecuación (8) por el área de contacto establecido anteriormente para el proceso de laminación, quedándonos la siguiente ecuación:

(9)

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

En donde:

- Ancho del cuerpo de rodillo
- Arco de contacto

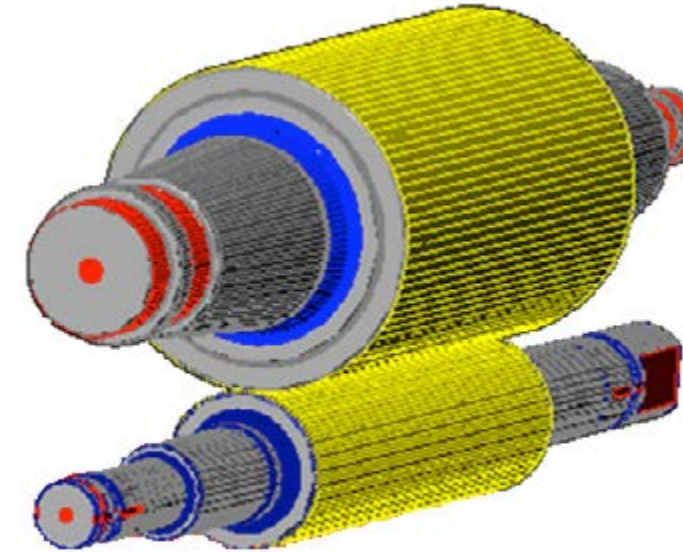


Figura 6.- Contacto mecánico que ilustra el área de contacto.

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 (9) por un factor que relaciona el arco de contacto entre dos cilindros, el cual es, de tal manera que la ecuación (9) quedaría de la siguiente manera:

(10)

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

Considerando que la longitud total de la lámina identificada como es equivalente a la distancia recorrida, y aplicando en el área de contacto de los dos rodillos los mismos criterios que se utilizaron para desarrollar la ecuación en el área de contacto del planchón con los rodillos, la ecuación final del modelo matemático integraría estas variantes.

Con la ecuación (10) 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 desgastes desde el primer planchón hasta el número de planchón indefinido, además de considerar que la longitud total de la lámina se identifica con la variable, la cual es equivalente a la distancia recorrida, por lo tanto la ecuación final del modelo matemático quedaría de la siguiente forma:

$$h = \sum_{i=1}^n \frac{K_{abr} \left[\frac{6PE^{*2}}{\pi^2 aW} \right]^{\frac{1}{3}} \frac{L}{D_1} \frac{D_1}{D_2}}{H} \quad (11)$$

En donde:

- = Coeficiente de desgaste abrasivo
- = Longitud de arco de contacto
- = Carga de laminación (Fuerza de rolado)
- = Módulo elástico efectivo
- = Longitud total de la lámina
- = Relación de Dureza
- Ancho del cuerpo de rodillo
- Diámetro del rodillo de trabajo
- Diámetro del rodillo de apoyo

Resultados

Como resultado de la investigación de este artículo se logro identificar los diferentes tipos de desgaste en los rodillos de apoyo del Molino Tandem en los procesos de laminación en caliente. Se detectaron las principales variables que influyen en el fenómeno del desgaste (número de pases de laminación, número de castillo de laminación, cargas de laminación, ancho del cuerpo del rodillo, longitud total de la lámina, área de contacto, diámetro del rodillo de trabajo, diámetro del rodillo de apoyo, propiedades mecánicas de los rodillos de laminación, coeficientes de desgaste y relación de durezas entre rodillos), y se descartaron las variables que no impactan en este fenómeno por su baja relación o significancia (vibración y rozamiento horizontal).

El molino consta de 6 castillos, que utilizan 2 rodi-



llos de apoyo y 2 rodillos de trabajo. Los rodillos de trabajo de los castillos 1 al 3 se les llama de desbaste y tienen las mismas propiedades mecánicas, mientras que a los rodillos de trabajo de los castillos 4 al 6 se les conoce como acabadores y poseen también las mismas propiedades. En el caso de los rodillos de apoyo, en el castillo uno se utiliza un acero vaciado, mientras que en los castillos del 2 al 6 el material sigue siendo acero, solo que procesado por medio de la forja. En la Tabla 1 podemos ver más claramente esta descripción de aplicaciones de los materiales de los rodillos, así como las propiedades mecánicas de los mismos.

Material	Hot Mill						Application	Young Modulus (Mpa)	Poisson Modulus
	F1	F2	F3	F4	F5	F6			
Cast Steel	✓						Back Up Roll	195	0.290
Forged Steel		✓	✓	✓	✓	✓		200	0.300
High Chromium	✓	✓	✓				Work Roll	220	0.295
Indefinite Chill				✓	✓	✓		180	0.280

Tabla 1.- Principales aleaciones de rodillos utilizados en el proceso de laminación en caliente, así como sus propiedades mecánicas correspondientes.

En la Tabla 2, se muestran los resultados que se obtienen al aplicar el Modelo Matemático para una campaña de laminación, en la cual se puede observar el valor de cada una de las variables que influyen en el proceso de laminación, las cuales están consideradas dentro del modelo matemático desarrollado.

Castillo	W (mm)	K_{arc} (mm ² /KNm)	H	P (N)	R ₁ (mm)	R ₂ (mm)	$E^* = (E_1(1 - \nu_1^2) + E_2(1 - \nu_2^2)) / (1 - \nu_1^2 - \nu_2^2)$ (N/mm ²)	$R = (1/R_1 + 1/R_2)^{-1}$ (mm)	L (m)	$\Delta = (3PR/4E)^{1/3}$ (mm)	b (mm)	
F-1	1727	4.7E-08	0.991	19332	314.33	539.70	113.0569	198.637	956918	29	0.5520	
			0.984			571.65		202.809		30	0.5236	
F-2		4.3E-08	1.007	15298	327.02	582.40	114.9440	209.426	1369307	28	0.6535	
			1.016			588.20		210.172		28	0.6407	
F-3		4E-08	1.039	1.047	13214	301.63	611.50	103.4126	199.112	1593276	26	0.6575
				1.047			611.50		201.992		26	0.6240
F-4		4E-08	1.061	1.049	10796	303.21	589.55	103.4126	200.231	1714946	25	0.5847
				1.061			614.10		202.987		25	0.5538
F-5		4E-08	1.102	1.081	8483	315.91	581.15	103.4126	204.659	1967904	23	0.6504
				1.102			591.10		205.880		23	0.6289
F-6		4E-08	1.122	1.105	5738	322.90	581.15	103.4126	207.568	2157850	21	0.6525
				1.122			586.00		208.184		21	0.6371

Tabla 2.- Calculo de desgaste para una campaña de laminación, aplicando el modelo matemático desarrollado.

En la primera columna se indican los 6 castillos. En la segunda columna se indica el ancho del cuerpo del rodillo, el cual no cambia para ningún castillo. En la tercera columna hay tres valores del Coeficiente de abrasión, debido a las 3 combinaciones de los materiales de los rodillos. La columna H es la relación de las durezas de los rodillos de apoyo con respecto a los de trabajo, esta cambia dependiendo de la caída de dureza de los rodillos. En la columna de la carga de rolado P (peso en Newtons), se muestran las variables de laminación que son constantes dependiendo del tipo de material que se esté laminando. La columna R1 son los radios de los rodillos de trabajo, los cuales deben de tener la misma dimensión y

trabajar por pareja. La columna R2 son los radios de los rodillos de apoyo, los cuales pueden ser diferentes pero siempre deben de tener un diámetro mayor los rodillos inferiores. Las columnas de las formulas E, R y ν , son el resultado de los cálculos que se hacen con los datos de operación. La columna L es la longitud total de la lámina (la sumatoria en longitud de todos los rollos que se procesaron durante la campaña) y la columna h, es el desgaste que calcula el modelo, esta última columna indica el resultado del desgaste con los valores introducidos y calculados para cada variable en la campaña de laminación. Con este cálculo del desgaste y el conocimiento de los límites y de la tolerancia de trabajo de los rodillos, se pueden predecir ajustes de rectificado, sustituciones o reemplazos completos de los rodillos de apoyo en el tiempo ideal de trabajo máximo soportado antes de un cambio.

Los rodillos tienen un periodo de vida útil en el cual pueden permanecer trabajando, en el caso de los rodillos de apoyo del castillo 1 el intervalo es de 1,149.35mm a 1,050.93mm y de 1,254.13mm a 1,117.60mm para los castillos del 2 al 6. Después de cada campaña de laminación el rodillo se desgasta la profundidad calculada por el modelo y además es rectificado en el cuerpo de trabajo para eliminar el material fatigado. Considerando la teoría de Hertz (K.L Jhonson, 1985), el contacto mecánico y la presión, son factores fundamentales en el comportamiento del volumen de material desgastado durante el proceso de laminación.

La metodología y técnica de diseño para la formulación del modelo matemático fue adecuada ya que permitió verificar las variables utilizadas en otras investigaciones, utilizando la teoría de Archard (Arnell, 1993) para aplicarla al proceso de laminación, permitiendo entender el comportamiento de otros modelos y soluciones existentes relacionados con el tema de material removido por contacto entre materiales y desgaste.

En el desarrollo del modelo se considero que durante el proceso de laminación, el material más duro produce mayor desgaste en el resto de los materiales, mismo que se encuentra relacionado con el arco de contacto entre los rodillos, es por eso que la relación de temperaturas y dureza de los rodillos se toma en campo para considerar el calentamiento que los rodillos de laminación sufren debido a la influencia de la transferencia de calor que proporciona el planchón.

El modelo establece el valor total del desgaste por todo el ciclo o campaña de laminación, considerando la sumatoria de los valores acumulados de los desgastes por todo el número de planchones utilizados. Esta relación de desgaste durante todo el proceso de laminación está directamente relacionada con la fatiga mecánica de los rodillos de apoyo, los cuales a cierto nivel de sobrecarga de trabajo pueden generar micro-grietas que afecten al proceso de

producción de la lámina.

Discusión y Conclusiones

Las variables operativas en el proceso de laminación en caliente dependen del numero de castillo, por ejemplo, en los castillos de desbaste los porcentajes de reducción de la lamina son mayores, por lo cual se requieren mayores fuerzas de rolado aunque la temperatura de la lamina sea mayor y por lo tanto se tenga mayor plasticidad. Esta variación se puede apreciar también en el cálculo de las variables que se consideran en el modelo matemático, por lo cual es congruente pensar que el valor del desgaste que se obtienen al final de la campaña de laminación tendrá variación entre los diferentes castillos del molino, esta hipótesis se puede comprobar con los resultados que se obtuvieron en la Tabla 1.

El modelo matemático desarrollado permite conocer y evaluar el desempeño de los rodillos en el molino, con el cual se puede predecir el desgaste y de esta manera tomar decisiones adecuadas para el correcto funcionamiento del equipo, evitando reprocesos del producto terminado por cuestiones de calidad, o daños en equipos y herramientas los cuales son atribuibles a accidentes provocados por desgastes excesivos en los rodillos de laminación.

Referencias.

- [1] Suarez, Alexander – Velez Juan. (2005). Estudio del modelo de desgaste propuesto por Archard. Colombia: Universidad Nacional Colombiana.
- [2] Schey, John. (1983). Tribology in Metalworking – Friction, Lubrication and Wear. Estados Unidos: American Society for Metals, Metals Park.
- [3] Gahr, Zum. (1987). Microstructure and Wear of Materials. Holanda : Elsevier.
- [4] Jhonson, Kenneth. (1985). Contact Mechanics. Cambridge. Inglaterra : Cambridge University Press.
- [5] Chausevich, M. (1983). Rolling of Metallic Materials. Yugoslavia : Wear of hot rolling mill rolls: an

overview - Elsevier.

[6] Nakagawa, Ayako. (1975). Consideration and decision of suitable regrinding amount of back-up roll for 4-High mills. Japón : Hitachi Review.

[7] Ohkomori, Yoshihiro. (1988). Cause end prevention of spalling of backup rolls for hot strip mill. Japón : Transactions of the Iron and Steel Institute.

[8] R.B. Corbett. (1990). Rolls for the Metalworking Industries. Warrendale, PA: Iron and Steel Society.

[9] R.D. Arnell, P.B Davies, J. Halling, T.L Whomes, Tribology. (1993). Principles and Design Applications, The Macmillan Press Ltd, Nueva York, Estados Unidos de America: Springer – Verlag

[10] R. V. Williams and G.M. Boxall, J. (1965). Iron Steel Inst. 203369.

[11] S.E. Lundberg, J. Mater. (1993). Process Technology.

[12] S. Jahanmir. (1981). Fundamentals of tribology Proc. Int. Conf. London: MIT Press.

[13] S. Spuzic, (1994). Wear of hot rolling mill rolls: an overview. Department of Metallurgy, University of South Australia, Australia: The Levels, SA 5095.

[14] V.B. Ginzburg. (1989). Steel Rolling Technology; Theory and Practice. New York: Marcel Dekker.