

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE SISTEMAS
DPTO. DE AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**Optimización de un modelo de desgaste de cilindros
en el tren continuo de laminación en caliente
de SIDOR C. A**

José Rafael Ibarra Rodríguez

Mérida, mayo de 2005

**JUSTIFICACIÓN**

Trabajo de grado presentado ante el Departamento de Automatización y Control de la Escuela de Sistemas de la Facultad de Ingeniería de La Universidad de Los Andes para optar al título de Ingeniero de Sistemas.

- Bachiller: José Rafael Ibarra Rodríguez. C.I:15 244 323
- Tutor Académico: Dr. Pablo Lischinsky
- Tutor Industrial: Lic. José Lara, Lic. Olga Prado, Dr. Luis Lozano.

A los 30 días del mes de mayo de 2005.



Dedicatoria

A mis padres Martha Eugenia Rodríguez Fonseca y José Rafael Ibarra Niño, por apoyarme y ayudarme desde siempre a conseguir los logros personales y académicos hasta hoy obtenidos, y más importante aún por estar conmigo incondicionalmente en los momentos más difíciles. Estas son algunas de las razones por las cuales deben saber que los amo.

Con la obtención de mi primer título profesional espero haber satisfecho las expectativas en ustedes generadas, y que con eso se sientan orgullosos de lo que yo considero una excelente labor como padres y amigos.



Agradecimientos

*A todas las personas que creyeron en mí y me apoyaron, ayudaron y guiaron en mi formación profesional y en la consecución de mi título de Ingeniero de Sistemas. Estoy consciente de que son pocos, pero antes de olvidar incluir a alguno prefiero generalizar sabiendo inequívocamente que solo sentirán este agradecimiento aquellos que realmente sintieron mi necesidad de ser ayudado y que respondieron a esta sin esperar recibir más que un agradecimiento que espero haya sido bien recibido y que reitero a través de estas palabras: **MUCHAS GRACIAS !!!***

Índice de contenido

Justificación	i
Dedicatoria	ii
Agradecimiento	iii
Índice de tablas y figuras	vi
Resumen	1
Introducción	2
Objetivos	5
Capítulo I. El desgaste de cilindros de laminación en Caliente	6
Introducción	7
El proceso de laminación en caliente en SIDOR	7
1. Línea de producción	7
2. Aspectos de operaciones del tren continuo	13
3. Aspectos de procesos del tren continuo	5
4. Efectos del desgaste	28
5. Lubricación durante la laminación en caliente	30
Capítulo II. El modelo de desgaste original	33
Introducción	34
El modelo original de desgaste de cilindros de SIDOR	34
1. Modelo de Archard	35
2. Implementación del modelo original de desgaste	37
Capítulo III. Metodología para el ajuste del modelo	41
Metodología	42
1. Criterio de recolección de datos	43
2. Evaluación del parámetro K_{tace} a través de un modelo de temperatura	46



3. Desarrollo e implementación de un esquema adaptativo	47
4. Análisis de la composición química y su efecto sobre los óxidos formados sobre la banda	53
5. Análisis del uso de lubricantes y su efecto sobre el desgaste de cilindros	54
6. Análisis del kilometraje laminado y su efecto sobre el desgaste de cilindros	55
7. Análisis de velocidades de enhebrado y su efecto sobre el desgaste de cilindros	55
8. Desarrollo e implementación de una estrategia de cálculo de desgaste por variación de la posición de husillos.	57
Capítulo IV. Resultados y análisis	59
1. Criterio de recolección de datos	60
2. Evaluación del parámetro K_{lace} a través de un modelo de temperatura	61
3. Desarrollo e implementación de un esquema adaptativo	63
4. Análisis de la composición química y su efecto sobre los óxidos formados sobre la banda	67
5. Estudio del uso de lubricantes y su efecto sobre el desgaste de cilindros	69
6. Análisis del kilometraje laminado y su efecto sobre el desgaste de cilindros	72
7. Análisis de velocidades de enhebrado y su efecto sobre el desgaste de cilindros	73
8. Resultados obtenidos para el análisis de los objetivos planteados	80
Conclusiones y recomendaciones	85
Referencias Bibliográficas	87

Índice de tablas y figuras

Figuras

N°	Título	
1	Transformación dimensional del acero en el proceso de laminación	8
2	Línea de producción del proceso de laminación en caliente de SIDOR C. A.	8
3	Horno de recalentamiento 3 del laminador en caliente de SIDOR C. A.	9
4	Tren IV reversible de SIDOR C. A.	10
5	Tren continuo del laminador en caliente de SIDOR C. A.	10
6	Enrollador n °1 del laminador en caliente de SIDOR C. A.	11
7	Vistas de los componentes del bastidor	13
8	Sistema de posicionamiento de husillos	14
9	Cilindros de trabajo utilizados en tren continuo de laminación en caliente de SIDOR	15
10	Objetivos de la laminación	15
11	Nivel de implementación en la pirámide de automatización de modelos desarrollados para el laminador en caliente de SIDOR C. A.	17
12	Comunicación entre niveles 1 y 2 de la pirámide de automatización en SIDOR	18
13	Flujo de procesamiento de variables para la obtención de referencias operacionales del tren continuo	19
14	Desgaste de cilindros en el proceso de laminación	20
15	Cascarilla sobre planchón y desbaste	21
16	Distribución de óxidos según la temperatura del acero: propuesta 1	22
17	Distribución de óxidos según la temperatura del acero: propuesta 2.	22
18	Formación de hematita por fractura de la wustita	23
19	Distribución de Faialita en aceros al silicio	23
20	Curva de crecimiento de óxidos de hierro según L'Chatlier	24
21	Forma de desgaste abrasivo: Microcorte	25
22	Forma de desgaste abrasivo: Deformación plástica	26
23	Desgaste por fatiga térmica	27
24	Intensidad del efecto de fatiga térmica a lo largo del tren	27
25	Apertura o hueco generado por desgaste	29
26	Cilindros con desgaste y sin desgaste	29
27	Formas de lubricación según las características del proceso	31
28	Coefficiente de fricción según el tipo de lubricación	31
29	punta de la banda	38
30	cuerpo y cola de la banda	38

31	Programa de laminación	39
32	Modelo de desgaste actúa solo en primeras de cambio (lote)	40
33	Forma del parámetro K_{tace} en el modelo de Olivares	46
34	Interacción de modelos en lazo abierto para el logro del espesor deseado	47
35	Interacción de modelos en lazo cerrado para el logro del espesor deseado	47
36	algoritmo adaptativo 1	48
37	forma del parámetro K_g en el algoritmo adaptativo 1	49
38	Introducción de la temperatura en cizalla a la memoria del lazo adaptativo	51
39	Algoritmo adaptativo 2	52
40	Selección de K_g en el algoritmo adaptativo 2	53
41	algoritmo de calculo de desgaste por cierre de husillos	57
42	Comparación de efectividad: Modelo original y modelo de temperatura	61
43	Comparación de efectividad: Modelo original y modelo adaptativo I	63
44	Comparación de efectividad por tipo de desviación: Modelo original y modelo adaptativo I	63
45	Comparación de efectividad: Modelo adaptativo I y modelo adaptativo II	65
46	Comparación de efectividad por tipo de desviación: Modelo adaptativo I y modelo adaptativo II	66
47	Análisis de varianza. Parámetro K_{tace} ante Concentración de Silicio.	68
48	Análisis de varianza. Parámetro K_{tace} ante Concentración de Carbono.	68
49	Análisis de varianza. Parámetro K_{tace} ante Concentración de Manganeso.	69
50	Análisis de varianza de K_{tace} respecto al uso de lubricante	70
51	Análisis de varianza de K_{tace} respecto al espesor de salida del bastidor 6	70
52	Tendencias de K_{tace} respecto a grupos de espesor de salida del bastidor 6	71
53	Análisis de varianza de K_{tace} respecto a grupos de kilometraje laminado antes de la línea de estudio.	72
54	Zonas de intensidad de desgaste abrasivo ante kilometraje laminado antes de la línea de estudio.	73
55	Análisis de varianza de K_{tace} respecto a la velocidad de enhebrado del bastidor 6	74
56	Modelo de K_{tace} respecto a la velocidad de enhebrado del bastidor 6.	75
57	Comparación de datos observados y predichos por el modelo de velocidad	75
58	Comparación de curva original y curva de prueba.	78

59	Evolución del número de demoras de producción por calibración de husillos.	80
60	Evolución del tiempo acumulado en demoras de producción por calibración de husillos.	80
61	Comparación del promedio de número de demoras mensuales durante los períodos sin y con implementaciones	81
62	Comparación del promedio de tiempo por demoras mensuales durante los períodos sin y con implementaciones	81
63	Evolución de bobinas primeras de cambio reportadas por variación de espesor	83
64	Evolución del número de bobinas reportadas por variación de espesor debido a fallas del modelo de desgaste	83

Tablas

N° Título

1	Forma genérica de la estructura de decisión matricial	50
2	Estructura matricial para desviaciones negativa- negativa	50
3	Estructura matricial para desviaciones positiva- positiva	51
4	Comparación entre K_{tace} real y K_{tace} reconstruido en aceros con mayor cantidad de muestras.	60
5	Comparación entre K_{tace} real y K_{tace} reconstruido en aceros con menor cantidad de muestras.	61
6	Comparación de modelo original y modelo de temperatura en programa 10-683	62
7	Comparación de modelo original y modelo de temperatura en programa 10-766	62
8	Comparación de modelo original y modelo adaptativo I en programa 11-621	64
9	Comparación de modelo original y modelo adaptativo I en programa 11-622	65
10	Comparación de modelos adaptativos retroalimentados. programa 11-631	66
11	Comparación de modelos adaptativos retroalimentados. programa 11-189	67
12	Resultados del modelo de velocidad en el programa 01-012	77
13	Modificación de coeficientes de filtrado por espesor de primera de cambio próxima.	78
14	Aproximación del número de demoras evitadas y el número de bobinas rescatadas	82
15	Aproximación de la pérdida de dinero evitada	82

Resumen

Como parte de las continuas mejoras en automatización que SIDOR da a sus procesos, en el año 2003 se realizó la implementación de un modelo de desgaste de cilindros en el tren continuo de laminación en caliente, basado en el modelo de Archard. Así se logró mejorar notablemente el acierto en el espesor del acero laminado. Sin embargo se detectó que en algunos casos la predicción del modelo era incorrecta, lo cual generaba desacierto en el espesor deseado.

Debido al error generado en una variable tan importante como lo es el espesor, una medida tomada en los casos de desacierto es la de detener el proceso de laminado para calibrar los husillos de los bastidores del tren. Esto contribuye de alguna manera a compensar el desgaste de los cilindros, pero de igual manera ocasiona demoras al proceso, las cuales comprometen las metas de producción.

Para corregir el problema detectado, mediante el presente proyecto, se realizó el ajuste del modelo en dos pasos. El primero de ellos consistió en retroalimentar al modelo, el cual originalmente se encontraba en lazo abierto. Esta retroalimentación permitió implementar una ganancia adaptativa calculada mediante un algoritmo de naturaleza empírica.

El segundo paso fue modelar uno de los parámetros del modelo a partir de la variable con la cual se determinó una mayor relación de dependencia.

También se desarrolló e implementó una estrategia que permite detectar y corregir si el modelo está fallando ante cierta condición particular del proceso de laminado, y se realizaron algunos análisis estadísticos del parámetro modelado, que brindan información acerca del desgaste de los cilindros.

A través de lo realizado se logró disminuir el desacierto en el espesor del acero laminado y el número de demoras por compensación del desgaste de cilindros.

Palabras claves: Modelado, estimación de parámetros, laminación en caliente, control de laminación, desgaste de cilindros, automatización.

Introducción

Dada la importancia del acero como material básico en el desarrollo e industrialización, ya que es indispensable en gran cantidad de procesos primordiales como la construcción, agricultura, la industria de alimentos y envasado, y la manufactura metalmecánica y automotriz, entre otros, la industria siderúrgica se ha convertido hoy por hoy en un negocio muy rentable a nivel mundial.

En Latinoamérica, a raíz del proceso de privatización de la industria siderúrgica ocurrido durante la década de los noventa, los resultados positivos obtenidos a nivel de productividad son motivo de felicidad para los accionistas y trabajadores de las empresas de este ramo, pero también son motivo de compromiso de mejorar cada vez más debido a la fuerte competencia que se presenta no solo a lo largo del subcontinente sino también a nivel mundial. Sidor C.A. no es ajena a esta realidad y parte de este compromiso es ejecutado a través de la inversión en automatización de sus líneas de producción.

Esta empresa, ubicada al margen derecho del río Orinoco (a 300 Km de su desembocadura con el Océano Atlántico) en Ciudad Guayana, estado Bolívar, Venezuela, y que inició actividades en 1961 como subsidiaria del estado venezolano, es actualmente la principal siderúrgica de la Comunidad Andina de Naciones y forma parte de un grupo de empresas conformadas por SIDERAR (Argentina), HYSALMEX y TAMSA (México) y USIMINAS (Brasil) que manejan 31,2 % de la producción de acero en Latinoamérica. Estas, junto a la empresa venezolana SIVENSA controlan el 60% de las participaciones de la empresa. El resto lo controla el gobierno venezolano.

Desde su privatización en 1997 el automatismo introducido ha llevado a que las diferentes áreas de producción hayan batido constantemente sus propios récords de producción, generando un excelente rendimiento en términos de toneladas producidas por unidad de tiempo y calidad, demostrando que cada línea de producción tiene altísima probabilidad de lograr las especificaciones de cada producto particular.

Habiendo culminado en el año 2001 el proyecto de automatización del laminador en Caliente, este se ha convertido en uno de los procesos productivos bandera de la empresa. Tanto así que en el año 2002 se superó la producción anual luego de 27 años. De allí salen productos tanto para la venta directa como para el procesamiento de las líneas de laminación en frío.

Parte del proceso de automatización en el laminador en caliente ha consistido en el

desarrollo e implementación de modelos matemáticos de ajuste (setup) de las variables operativas del tren continuo. A través de las oportunidades de mejora también han sido desarrollados e implementados modelos matemáticos de corrección de algunas de estas variables.

La importancia de estos modelos radica en que de ellos depende, en primera instancia, el acierto en las variables que miden la calidad del producto laminado. Así, una de estas es el espesor real una vez que el acero ha sido procesado por el laminador.

Lograr la mejor aproximación al espesor deseado (objetivo) es consecuencia, en gran medida, primero, de la exactitud del modelo de preajuste (preset) y segundo, del desempeño del control automático de espesor.

El primero de estos factores no es nada sencillo de conseguir puesto que representa el cálculo de modelos en lazo abierto que no toman en cuenta el efecto (a veces acumulativo) de algunas variables que perturban el proceso y por esto es que surge la necesidad de desarrollar e implementar modelos de corrección. Con esto, la combinación de modelos de preajuste – corrección toma gran relevancia, pero hasta cierto punto, ya que después de fijarse las variables de preajuste y una vez que se tiene cierta longitud del acero laminado, el control automático es quien toma la responsabilidad del control de espesor.

Una de esas variables que perturban la buena actuación de los modelos de preajuste es el desgaste de los cilindros de laminación del tren continuo. Este desgaste causa que la apertura entre cilindros calculada por el preajuste para laminar cualquier especificación de espesor sea insuficiente para lograr el objetivo deseado, pues el modelo asume que el diámetro de los cilindros es constante durante la jornada de laminación, y esto no es cierto.

Los cilindros de laminación se encuentran expuestos constantemente a procesos de fatiga térmica, abrasión y golpes recibidos por el acero caliente mientras este es laminado. Esto hace que el cilindro sufra un proceso de desgaste, desde su superficie, que origina una disminución del diámetro original durante la laminación.

La disminución del diámetro del cilindro requiere ser compensada para lograr que la combinación del preajuste y tal compensación satisfaga la apertura entre cilindros que requiere cada especificación de espesor deseada. Ya que sería muy complicado medir la variación del diámetro durante el proceso, fue necesario el desarrollo e implementación de un modelo matemático de cálculo de desgaste de cilindro que permitiera disminuir el error en el espesor causado por tal

variable.

Sin embargo, la estimación de este desgaste no es sencilla. No todos los cilindros son iguales en cada jornada de laminación, unos ya han sido usados y rectificadas y pueden estar más lastimados y ser más susceptibles, otros son nuevos. Cada tipo de acero laminado no tiene el mismo efecto abrasivo que puede tener otro de ellos. Los cilindros sufren de un proceso generación de corona térmica que hace que se expandan a la vez que se están desgastando. En fin, hay muchos factores que hacen que la estimación se convierta en todo un reto.

A pesar de los inconvenientes que pueden presentarse para obtener el cálculo más aproximado a la realidad, la implementación del modelo de desgaste original realizada a inicios de 2003 produjo grandes resultados que se reflejaron en una notoria mejora en el acierto de la variable espesor deseado.

Aún cuando tales resultados representaron en su momento un gran logro, actualmente se ha determinado que el modelo presenta fallas en algunos casos no fácilmente determinables y esto representa para SIDOR, siempre en busca de los mejores estándares de competitividad a nivel mundial, una oportunidad de mejora importante en vista de la relevancia que el proceso de laminación en caliente representa para la empresa.

En vista de lo anteriormente descrito se emprendió un proyecto de optimización del modelo de desgaste de cilindros, que permitió reconocer y solucionar algunos casos en los que el modelo fallaba para lograr una nueva mejora en el acierto en espesor y disminuir cierto tipo de demoras que los errores del modelo ocasionan al proceso.

**Objetivos**

A través de la realización del presente trabajo, fueron planteados los siguientes objetivos:

- Disminuir a través del modelo optimizado e implementado el número de paradas de calibración para compensar el desgaste de cilindros.
- Disminuir a través del modelo optimizado e implementado el porcentaje de bandas primeras de cambio reportadas por incumplimiento de la especificación de espesor.

El desgaste de cilindros de laminación en caliente

Capítulo I

Introducción

Uno de los implementos que mayor interés genera e introduce complejidad en los procesos de laminación en caliente es el cilindro de laminación (ó trabajo). Esta clase de cilindro es la interfase entre el tren de laminación y el metal caliente durante la deformación que este último sufre durante el proceso. Por esta razón está expuesto a constantes procesos de transferencia de calor con la banda y el sistema de enfriamiento usado, a la fricción generada entre él y la banda, a cargas elevadas, a golpes con la banda y al contacto con diferentes tipos de materiales caracterizados por las diferencias existentes entre cada tipo de acero y su composición química. Todo esto lastima al cilindro generando su desgaste.

Durante la laminación en caliente el desgaste de los cilindros de trabajo está asociado a la obtención del espesor deseado, planeza y calidad superficial en la banda. Los cilindros de trabajo desgastados durante el laminado hacen que el posicionamiento regular de los mismos sea insuficiente para lograr un espesor real con el menor error posible. Así mismo, la forma y las zonas en que ocurra el desprendimiento de material desde la superficie del cilindro generan problemas de planeza y rugosidad sobre la banda.

Por esto, la industria siderúrgica se preocupa cada vez más por tener control sobre el desgaste del cilindro, descubriendo las causas exactas que lo producen y modelando este fenómeno para compensar la disminución en el diámetro que se produce por el desprendimiento del material, y además tratando de disminuir el desgaste debido a los altos costos de los cilindros.

El proceso de laminación en caliente en SIDOR

1. Línea de producción

La laminación en caliente es un proceso de deformación plástica del material. En SIDOR la materia prima está constituida por planchones provenientes de la colada continua, que tienen forma de paralelepípedo de sección transversal rectangular, de dimensiones A_o (ancho inicial), E_o (espesor inicial) y L_o (longitud inicial), y que al ser procesados toman dimensiones A_f (ancho final), E_f (espesor final) y L_f (longitud final), tal cual se muestra en la figura 1. Durante la laminación en caliente se modifica además, el tamaño del grano y la distribución de los microconstituyentes del acero, lo cual tiene como objetivo el logro de propiedades mecánicas, las cuales varían según la utilidad final que tenga el producto.

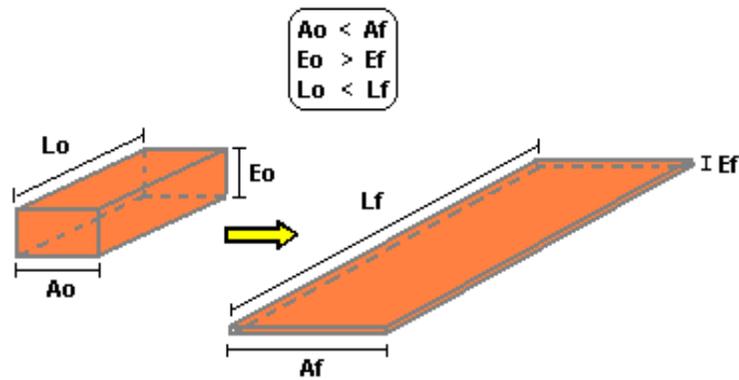


Figura 1. Transformación dimensional del acero en el proceso de laminación en caliente

Esta deformación se hace a través del calentamiento controlado a altas temperaturas del acero solidificado, y su inmediata laminación, con aplicación de fuerzas, a través de trenes de laminación que producen una deformación progresiva del material para conseguir las especificaciones dimensionales y mecánicas del mismo.

En SIDOR la línea de producción de productos laminados en caliente está conformada por cuatro áreas principales ordenadas según el tratamiento secuencial que recibe el acero. Estas áreas son:

- Hornos.
- Tren IV Reversible.
- Tren Continuo.
- Enrolladores.

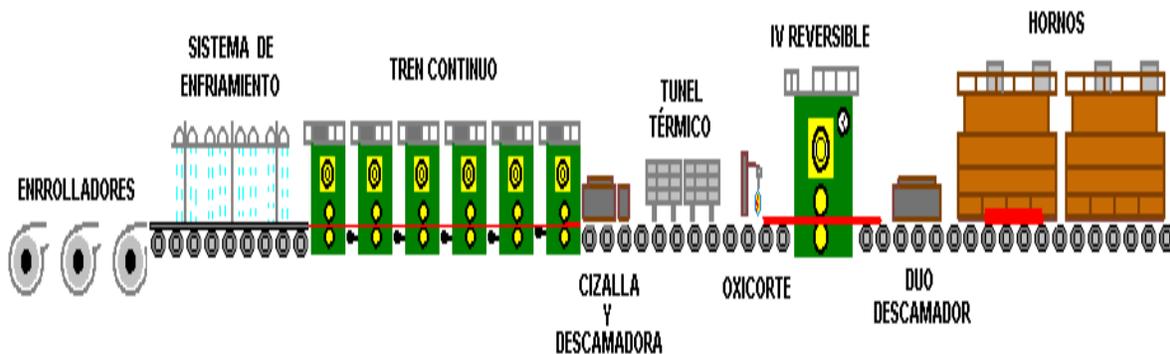


Figura 2. Línea de producción del proceso de laminación en caliente de SIDOR

Hornos

Aquí se inician las actividades de producción de productos planos de SIDOR. Esta área realiza sus operaciones a través de dos hornos de vigas galopantes las cuales transportan los planchones a través de la cavidad o cueva del mismo. En estos se realiza el calentamiento del acero hasta que este alcance temperaturas alrededor de los 1250 ° C. Con esto se obtiene un material mucho más blando que requiere menor energía para su deformación. Cada horno está dividido en zonas de precalentamiento, calentamiento e igualación que cumplen funciones determinadas para el logro de la temperatura deseada. El calentamiento debe ser tal que se alcance la mayor homogeneización posible de la temperatura a través del cuerpo del planchón evitando la generación de zonas frías que luego causen imperfecciones tales como desviaciones de espesor durante el laminado.

Cuando todas las áreas del laminador se encuentran en condiciones operativas, los operadores de hornos, por medio de un sistema automatizado, envían los planchones a través de la vía de rodillos, alternando las extracciones entre los dos hornos.



Figura 3. Horno de recalentamiento³ del laminador en caliente de SIDOR

Tren IV reversible

Aquí se realizan los primeros pasos de deformación y específicamente se obtiene el ancho final de la bobina (nombre dado al producto de salida del proceso).

A través de un solo bastidor con dos cilindros verticales (o de canteo) y cuatro cilindros horizontales se logran el ancho y espesor deseados, respectivamente. Esto se hace por medio de pases consecutivos del planchón a través del bastidor en sentidos inversos, es decir, se realiza el primer pase en el sentido que lleva el planchón al salir del horno y luego se pasa en sentido

inverso, realizando tantas pasadas como la dimensión deseada lo amerite. El número de pasadas debe ser impar para que finalmente el planchón salga hacia el área de Tren Continuo o en su defecto hacia la mesa de enfriamiento y preparación de chapas. El desbaste (nombre dado al material una vez que ha sido procesado por el IV Reversible) sale con espesores que generalmente van desde los 26 mm hasta los 40 mm a menos que sea requerida otra especificación.



Figura 4. Tren IV reversible de SIDOR

Tren Continuo

Está conformado por 6 bastidores encargados de realizar la reducción final en espesor, que es la solicitada por el cliente ó la que requieren posteriormente los procesos de laminado en frío. El porcentaje de reducción del espesor de la banda (nombre que se le da al desbaste cuando está siendo laminado en el tren continuo) en cada bastidor está predispuesto a través del tren dándose mayor reducción en los primeros bastidores y menos en los últimos. Aquí el acero es procesado en una sola pasada continua a través del tren, al cual entra a una temperatura alrededor de los 1060 ° C y sale alrededor de los 870 ° C.



Figura 5. Tren continuo del laminador en caliente de SIDOR

Enrolladores

Una vez que culmina el proceso de laminado la banda ha alcanzado una gran longitud por el proceso de transformación dimensional al que es sometida y debe ser enrollada (en forma de bobina) para ser transportada y manipulada. El área de enrolladores consta de tres equipos (del mismo nombre) que permiten llevar a cabo dicha tarea.



Figura 6. Enrollador n °1 del laminador en caliente de SIDOR

El proceso de laminación en caliente en SIDOR también consta de otras sub-áreas y/o equipos intercalados en las áreas principales de la línea de producción y cuyas funciones son:

Duo descamador

Por la oxidación que se da dentro de los hornos sobre la superficie de los planchones, estos pierden un pequeño porcentaje de peso convertido en óxido que puede verse ligeramente sobre el planchón inmediatamente al salir del horno y luego completamente mientras comienza su traslado a través de la vía de rodillos. Estos óxidos deben ser removidos para evitar ser laminados e incrustados en la superficie del desbaste y además para impedir que ejerzan acciones abrasivas contra la superficie de los cilindros de los bastidores (en contacto con el desbaste) del tren IV reversible. El dúo descamador remueve la cascarilla (así se conoce a la capa de óxido) a través de dos cilindros horizontales que la fracturan ejerciendo presión sobre esta para que luego con chorros de agua a alta presión sea desalojada de la superficie del planchón.

Sistema oxicorte

Esta etapa de la línea es usada cuando el producto requerido es chapa. A través de un sistema soplete oxicorte se realiza el corte (en dimensiones predeterminadas) del desbaste y luego

estos cortes son retirados hacia la mesa de enfriamiento.

Túnel térmico

Consiste en un techo o cubrimiento seccionado colocado sobre la vía de rodillos y antes de que la banda llegue a la cizalla. Es utilizado en determinados productos para evitar la pérdida de temperatura en el desbaste mientras este se transporta desde el tren IV reversible hasta al tren continuo.

Cizalla

Al salir del tren IV reversible el desbaste presenta deformaciones (bordes no rectos) en su punta y cola que son indeseados en los procesos de enhebrado en el bastidor 1 y desenhebrado de todos los bastidores, así como en la presentación final del producto. La cizalla rotativa cumple la función de cortar la punta y la cola deformadas del desbaste antes de que estas pasen por el tren continuo.

Caja descamadora:

Durante el traslado del desbaste desde el IV reversible hasta el tren continuo a través de la vía de rodillos, tiene lugar la formación de una nueva capa de óxido sobre la superficie del mismo, la cual es removida con la caja descamadora (con chorros de agua a presión) para evitar ser laminado y que ejerza acciones abrasivas contra los cilindros del tren continuo y produzca imperfecciones sobre la superficie del producto final.

Sistema de enfriamiento

Durante el proceso de laminación no solo es importante lograr las especificaciones dimensionales del material sino también garantizar las propiedades mecánicas del mismo, las cuales son de vital interés según el uso que se le vaya a dar al acero. El modo de enfriamiento de la banda a medida que sale del Tren Continuo y se dirige hacia los enrolladores está directamente relacionado con la conformación de la estructura interna del acero de la cual dependerá el logro de las propiedades mecánicas. El sistema de enfriamiento consta de un sistema de duchas ubicadas estratégicamente sobre la vía de rodillos las cuales son abiertas y cerradas mediante un modelo automático, para lograr el propósito explicado.

2. Aspectos de operaciones del tren continuo

Cada una de esas áreas y equipos deben estar en condiciones óptimas de funcionamiento y coordinadas de manera tal que se obtenga el mejor rendimiento de cada una de ellas para lograr así las metas de producción. Esto implica el buen estado de los equipos de la línea y el continuo mantenimiento que estos deben recibir, la calidad de la automatización implementada en el proceso y el trabajo en conjunto de los operadores de cada área.

De las cuatro áreas principales, sin duda la más compleja está representada por el tren continuo, tanto a nivel operativo como a nivel de proceso.

2.1 Bastidor de 4 en alto

Los bastidores utilizados en el área de Tren Continuo presentan el esquema de 4 en alto (ver figura 7), haciendo referencia al posicionamiento de los cilindros dentro de la estructura base o armazón. Estos cilindros se clasifican en dos tipos, los cilindros de apoyo y los cilindros de trabajo, los cuales son ubicados en las zonas superior e inferior de la base formando dos pares apoyo-trabajo. Los primeros son de mayor diámetro y a través de ellos se produce el deslizamiento del cilindro de trabajo en el polo opuesto al arco de contacto entre cilindro de trabajo y la banda. Los segundos se encuentran en contacto directo con la banda, siendo la apertura entre estos la referencia al momento de lograr especificaciones de espesor.



Figura 7.

a) *vista horizontal de los componentes del bastidor*

b) *vista vertical de los componentes del bastidor*

Dicha apertura es lograda a través del posicionamiento de husillos (tornillos) acoplados a las cajas del cilindro de apoyo. La posición deseada de husillos se logra, en los bastidores 1 y 2 con husillos electro-mecánicos, por medio de motores acoplados entre sí por un embrague magnético que debe desenganchar para lograr movimiento independiente de husillos al momento de querer nivelarlos. En los bastidores restantes se añade un sistema de presión hidráulica con el

cual es posible lograr respuestas más rápidas y precisas que con el solo sistema electro-mecánico.

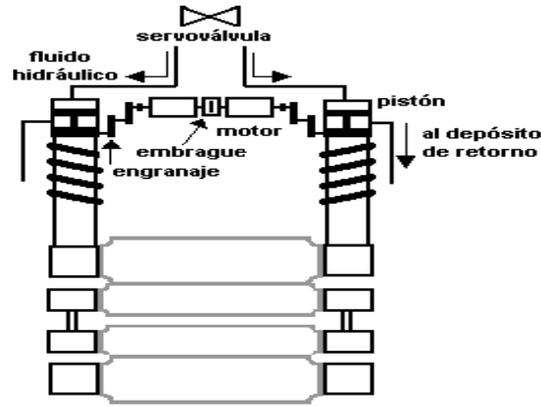


Figura 8. Sistema de posicionamiento de husillos

A la salida de cada bastidor (exceptuando el número 6) se encuentra un tensor de banda. Este es un brazo electro-mecánico encargado de mantener la tensión en la banda constante entre la salida de un bastidor y la entrada al bastidor próximo.

2.2 Cilindros de trabajo y de apoyo

Los cilindros de trabajo utilizados son de alto cromo en los bastidores 1, 2 y 3 y de temple indefinido en los bastidores 4, 5 y 6. El cilindro de alto cromo es un cilindro desarrollado para ser usado en los bastidores iniciales del tren terminador de laminación en caliente. Se elabora en molde centrifugado y está compuesto esencialmente de una capa de alto cromo y hierro blanco con eje y envolturas de hierro fundido. La estructura de la capa consiste en carburos de cromo primarios discontinuos en una matriz la cual es normalmente no circular con carburos globulares finos. Este tipo de capas combinan muy buenas propiedades de desgaste y excelente resistencia a la fatiga térmica y banding, y también tiene buenas características de dureza en caliente. Estos cilindros también son muy resistentes al deterioro y daño de su superficie, lo que los hace excelentes para jornadas de laminación extensas.

El cilindro de temple indefinido consiste en hierro fundido con un fino grafito interdendrítico disperso de forma pareja sobre la tabla del cilindro. El tamaño, la forma y la distribución del grafito junto con el contenido de carburo son controlados por el efecto del temple y el contenido de la

aleación. Presenta excelentes propiedades de fuerza, dureza a profundidad y resistencia al desgaste. Además, el grafito fino incrementa la resistencia al estrés térmico mediante el aumento de la conductividad térmica, reduciendo de esta manera las grietas térmicas. Su incrementada resistencia al impacto (capacidad de amortiguamiento) ayuda a reducir el descascarillado especialmente cuando se requieren grandes reducciones para secciones.



Figura 9. Cilindros de trabajo utilizados en tren continuo de laminación en caliente de SIDOR

Los cilindros de apoyo son de aleación de acero fundida en todos los bastidores y tienen diámetros desde 1245 hasta los 1345 mm.

3. Aspecto de procesos del tren continuo

La función primaria con la cual es procesado el acero en el tren continuo es la de lograr la especificación de espesor deseada manteniendo la temperatura de laminación que produzca las propiedades mecánicas deseadas en el producto terminado.

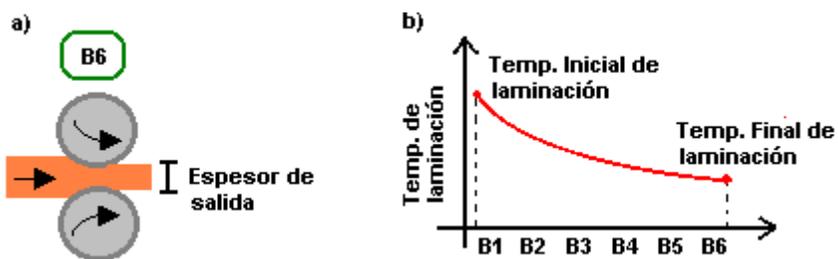


Figura 10. a) Objetivos de la laminación: lograr el espesor deseado b) Objetivos de la laminación: lograr la temperatura final de laminación deseada

Para lograr obtener los resultados a nivel de proceso es necesario manejar plenamente los siguientes puntos:

- Características operativas del tren, lo cual permite el máximo aprovechamiento del mismo, evita la errónea utilización de sus capacidades y da a conocer a través de cuales variables o comandos operativos se pueden controlar las variables de proceso tales como el espesor y la temperatura final de laminación.
- Características de los tipos de acero a laminar y las condiciones de proceso y operativas que la naturaleza de cada uno de estos impone.
- Leyes físicas que rigen los diferentes procesos asociados a la laminación.

Así se hace posible el desarrollo e implementación de automatismos que faciliten conseguir para cada variable controlada el menor error posible.

Hasta enero de 2005 se han laminado en SIDOR alrededor de 100 tipos de acero diferentes en espesores que van desde los 1,80 mm hasta los 13,00 mm. Para controlar el logro de especificaciones dimensionales y de propiedades mecánicas en toda la gama de posibles combinaciones de acero y dimensión, se pusieron en línea (con el proceso) modelos físico-matemáticos desarrollados en la propia empresa [3].

Para la característica dimensional se hace necesario el posicionamiento de husillos, ajuste de velocidad de los cilindros en los bastidores, y el posicionamiento angular y torque de los tensores de banda, mientras que las propiedades mecánicas requieren control de la temperatura de la banda, la cual depende a su vez de la velocidad de laminación y de la aceleración del tren. En vista de lo anterior se tienen operativos actualmente el siguiente conjunto de modelos:

- Modelo para el flujo másico.
- Modelo para el cálculo de reducciones y alargamientos.
- Modelo para el cálculo de la posición de husillos.
- Modelo para el cálculo de velocidades y aceleración.
- Modelo para el cálculo de ángulos y tensiones de los levantabucles.
- Modelo para el cálculo del consumo de potencia.
- Modelo de selección de tablas de laminación.
- Modelos de corrección.

La implementación de estos modelos ha sido llevada a cabo en SIDOR C. A. a través del nivel 2 - A de la pirámide de automatización manejada en la empresa, realizándose su programación digital en lenguaje C.

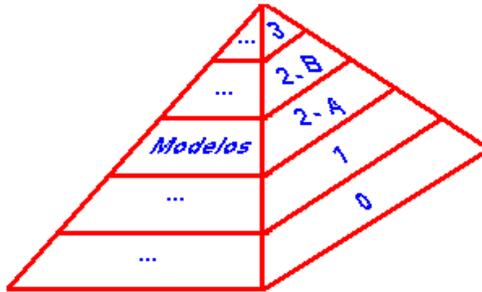


Figura 11. Nivel de implementación en la pirámide de automatización de modelos desarrollados para el laminador en caliente de SIDOR

En esta estructura el nivel 0 está conformado principalmente por toda la maquinaria en contacto directo con el proceso. El nivel 1 incluye todo lo relacionado a la programación de equipos de control como PLC y tarjetas, y también instrumentación en el proceso (sensores, cámaras). El nivel 2-A representa el almacenamiento de datos directamente relacionados con el proceso, y la programación de aplicaciones de operación y proceso sustentadas principalmente en lenguaje C. En el nivel 2-B se lleva a cabo la programación web que genera la información requerida por los niveles gerenciales. En el nivel 3 se llevan a cabo las tomas de decisiones y operaciones de gestión gerenciales, sustentadas en la información y resultados obtenidos a través de la interacción de cada nivel con sus niveles superior e inferior inmediatos.

La plataforma operacional de nivel 2 – A de SIDOR C. A. está conformada por redes QNX. El sistema operativo a tiempo real QNX ofrece las bondades del desarrollo en lenguaje C y garantiza la ejecución de tareas en tiempos preestablecidos para lograr que la comunicación entre el nivel 2 y el nivel 1 se realice siempre a tiempo. El servidor de base de datos utilizado es Sybase Anywhere 5.0 y la interfaz gráfica de operación y visualización está basada en aplicaciones Photon desarrolladas sobre QNX.

Los nodos de cada red tienen diferentes funcionalidades. Existen nodos operativos en los cuales se ejecutan aplicaciones a disposición de los operadores de cada área, nodos sobre los cuales se mantienen corriendo aplicaciones transparentes al operador y que generalmente son accesibles solo para la actualización de las mismas, nodos de asistencia o mantenimiento sobre los cuales se

ejecutan aplicaciones relacionadas a la operatividad de las líneas pero que no son responsabilidad directa de los operarios sino de personal de procesos y nodos de desarrollo en los que se lleva a cabo la prueba fuera de línea (offline) de aplicaciones nuevas y actualizadas.

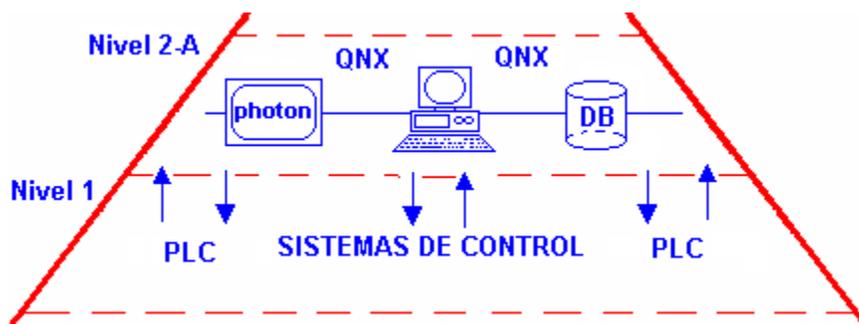


Figura 12. Comunicación entre niveles 1 y 2 de la pirámide de automatización en SIDOR

Cada uno de los modelos representa una aplicación particular y es programado en base a su filosofía y la interacción que tenga con el resto de los modelos. Los modelos citados (exceptuando los modelos de corrección) conforman el modelo de Ajuste (Setup) Nominal. El modelo de selección de tablas de laminación, es el encargado de hallar el preajuste (preset) óptimo de las variables operativas del tren para cada producto. Las tablas de laminación son estructuras almacenadas en base de datos que contienen tal preajuste, el cual es exacto para la mayoría de los productos laminados en SIDOR.

Cada tabla está caracterizada por el espesor de salida del tren, el espesor de entrada al tren, el tipo de acero, el grupo de dureza al cual pertenece el tipo de acero y la configuración de laminación respecto a los bastidores utilizados. En aquellos casos en los que la aproximación de las características de la tabla no es de un 100% respecto a las características del producto a laminar entonces el Setup realiza el ajuste en las variables operativas haciendo que estas se amolden exactamente a las especificaciones requeridas.

Este ajuste requiere el cálculo ordenado de reducciones y alargamientos en cada bastidor, posición de husillos en cada bastidor, velocidades de cada bastidor y del tren, aceleración del tren, consumo de potencia de cada bastidor y ángulos y tensiones de los levantabucles.

Los modos de laminación implementados durante la automatización del tren continuo determinan que un producto sea laminado con o sin las bondades del Setup. Así, con el modo automático el Setup siempre está activo y ajusta el preset de cualquier tabla que no se aproxime

totalmente a las características del producto, mientras que en el modo semiautomático los productos son laminados con el preset que contiene la tabla impidiendo la actuación del Setup. En ambos casos los modelos de corrección actúan sobre el preset si sus filosofías aplican.



Figura 13. Flujo de procesamiento de variables para la obtención de referencias operativas del tren continuo.

En el conjunto de modelos de corrección se encuentran:

- Modelo de corrección de posición de husillos por desgaste de cilindros.
- Modelo de corrección de posición de husillos por variación en el espesor de banda.
- Modelo de corrección de posición de husillos por variación de temperatura de desbaste.
- Modelo de corrección de posición de husillos por variación en la dimensión del desbaste.
- Modelo de corrección de posición de husillos por corona térmica en los cilindros.
- Modelo de corrección de la velocidad de cada bastidor por variación en la posición de los levantabucles.

Con la implementación de todo este conjunto de modelos se ha alcanzado:

- Aumentar el acierto en espesor.
- Disminuir las variaciones de ancho a lo largo de la banda.
- Mejorar el acierto en las temperaturas final de laminación y enrollado.

3.1 Desgaste de cilindros de laminación

Uno de los factores de mayor relevancia durante el proceso de laminación y que interviene directamente en la consecución de las especificaciones es la calidad de los cilindros utilizados en los bastidores. De esta depende en gran parte que se mantenga el rendimiento en términos de

toneladas producidas por unidad de tiempo y también en el aspecto cualitativo cuando se mide la calidad del producto a través de inspecciones de su superficie.

El desgaste de cilindros es la pérdida (desde la superficie) de material de éstos por la acción de partículas abrasivas y efectos térmicos y mecánicos a los cuales se someten en condiciones habituales de trabajo. En la mayoría de los casos estos factores se combinan para hacer muy complejo la diferenciación de cada uno de sus efectos. La pérdida de material se refleja principalmente en una reducción de los diámetros iniciales de los cilindros (nuevos o rectificadas) una vez que ha concluido un programa de laminación (ver figura 14) y estos se han enfriado perdiendo el efecto de la corona térmica del cilindro sometido a altas temperaturas.

Cuando se realiza una proyección de producción, independientemente del plazo dado a la misma, es necesario conocer la duración del ciclo de vida de los cilindros en los bastidores y más específicamente, el rendimiento que estos puedan dar en cada secuencia de laminación continua programada (programa de laminación), ya que de esto dependerá en gran parte que se detenga el proceso productivo para realizar cambios de cilindros, ya sea porque se ha consumido (desgastado) el diámetro del cilindro apto para la laminación, o porque se han producido eventos atribuibles o no a la calidad del cilindro que ocasionan daños irreparables (sobre todo a nivel superficial) en los mismos, lo que obliga a reemplazarlos.

En términos generales, la vida útil del cilindro depende del desgaste del mismo a través de un programa de laminación, de la frecuencia y magnitud de eventos indeseados durante el proceso de laminación a los que se vea sometido y de la calidad en el tratamiento de rectificado que se les da.

El primero de estos factores es sin duda el más notorio, no solo desde el punto de vista de costos generados al adquirir nuevos cilindros por los ya desgastados sino por el hecho de influir directamente sobre algunas de las variables que permiten medir la calidad del producto, como las dimensiones y acabado superficial.

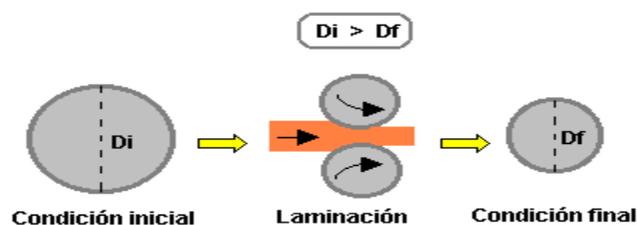


Figura 14. Desgaste de cilindros en el proceso de laminación

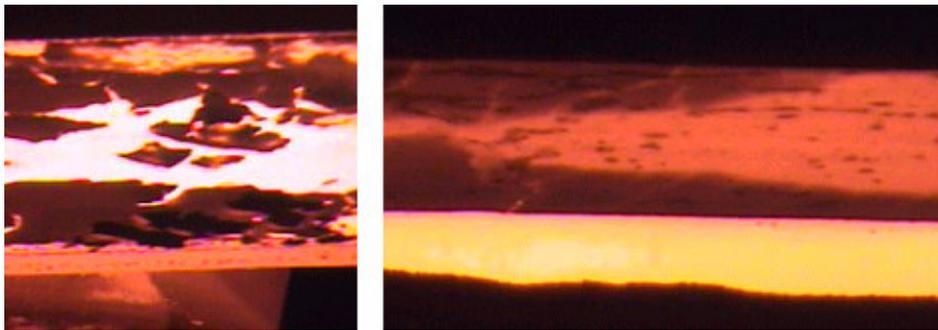
Los tipos de desgaste producidos en los cilindros durante el proceso laminación son:

- desgaste abrasivo.
- desgaste por fatiga térmica.
- desgaste mecánico.

3.1.1 Desgaste abrasivo

Este se produce cuando dos ó más materiales se encuentran en contacto y alguno presenta una dureza superior a la del resto, con lo cual corta y elimina material de los más blandos.

Durante la laminación, el cilindro está expuesto constantemente al contacto con partículas indeseadas de óxidos que se forman sobre la superficie de la banda (ver figura 15) y que presentan, en algunos casos, dureza superior a la del cilindro, con lo cual estas partículas se tornan abrasivas.



**Figura 15. Izquierda: cascarilla formada a la salida del IV reversible.
Derecha: cascarilla formada a la salida del horno.**

Durante el proceso de calentamiento del planchón en los hornos, una pequeña parte de su peso es perdido debido a la formación de óxidos desde su superficie. Estos óxidos son compuestos de oxígeno (O) y hierro (Fe) y se presentan en tres variedades, wustita (FeO), magnetita (Fe_3O_4) y hematita (Fe_2O_3).

La wustita, que es la fase más interna del óxido, se forma cerca de la superficie del metal, y por lo tanto, es la más rica en hierro. Presenta una estructura cúbica centrada en las caras. Su densidad puede variar desde 5,54 a 5,9 g / cm^3 . Contiene de 23 a 25% en peso de oxígeno en su estructura y crece enteramente por difusión de iones de hierro, los iones de oxígeno se agregan a la cara externa de la fase y permanecen prácticamente fijos.

La magnetita es una fase intermedia del óxido, su estructura cristalina es una cúbica inversa del tipo espinel. Tiene una densidad de 5 a 5,4 g/ cm^3 , contiene un 28% de peso en oxígeno, existiendo

como un óxido deficiente metálico en un menor nivel al de la wustita. Se ha encontrado que tanto los cationes como los aniones difunden. Finalmente, la hematita que es la capa más externa del óxido tiene el más alto contenido de oxígeno con alrededor de 30% en peso. Su densidad es 5,24 g/cm³ y se presenta en forma romboédrica o cúbica.

Algunos autores [2] señalan que a temperaturas del planchón, desbaste o banda entre los 700 ° C y los 1300 ° C, la distribución del total de óxido sobre la banda es como se muestra en la figura 16, en donde la cantidad de wustita representa al menos el 90 % del total de óxidos formados.

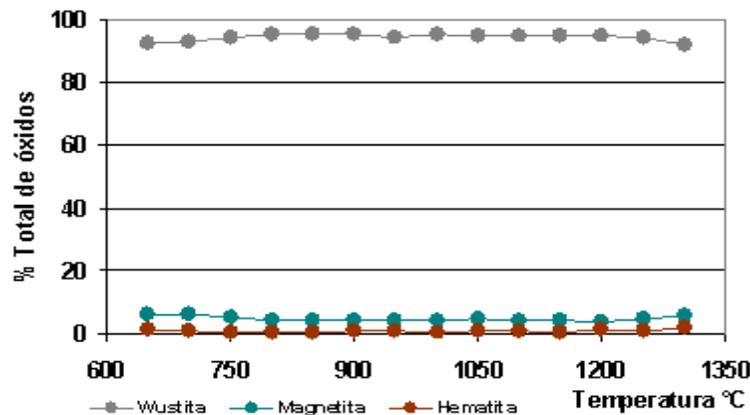


Figura 16. Distribución de óxidos según la temperatura del acero: propuesta 1. Tomado de [2]

Otros autores [5] señalan que tal distribución muestra una disminución de los porcentajes de wustita por debajo de los 700 ° C y sobre los 900 ° C (figura 17) incrementándose mayormente el porcentaje de magnetita.

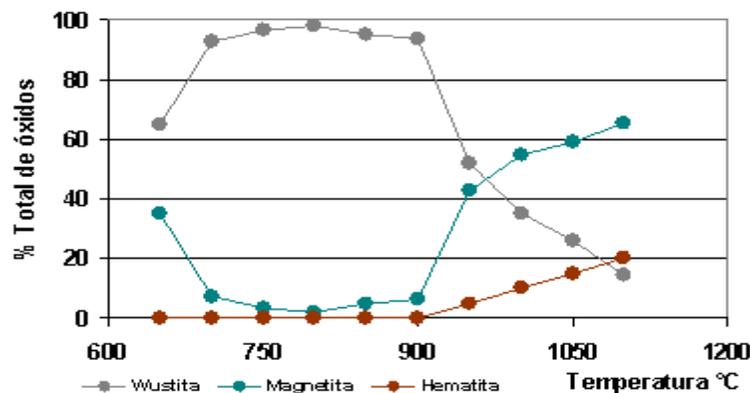


Figura 17. Distribución de óxidos según la temperatura del acero: propuesta 2. Tomado de [5]

La dureza vickers de estos óxidos es de 300, 500 y 1000 HV (hardness vickers) respectivamente, haciéndolos abrasivos ante cilindros de durezas inferiores. Según sea el caso, y teniendo en cuenta que en SIDOR C.A. la temperatura de laminación va desde 1100 a 850 °C, es evidente que el cilindro de trabajo, con un máximo en dureza vickers de 664 HV, se encuentra en contacto con cualquiera de los tres óxidos, lo cual indica que la hematita es un agente abrasivo para el y la magnetita y la wustita son potenciales agentes abrasivos según disminuya la dureza en el cilindro (sobretudo usado y rectificado) durante la laminación.

A la hematita se le ha encontrado en todo tipo de aceros, incluso a bajas temperaturas. Una de las causas principales de su presencia a baja temperatura se debe a la remoción incompleta de la wustita durante el laminado [2]. La figura 18 b describe el mecanismo en donde las partículas de wustita al ser laminadas y romperse incrementan considerablemente su cantidad, separándose de la matriz del metal y exponiéndose al aire. Lo anterior implica un menor suministro de átomos de hierro, en tanto que el oxígeno abunda, resultando en una aceleración en la reacción de wustita a magnetita y ésta a hematita.

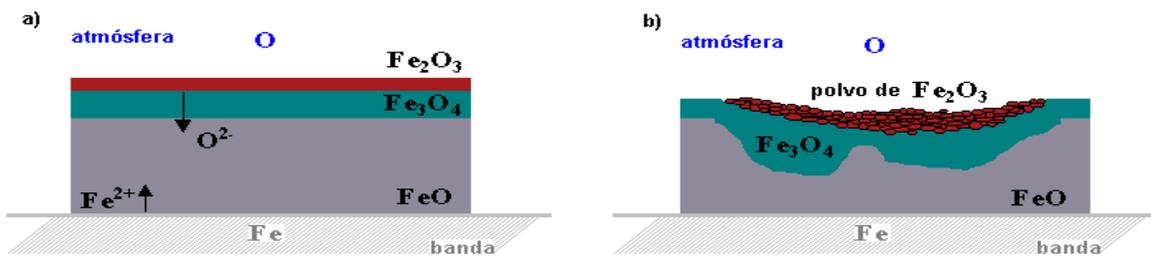


Figura 18. Formación de hematita por fractura de la wustita

Es común también observar la tonalidad de la hematita en los aceros al silicio. Estos son difíciles de descascarar debido al componente eutéctico FeO/Fe_2SiO_3 (faialita) que se forma en la interfase y penetra irregularmente en la parte superior e inferior del FeO y a los lados del metal, generando un anclaje del óxido, que dificulta enormemente su remoción (ver Figura 19).

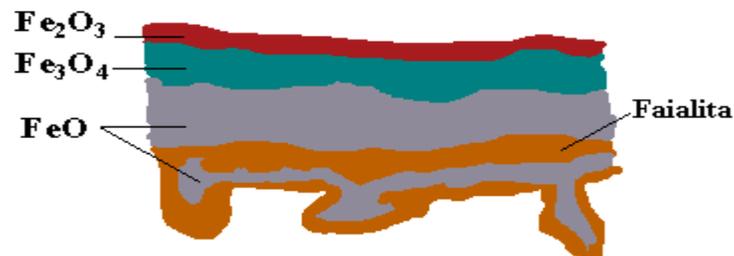


Figura 19. Distribución de Faialita en aceros al silicio



Según L'Chatlier estos óxidos crecen según la ley $(W/A) = k t^{1/2}$ (ver figura 20), es decir, que el peso ganado por unidad de área iguala a una constante por el tiempo elevado a la media potencia. El valor de k varía con la temperatura de la banda, aumentando a medida que la temperatura crece. Por lo tanto, la cantidad de óxido abrasivo sobre la banda es una función de la cantidad de tiempo anterior al laminado en que se descascarilló la banda. Sin embargo, la velocidad de crecimiento no es siempre la misma, debido a que cuando la capa de óxido es gruesa la velocidad de transferencia entre el oxígeno y el hierro en la capa de óxido decrece drásticamente. Si la capa de óxido se rompe se genera una superficie libre que nuevamente se oxidará, creando de esta forma un ciclo de rompimiento y generación de nuevas superficies listas para continuar con el proceso de oxidación, el cual se repite durante desde la salida del horno hasta que las láminas son enrolladas.

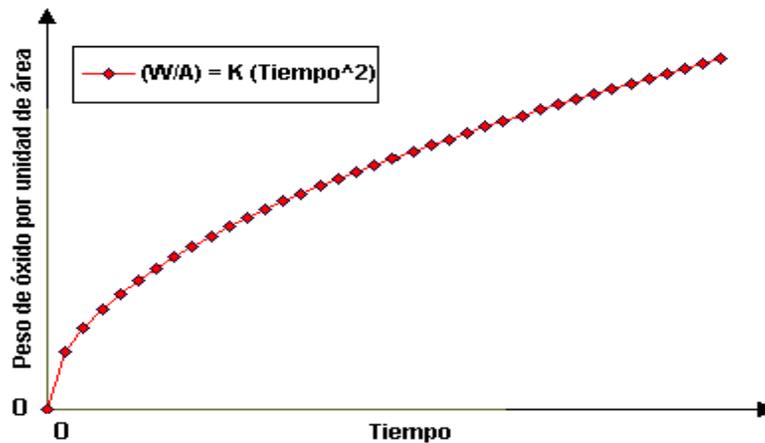


Figura 20. Curva de crecimiento de óxidos de hierro según L'Chatlier

Formas de desgaste abrasivo

Según la proveniencia de las partículas el desgaste abrasivo puede ser:

- a) Desgaste directo abrasivo
- b) Desgaste contaminante abrasivo

a) Desgaste directo-abrasivo

Es producto del contacto directo entre los dos materiales, siendo las asperezas parte de alguno de los dos.

b) Desgaste contaminante-abrasivo

Es producto del contacto de un material con partículas libres que se hacen presentes en su medio y que generalmente no se encuentran en contacto con este.

El desgaste de los cilindros de laminación es en principio de la forma directa – abrasiva, mientras no sean considerados contactos que se pudieran producir entre el cilindro y su alojamiento dentro del bastidor, los cuales son no deseados.

Según la resistencia al rompimiento, módulo elástico y fluencia del cilindro, el tamaño de las partículas o asperezas del óxido y la relación de dureza entre el cilindro y el óxido, el desgaste abrasivo se hace presente en dos mecanismos:

- a) Microcorte de la superficie del cilindro
- b) Deformación plástica de la superficie del cilindro

a) Microcorte de la superficie del cilindro

Ocurre cuando la partícula de óxido punzante penetra suficientemente en una zona de la superficie del cilindro lastimada o superando el límite de rompimiento del mismo, provocando un corte de la superficie del cilindro que se traduce a pérdida de material en forma de virutas (pequeñas partículas de forma variable).

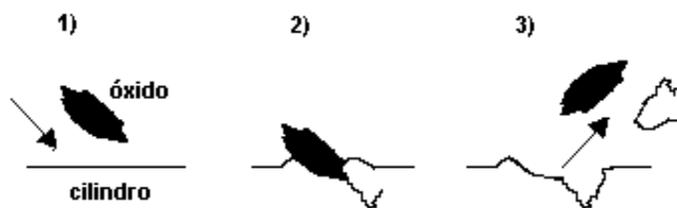


Figura 21. Forma de desgaste abrasivo: Microcorte

b) Deformación plástica de la superficie del cilindro

Ocurre cuando la partícula de óxido penetra de forma limitada en la superficie del cilindro, o cuando esta no es punzante (de forma suavizada) y las tensiones producto del contacto con el cilindro no sobrepasan el límite de rompimiento del material. Así se genera un proceso de

deformación plástica en la superficie del cilindro que la lastima y arruga, produciendo escasa pérdida de material por efecto de ralladura.

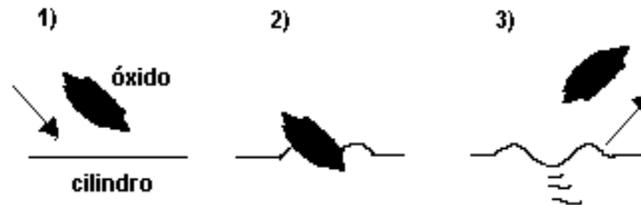


Figura 22. Forma de desgaste abrasivo: Deformación plástica

En particular, cuando se desea saber si el desgaste es por microcorte o deformación, se puede analizar la relación de dureza entre el cilindro y la partícula de óxido. Si HC es la dureza (en cualquier unidad) del cilindro y HO la dureza (en la misma unidad que se representa HC) del óxido, la relación HC/HO indica que si $HC/HO < 0.5$ ocurre microcorte y si $HC/HO > 0.7$ ocurre deformación plástica.

3.2 Desgaste por fatiga térmica

Se produce cuando el material es sometido a tensiones superficiales e internas en forma repetida, producto de los gradientes de temperatura entre la superficie y la parte interna del cilindro. Estas tensiones exceden las propiedades físicas del mismo ocasionando fracturas y agrietamientos.

Durante la laminación, el cilindro se encuentra en contacto con la banda de acero caliente a temperaturas entre los 1100 °C y 800 °C y también está sometido a un régimen de enfriamiento producto del sistema de enfriamiento por agua que esté instalado en los bastidores.

El contacto del cilindro con la banda a tal temperatura hace que su superficie se caliente y se expanda (generando una corona térmica), produciéndose un gradiente de temperatura con la parte más interna del cuerpo del cilindro. Mientras en la parte externa del cilindro se liberan fuerzas expansivas, en la parte interna, más densa y más fría, se liberan fuerzas opuestas de contracción que someten la estructura más externa a un efecto de estiramiento y compresión que tras tornarse continuamente repetitivo excede las propiedades físicas del material del cilindro, lastimándolo a través de fracturas y grietas térmicas que luego causan el desprendimiento del material.



Figura 23. Desgaste por fatiga térmica

El sistema de enfriamiento de cilindros en los bastidores a través de agua juega un papel fundamental ya que permite disminuir los gradientes de temperatura. Debe estar muy bien diseñado para evitar que algunas zonas del cilindro puedan enfriarse más que otras, ya que así se localizan zonas calientes en las cuales los esfuerzos de tracción podrían hacerse mayores originando fracturas y grietas más rápidamente de lo deseado.

Independientemente del tipo de acero a laminar y de la temperatura de la banda en la entrada del primer bastidor, la tendencia de esta última a lo largo del tren es de disminuir (ver figura 24). Por esto los bastidores finales (terminadores) del tren son los que menos sufren el efecto de fatiga térmica ya que los gradientes de temperatura entre superficie y parte interna del cilindro son menores.

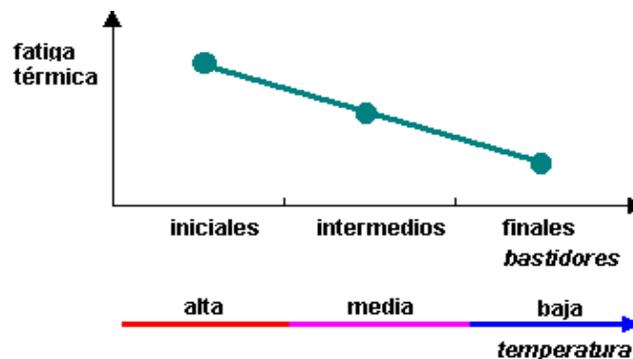


Figura 24. Intensidad del efecto de fatiga térmica a lo largo del tren

3.3 Desgaste por fatiga mecánica

Es producido por eventos asociados al proceso de laminación en los cuales la banda

golpea al cilindro lastimándolo y/o produciendo desprendimiento de material.

Esta clase de eventos son principalmente el impacto de la punta de la banda, con los bordes más fríos y más duros, sobre el cilindro durante el proceso de enhebrado y el impacto (latigazo) de la cola de la banda sobre el cilindro durante el proceso de desenhebrado.

4. Efectos del desgaste

Sea cual sea el tipo de desgaste que sufran los cilindros, este proceso afecta dos aspectos:

- dimensiones de la banda
- superficie de la banda.

4.1 Efecto dimensional del desgaste

Un programa de laminación ordena secuencialmente (en una lista) los productos a ser laminados, los cuales están caracterizados entre otras cosas por las dimensiones a obtener y el tipo de acero.

Desde el punto de vista dimensional cada producto necesita de una posición de husillos particular en cada bastidor que genere las aperturas entre cilindros de trabajo apropiadas para lograr las reducciones deseadas en los bastidores y el espesor objetivo a la salida del bastidor 6. El modelo de setup nominal ajusta la variable de posición de husillos automáticamente según la dimensión a laminar. Conforme exista un cambio dimensional mayor a 180 μm en espesor y/o mayor a 150 mm en ancho entre un producto y su sucesor inmediato en la lista del programa, el setup nominal cambia las referencias de la posición de los husillos.

Si el diámetro de los cilindros se mantuviese invariable durante toda la campaña de laminación, entonces solo bastaría con cambiar las mencionadas referencias para lograr cada especificación dimensional porque estaría garantizado que una posición de husillos generaría siempre la misma apertura que requiere cada dimensión. Esto último no es cierto.

Debido al desgaste de los cilindros, cada referencia nominal de la posición de husillos requiere de un valor de corrección que contrarreste la apertura adicional (no deseada) producida por el desgaste.

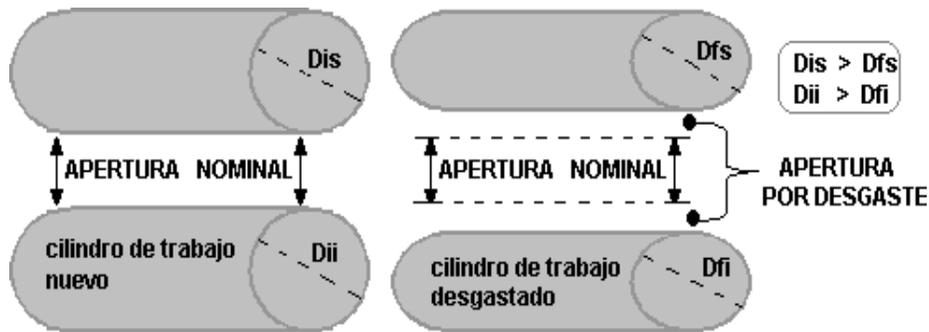


Figura 25. Apertura o hueco generado por desgaste

En la figura 26 se aprecia el efecto. Cuando se parte de un espesor de entrada E_o y se desea lograr un espesor objetivo E_{f1} y los cilindros no están desgastados (figura a), basta con posicionar el husillo al valor referencial (PH) que genere dicho espesor sin contemplar correcciones. En cambio, si se tienen cilindros desgastados (figura b), la misma posición de husillos utilizada en el caso de cilindros sin desgaste no será suficiente para generar correctamente el espesor objetivo pues el desgaste ha generado una apertura adicional entre los cilindros de trabajo que hace que el espesor de salida presente desviaciones (positivas) respecto al espesor objetivo.

Si estas desviaciones están por encima de las tolerancias admitidas (en espesor) por el cliente del producto entonces el material laminado no cumplirá con las especificaciones y es enviado a reparar o desechado (como chatarra) en el peor de los casos.

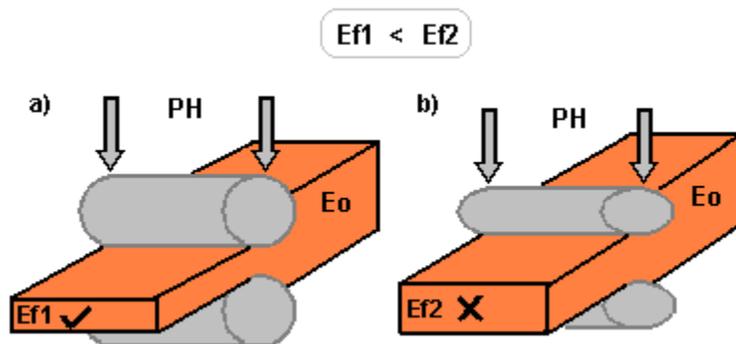


Figura 26. a) El cilindro sin desgaste permite lograr el espesor objetivo con la referencia nominal de posición de husillos. b) El cilindro desgastado no permite lograr el espesor objetivo solo con la referencia nominal de posición de husillos produciendo desviaciones en el espesor.

4.2 Efecto superficial del desgaste

El desgaste de los cilindros es un fenómeno que produce transformaciones en la superficie del cilindro que la hacen cada vez más rugosa. Esta rugosidad se manifiesta en deformaciones microscópicas que durante el proceso de laminación pueden dejar huellas sobre la banda que hagan que el acabado superficial del producto no sea satisfactorio. Además, durante el desgaste de los cilindros el material que se desprende de este puede quedar sobre la banda (blanda a altas temperaturas) y puede ser laminado e incrustado en esta por los bastidores posteriores. Estos fenómenos influyen directamente sobre el acabado superficial del producto y pueden hacer que una banda sea rechazada al no cumplir las respectivas especificaciones de calidad.

5. Lubricación durante la laminación en caliente [8]

Un aditivo a la laminación es el uso de lubricantes que permiten minimizar la fricción entre el cilindro y la banda, reduciendo así la magnitud de las fuerzas de laminación y la sobrecarga de los motores en los bastidores. Estos lubricantes son compuestos de aceites minerales o grasos ya sea puros o en una emulsión con agua. El lubricante contribuye al logro de planeza (en la forma) de la banda, reduce el desgaste del cilindro, la temperatura del cilindro y la banda y protege la superficie del acero contra la corrosión después de ser laminado.

Para efectos del desgaste del cilindro, el lubricante disminuye la fricción entre la banda y el cilindro formando una capa entre el cilindro y la banda que dificulta la incrustación de partículas de óxido sobre la superficie del cilindro disminuyendo su acción abrasiva, además, contribuye a enfriar el cilindro, lo cual apunta a minimizar los efectos de la fatiga térmica.

Existen 3 modos de lubricación para superficies deslizantes: lubricación hidrodinámica, elastohidrodinámica y límite (ver figura 27). Con la hidrodinámica las superficies se separan totalmente por un flujo de aceite laminar. Este tipo de lubricación aumenta con una mayor viscosidad y velocidad y con cilindros más lisos y aleaciones más blandas. La lubricación hidrodinámica excesiva puede conducir a patinado, pérdida de control y pérdida de una terminación brillante. Sin embargo una lubricación hidrodinámica pura no es habitual durante modos normales de laminación y generalmente el contacto del metal se produce entre los cilindros y la banda. Con la lubricación elastohidrodinámica el espesor de la película es del mismo orden que la rugosidad de la superficie y el flujo laminar del aceite se perturba. Con cargas muy altas la asperezas de las superficies se ponen en contacto y las propiedades viscosas del aceite se

vuelven ineficaces, esta es una lubricación límite.

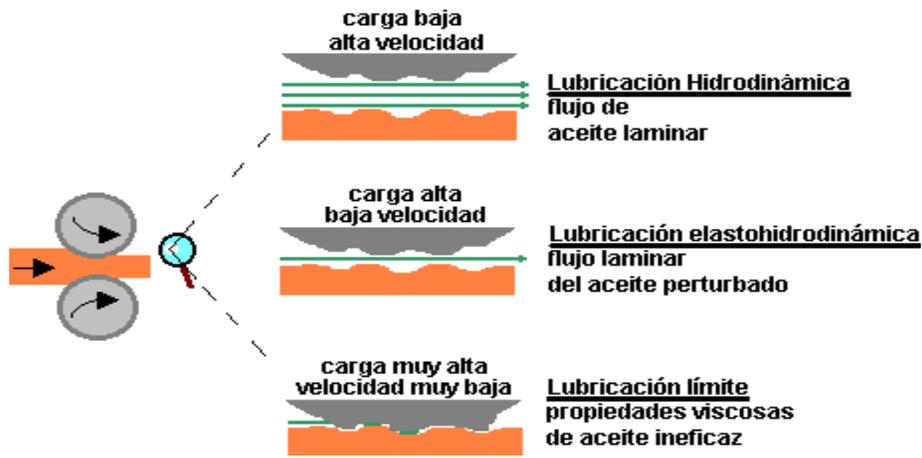


Figura 27. Formas de lubricación según las características del proceso

Durante el laminado, el mecanismo de lubricación comprende por lo general una lubricación límite a bajas velocidades de arranque, seguido por la lubricación elastohidrodinámica y límite mezcladas a mayores velocidades. La proporción de las superficies de contacto es muy pequeña y la fricción se debe principalmente al corte de la película de lubricante en la capa límite. Esto ha sido demostrado por experimento en donde se ha probado que la fricción es independiente de la dureza de los materiales. Las buenas películas de superficie límite pueden reducir el desgaste en un factor de 10000 y la fricción en un factor de 10.

El comportamiento del coeficiente de fricción en las regiones de lubricación límite, mezclada e hidrodinámica se observa en la figura 28.

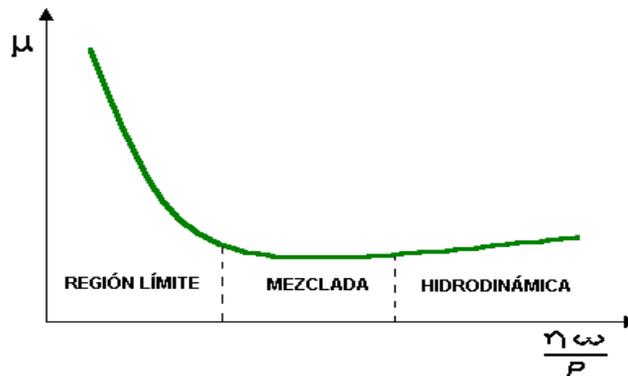


Figura 28. Coeficiente de fricción según el tipo de lubricación



En la región límite la fricción disminuirá a medida que disminuye la presión y a medida que la velocidad aumenta. En la región hidrodinámica, sin embargo, ocurre lo opuesto, y el coeficiente de fricción aumenta levemente con el aumento en la función $n w / p$ donde n es la viscosidad, w es la velocidad y p es la presión de laminado.

En las condiciones límites, los elementos orgánicos dentro de los aceites se adhieren a la superficie del metal, formando una capa molecular delgada. Si se lo diseña correctamente, el espesor de la película límite debería ser lo suficientemente grande para evitar cualquier contacto entre las asperezas de las dos superficies de laminado.

El modelo de desgaste original

Capítulo II

Introducción

En comparación con las teorías relacionadas a la obtención de una forma satisfactoria de la banda laminada, la teorías acerca del desgaste de cilindros de laminación y su investigación están lejos de llegar a ser aceptadas como suficientes.

A principio de la década del 60 Sachs y otros investigadores midieron y obtuvieron algunos contornos provocados por el desgaste en cilindros de trabajo y de apoyo [9]. A través de las conclusiones presentadas mostraron que el desgaste tenía alguna relación con la razón de toneladas laminadas y anchos en el acero. Sin embargo no pudieron modelar satisfactoriamente el fenómeno. Williams relacionó los efectos de los óxidos formados sobre la banda y la fatiga térmica circular con los mecanismos de desgaste pero aún no fue posible hallar un modelo para el cálculo de desgaste. La mayoría de las investigaciones posteriores estuvieron concentradas en el estudio del efecto de los óxidos y la fatiga térmica pero no se obtuvieron resultados fácilmente implementables [9]. Hasta el año de 1994 al menos 182 fórmulas de cálculo de desgaste de cilindros habían sido publicadas siendo algunas de las más aceptadas las obtenidas por Archard [10].

Debido a las condiciones extremas del proceso y la variedad de mecanismos de desgaste a los que se ve sometido el cilindro, no ha sido posible estandarizar una fórmula que requiera la menor adaptación de un laminador particular. Por esto los investigadores continúan el desarrollo de diferentes modelos que procuran mejores aproximaciones mientras se implementan modelos existentes adaptados a condiciones particulares.

El modelo original de desgaste de cilindros de SIDOR

En vista del efecto negativo que el desgaste de cilindros tiene sobre el cumplimiento de la especificación de espesor, en el año 2003 surgió la necesidad de desarrollar e implementar un modelo de cálculo de desgaste de cilindros del tren continuo de laminación para hacer las respectivas correcciones en la posición de husillos.

Durante la elaboración de tal modelo se asumieron las siguientes hipótesis:

- El desgaste se considera constante a lo largo del cilindro.
- El cálculo de desgaste del cilindro está basado en el modelo de Archard.

1. Modelo de Archard

El modelo establece que:

$$Z = k \frac{qs}{H} \quad (1)$$

donde,

- Z es el desgaste por unidad de área
- q es la presión normal
- s es el deslizamiento
- k es una constante ($0 \leq k \leq 1$). Esta constante depende, entre otros factores, de la combinación de materiales cilindro / banda, interfase (lubricación, rugosidad, temperatura).
- H es la dureza de los cilindros.

Para un caso de desgaste uniforme a lo largo del cilindro, y considerando que la presión es fuerza por unidad de área, y el deslizamiento es proporcional al número de revoluciones del cilindro, se sustituyen las ecuaciones (2) y (3) en la ecuación (1).

$$q = \frac{F}{L_c W} \quad (2)$$

$$s = Nrev L_c \quad (3)$$

$$\frac{k}{H} qs = \frac{k}{H} \frac{F}{L_c W} Nrev L_c \quad (4)$$

donde,

- F es la fuerza de laminación.
- L_c es la longitud del arco de contacto entre el cilindro y la banda.
- W es el ancho de contacto entre el cilindro y la banda (ancho de la banda).
- $Nrev$ es el número de revoluciones

luego, ya que se debe asumir el desgaste tanto en el cilindro de trabajo superior como en el inferior, y el número de revoluciones de laminación se obtiene por medio de la longitud de banda laminada, se obtiene la ecuación 5.

$$\frac{\Delta D}{2} = \frac{k}{H} \frac{F}{L_c W} \frac{L}{\pi \text{Diam}} L_c \quad (5)$$

donde,

- L es la longitud de banda laminada.
- Diam es el diámetro del cilindro.

finalmente, como el desgaste debe ser calculado para cualquier cantidad de piezas laminadas sucesivamente con los mismos cilindros, la ecuación 5 se generaliza para N piezas laminadas obteniendo la ecuación 6.

$$\Delta D_j = k_j \frac{2}{\pi} \frac{1}{H_{jh} \text{Diam}_{jh}} \sum_{i=1}^{N_j} \frac{F_{ij} L_{ij}}{W_{ij}} \quad (6)$$

donde,

- j representa el bastidor ($j = 1..6$)
- h representa la posición del cilindro en el bastidor: 1 = posición superior, 2 = posición inferior.
- ΔD es el desgaste diametral en el cilindro del bastidor j - ésimo en la posición h , (mm).
- H_{jh} es la dureza Vickers del cilindro, colocado en el bastidor j - ésimo en la posición h [Kg. /mm²]
- Diam_{jh} es el diámetro de los cilindros colocado en el bastidor j - ésimo en la posición h [mm].
- N_j es el número de bobinas procesadas en el bastidor j - ésimo.
- F_{ij} es la fuerza de separación en el bastidor j para el desbaste i - ésimo [Kg.].
- L_{ij} es la longitud, a la salida del bastidor j de la bobina i [mm].
- W_{ij} es el ancho a la salida del bastidor j de la bobina i [mm].

Una vez establecido el modelo, se desarrolló la siguiente fórmula para traducir el desgaste calculado en corrección de posición de husillos:

$$\Delta V H_i = f_i * Z_i * PS * \Delta D_6 \quad (7)$$

donde,

- i es el número del bastidor.
- ΔVH_i es la variación en la posición de husillos del bastidor i .
- f_i es el factor de corrección (se asume que inicialmente vale 1, es decir, se efectúa el 100% de la corrección en la posición de husillos).
- Z_i es la constante de corrección para el bastidor i .
- PS es el porcentaje del desgaste calculado que realmente es corregido en la posición de husillos. Este porcentaje está calculado de acuerdo al espesor de la primera de cambio siguiente mediante una curva spline cúbica y se debe a que estadísticamente se encontró que el cálculo del modelo original (sin el PS) era demasiado grande y la variable espesor permitió filtrarlo.
- ΔD_6 es el desgaste calculado en el bastidor 6. Se eligió este por su alta influencia en la desviación de espesor final de la banda.

2. Implementación del modelo original de desgaste

El preajuste (preset) de una banda es el conjunto de valores referenciales que sirven de condición inicial a las variables operacionales requeridas para el logro de especificaciones dimensionales y de propiedades mecánicas. En algunas variables tal condición inicial permanece constante durante el proceso. El preset se origina en nivel 2 y luego se baja a nivel 1, y está programado en lenguaje C. Cada modelo es programado por separado e interactúa con una aplicación (también programada en lenguaje C) que toma en cuenta las interacciones entre los modelos, integrando sus efectos y controlando el momento de acción de cada uno de ellos. Luego que las salidas de cada modelo son recibidas por el módulo integrador, este las envía a los PLC encargados de cada equipo.

En el caso de la especificación dimensional, en el tren continuo esta es lograda principalmente mediante el posicionamiento de los husillos y fijación de velocidades de los 6 bastidores.

Los husillos y velocidades se generan en primera instancia, a través de tablas de laminación, luego se realiza el ajuste del Setup y finalmente los ajustes de los modelos de corrección dan las verdaderas referencias operativas del tren, por lo menos hasta cierta longitud de banda laminada,

porque de ahí en adelante dan paso a otro tipo de sistema de control de posición de husillos (Automatic Gage Control (AGC))

Los husillos son controlados mediante 3 mecanismos diferentes que gobiernan el espesor de salida en la banda en la punta, en el cuerpo y en la cola.

La punta de la banda es toda aquella longitud de la misma que sale del bastidor 6 y sobre la cual se realiza medición de espesor desde 0,9 segundos después que se inicia la medición hasta 2,0 segundos inclusive. Los valores referenciales de posición de husillos en punta son suministrados por el preset y luego estos son convertidos en operativos añadiendo el efecto de los modelos de corrección.

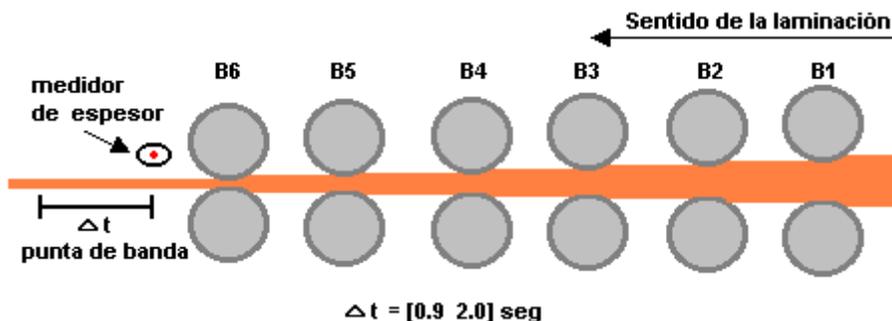


Figura 29. Punta de la banda

En este intervalo de 1,1 segundos se calcula la desviación de espesor en punta, representada por el promedio de 11 muestras del espesor transmitido desde el medidor de espesor (de rayos x) hacia el nivel 2, que las lee cada 100 msec.

El cuerpo de la banda representa toda la longitud de la banda desde los 2.0 segundos después de iniciada la medición de espesor hasta la sección de la banda que esté siendo escaneada justo antes que esta abandone el bastidor 3. La posición de husillos en cuerpo es controlada por el AGC.

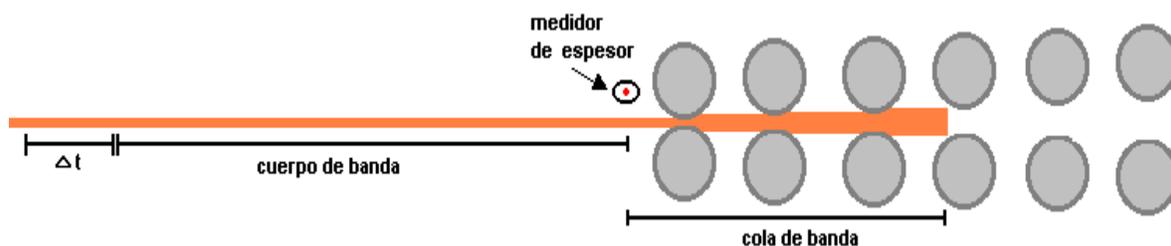


Figura 30. Cuerpo y cola de la banda

La cola de la banda es toda la longitud de la banda que queda ente el medidor de espesor y el bastidor 3 justo cuando este ha dejado de laminar. La cola de la banda se lamina con una posición de husillos resultante de la última posición de husillos operativa que deja el AGC en el tren y cierta apertura que se le da a los husillos para evitar eventos de sobrelaminación.

Una vez que se ha elaborado el programa de laminación y han sido seleccionadas las tablas de laminación para cada línea (producto), se dividen las bandas de cada línea del programa en primera banda (o primera de cambio) y bandas sucesivas. Primera banda representa la primera de las bandas de cada línea (o lote), es decir, es aquella que determina que inicia un programa o que se ha dejado de laminar una línea con el preset de una tabla particular y se comienza a laminar una nueva línea a partir del preset de una nueva tabla. Bandas sucesivas son todas las consecutivas a una primera banda hasta que se lamine nuevamente una de estas.

Programas	Línea	Piezas	Cup	Uso	Calidad	Producto	Tace	Grupo	Tabla	Sel	Gpo	Sel	Po.Aprox. (%)	Esp.Bob. (mm)
Prog. 124-03	001	1	4822	-	CCXX	FB--	2	1	3402	1			100.00	3.00
→ Lin. 001	002	1	4631	-	CCXX	BC--	10	6	2912	6			100.00	3.00
→ Lin. 002	003	1	4821	-	CCXX	FB--	2	1	2918	1			100.00	3.00
→ Lin. 003	004	1	4821	-	CCXX	FB--	2	1	2822	1			100.00	2.75
	005	5	4821	-	PAEX	FB--	6	1	4192	1			99.75	2.75

Figura 31. Programa de laminación n° 124-03. Se muestran algunas características de 5 líneas (lotes)

Algunos modelos de corrección actúan según el tipo de banda. Así, sobre las primeras de cambio actúan el modelo de corrección de husillos por desgaste de cilindros y el modelo de corrección de husillos por variación de temperatura. Este último también actúa en bandas sucesivas junto al modelo de corrección de posición de husillos por desviación de espesor y otros.

Teóricamente la corrección de posición de husillos por desgaste de cilindros debería afectar el preset de toda banda, ya que cada banda anterior desgasta el cilindro, pero teniendo ya un modelo de corrección de posición de husillos por desviación de espesor en bandas sucesivas con el cual se logran muy buenos resultados, se decidió que el modelo de desgaste actuara solo sobre primeras de cambio para no afectar el rendimiento de la aplicación ya exitosamente implantada. De esta manera el modelo calcula el desgaste de cada banda laminada y la acumula con el desgaste calculado para todas las bandas, pero solo envía su corrección al PLC (Programmable logic

controller) de husillos (nivel 1) justo antes de laminar cada primera de cambio, teniendo como principal objetivo actuar sobre el espesor en punta de la banda (ver figura 32).

Programa 05222

	# línea (lote)	# piezas	tabla
	1	2	T1
	2	3	T2
	3	1	T3
	4	3	T4

■ Punta de la banda

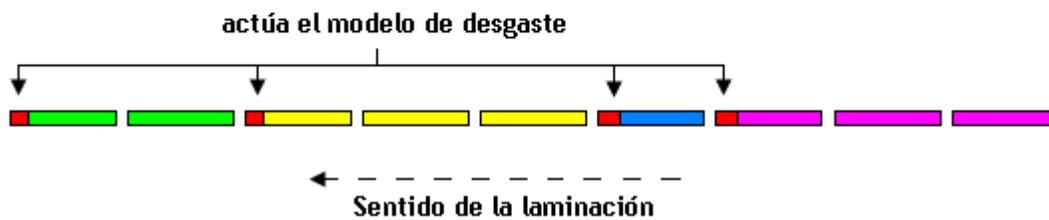


Figura 32. En un programa de laminación de 4 líneas (lotes) a laminarse con el preset de 4 tablas diferentes, el modelo de desgaste actúa solo en la punta de las primeras bandas de cada línea

Metodología para el ajuste del modelo

Capítulo III

Metodología

Al analizar la ecuación (6) (cálculo acumulado de desgaste) es fácil separar el lado derecho en dos partes, la primera compuesta por una constante que involucra la dureza vickers del cilindro y su diámetro y luego un término de sumatoria en el cual se acumulan los efectos de las fuerzas, longitudes y anchos laminados en cada pieza. Adicionalmente queda el valor que toma el parámetro k . Este valor, que originalmente debía estar asociado a factores como la combinación de materiales cilindro/banda, interfase (lubricación, rugosidad, temperatura), fue asociado en el modelo original a cada tipo de acero laminado, es decir, cada vez que había un cambio en la variable tipo de acero (tace), el valor de k se reajustaba. Por este hecho el parámetro es comúnmente denominado K_{tace}

$$K_{tace} = k \quad (8)$$

Los valores que tomaba este parámetro fueron determinados mediante una metodología practicada durante la puesta en marcha del modelo original y se encuentran almacenados en base de datos para ser extraídos en línea por nivel 2-A durante el laminado de cada banda.

El afinamiento del modelo de desgaste se planteó, en principio, por medio del modelado del parámetro K_{tace} , convirtiéndolo en una función de las variables ante las cuales debía adaptarse, y luego con la implementación de una ganancia adaptativa bajo un esquema retroalimentado.

La forma de cálculo del modelo de desgaste de cilindros está basada en el mismo principio utilizado en el exitoso modelo de corrección de husillos por desviación de espesor para bandas sucesivas desarrollado en SIDOR. En términos generales, tal principio lleva a realizar una corrección proporcional a determinada variable en los bastidores del tren manteniendo el flujo másico de la banda. En el modelo de corrección por desviación de espesor la variable de la cual se parte para hallar las correcciones proporcionales es el error medido en el espesor de salida del bastidor 6. En el modelo de desgaste la variable de partida es el desgaste calculado para los cilindros de trabajo del bastidor 6 por ser la posición de husillos de este bastidor la que principalmente influye en el logro del espesor deseado.

De lo analizado se propone que, sustituyendo la ecuación 8 en la ecuación 6,

$$\Delta D_j = K_{tace} \frac{2}{\pi} \frac{1}{H_{jh} Diam_{jh}} \sum_{i=1}^{N_j} \frac{F_{ij} L_{ij}}{W_{ij}} \quad (9)$$

donde K_{tace} se convierte en una función multivariable,

$$K_{tace} = K(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (10)$$

tal que la transformación afecte la ecuación original de la siguiente manera,

$$\Delta D_j = K(x_1, x_2, \dots, x_n) \frac{2}{\pi} \frac{1}{H_{jh} Diam_{jh}} \sum_{i=1}^{N_j} \frac{F_{ij} L_{ij}}{W_{ij}} \quad (11)$$

donde,

- x_i = variables que pesan en la predicción del desgaste

Para estudiar el conjunto de variables x_i más relevantes se realizaron un conjunto de experiencias que se explican a continuación:

1. Criterio de recolección de datos

Ante la dificultad de evidenciar el efecto que una sola banda pueda tener sobre el desgaste de un cilindro por la naturaleza misma de este fenómeno, al analizar cada acero se planteó la necesidad de hacerlo a través del estudio de un conjunto de bandas laminadas continuamente, donde cada conjunto representa líneas (lotes) de programas de laminación con 12 o más piezas. Así, fue más sencillo analizar el desgaste en los cilindros ante el efecto acumulativo dejado por un mismo producto.

Cada dato de la muestra se recolectó siguiendo las siguientes pautas:

- a. Buscar en el histórico de los programas de laminación líneas (línea o lote de estudio) de programa con 12 ó más piezas.



- b. Analizar solo programas en los cuales las bandas primeras de cambio anteriores a las líneas de estudio tuviesen desviaciones en la banda muerta de ± 100 micras, y que además no presentaran ninguna tendencia negativa o positiva.
- c. Analizar solo líneas cuya primera de cambio posterior tuviera una temperatura de cizalla dentro de la banda muerta de ± 40 ° C respecto 1060 ° C. Así se filtra aquellos casos en los cuales esta última variable influya directamente en el error de espesor, ya que las bandas más calientes (alrededor de los 1100 ° C) representan un material muy blando potencialmente sobrereducible (a un espesor real inferior al deseado) y las bandas más frías (alrededor de los 1020 ° C) representan un material muy duro potencialmente subreducible (con un espesor real superior al deseado).
- d. Sobre la desviación de la primera de cambio posterior a la línea de estudio, se suma la corrección del modelo original, resultando la desviación que hubiese tenido la banda sin la corrección del modelo.

α : desviación de la primera de cambio posterior a la línea en estudio

δ : desgaste asumido sobre la primera de cambio posterior a la línea en estudio.

α_1 : desviación de la primera de primera de cambio posterior a la línea de estudio si no se hubiese asumido desgaste.

$$\alpha_1 = \alpha + \delta \tag{12}$$

- e. Se asume que la tabla de laminación genera un 20% de la desviación en espesor. Esto es producto de las constantes variaciones a las cuales se somete la variable valor de husillos por causas de correcciones del modo automático de corrección de tablas, el cual no es sensible a distinguir las causas de las correcciones que realiza y que en algunos casos no deberían realizarse. Este porcentaje es restado de la desviación obtenida en el paso anterior.

α_2 : Desviación de la primera de primera de cambio posterior a la línea de estudio si no se hubiese asumido desgaste y asumiendo que los valores de husillos originales de tabla generan un error del 20% en dicha desviación.

$$\alpha_2 = 80 \alpha_1 \tag{13}$$



- f. Obteniendo en el paso anterior el desgaste de la línea de estudio que el modelo debía asumir para generar una desviación de espesor nula en la próxima primera de cambio, se reprodujo el cálculo de desgaste de la línea de estudio con los mismos datos de fuerza, ancho, longitud con los cuales se calculó originalmente, utilizando un valor de K_{tace} tal que al sumar el desgaste reproducido con el desgaste corregido en la primera de cambio de la línea de estudio se obtuviera la desviación nula.

δ_1 : desgaste corregido hasta la primera de cambio de la línea de estudio.

δ_2 : desgaste reproducido sobre la línea de estudio en el cual se varía el K_{tace} para lograr la igualdad:

$$\delta_1 + \delta_2 = \alpha_2 \quad (14)$$

La operación utilizada para hallar K_{tace} se traduce a realizar el despeje desde la ecuación 14:

$$\delta_1 + K_{tace} \frac{2}{\pi} \frac{1}{H_{jh} Diam_{jh}} \sum_{i=1}^{N_j} \frac{F_{ij} L_{ij}}{W_{ij}} = \alpha_2 \quad (15)$$

$$K_{tace} = \frac{\alpha_2 - \delta_1}{\frac{2}{\pi} \frac{1}{H_{jh} Diam_{jh}} \sum_{i=1}^{N_j} \frac{F_{ij} L_{ij}}{W_{ij}}} \quad (16)$$

- g. El valor de K_{tace} obtenido en f se almacenó junto con los valores históricos de las variables espesor, contenido de silicio, contenido de carbono, contenido de manganeso, longitud de banda, velocidad de enhebrado en el bastidor 6 y uso de lubricante, para cada una de las bandas en estudio.

Una vez concluida la recolección de la muestra, se agruparon los valores de K_{tace} para cada tipo de acero estudiado y se compararon con los valores que originalmente se encuentran en base de datos para establecer si era posible modificar tales valores mediante el análisis estadístico de la muestra y lograr así la solución al problema.

2. Evaluación del parámetro K_{tace} a través de un modelo de temperatura

En forma paralela a la recolección de la muestra se evaluó la conveniencia de emplear el parámetro K_{tace} calculándolo a partir del modelo dependiente de temperatura de banda en cizalla (ver ecuación 17) de Olivares [7]. Con esto se buscó observar la influencia de la temperatura de la banda sobre el error en el cual incurre el modelo de cálculo de desgaste de cilindros.

$$K_{tace} = \frac{1}{-0.215529 + 0.000502041 * TempCiz} \quad (17)$$

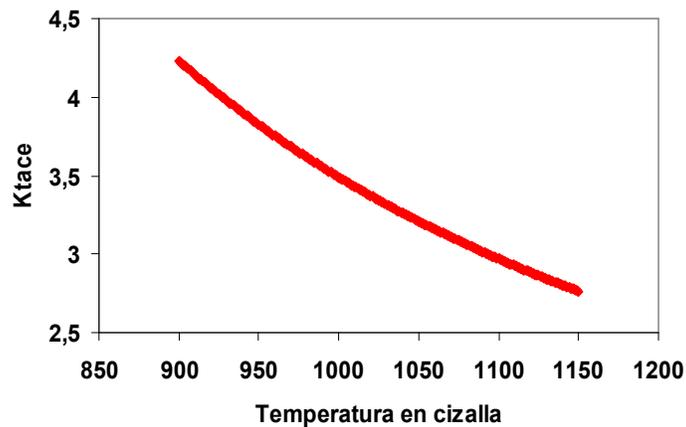


Figura 33. Forma del parámetro K_{tace} en el modelo de Olivares

En la figura 32 se hace evidente la naturaleza de la propuesta de Olivares. Mientras mayor sea la temperatura de la bada en la cizalla, menor será el desgaste en el cilindros.

Evaluar el parámetro K_{tace} de esta forma implicó calcular el desgaste acumulado de cada pieza mediante la siguiente expresión:

$$\Delta D_j = \left(\frac{2}{\pi} \left(\frac{1}{-0.215529 + 0.000502041 * TempCiz} \right) \frac{\sum_{i=1}^{N_j} \frac{F_{ij} L_{ij}}{W_{ij}}}{H_{jh} Diam_{jh}} \right) \quad (18)$$

Este modelo se evaluó contra el modelo original en 12 programas de laminación que incluyeron un total de 110 piezas primeras de cambio.

3. Desarrollo e implementación de un esquema adaptativo

Se desarrolló e implementó un esquema retroalimentado que por medio de una ganancia adaptativa disminuye o aumenta el cálculo según el error presentado en el espesor de salida de las dos primeras de cambio anteriores a una de estas. La adaptación se puede iniciar a partir de la primera banda sucesiva de todas las segundas líneas de cualquier programa de laminación.

Originalmente el modelo de desgaste de cilindro actúa en lazo abierto, combinándose con el modelo de Setup nominal y el modelo de corrección por temperatura para generar el espesor de salida en la punta de la banda mediante un esquema de la forma:

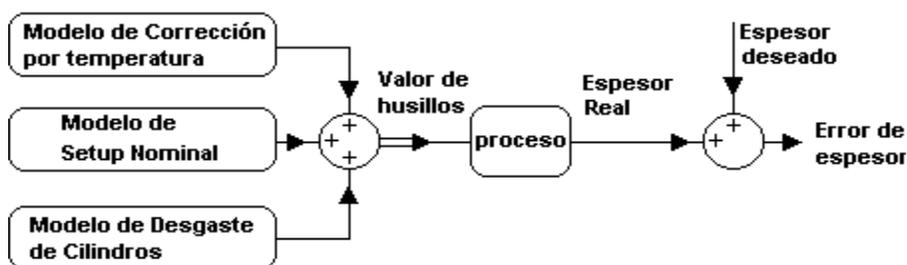


Figura 34. Interacción de modelos en lazo abierto para el logro del espesor deseado

Mediante un esquema de lazo cerrado (figura 34) se implementó la ganancia adaptativa K_g ($K_g \in \mathfrak{R}^+$).

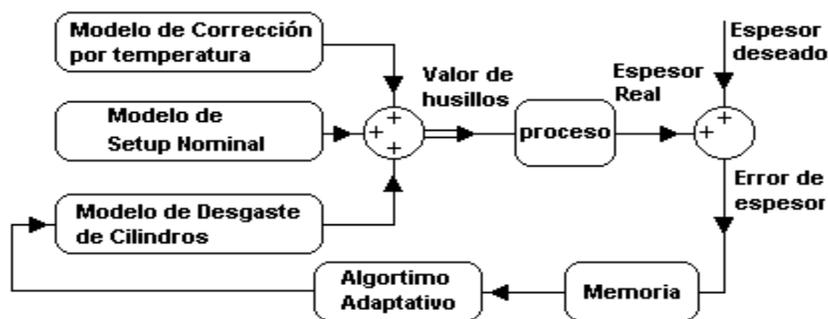


Figura 35. Interacción de modelos en lazo cerrado para el logro del espesor deseado

Así la nueva forma de cálculo de desgaste quedó definida como:

$$\Delta D_j = K_g \left(\frac{2}{\pi} \frac{K_{tace}}{H_{jh} Diam_{jh}} \sum_{i=1}^{N_j} \frac{F_{ij} L_{ij}}{W_{ij}} \right) \quad (19)$$

Esta transformación se hizo con el propósito de aumentar y disminuir la magnitud del cálculo de desgaste conforme se detectan desviaciones con alguna tendencia de signo y magnitud en primeras de cambio consecutivas. De esta forma el argumento del algoritmo se basa en aumentar ΔD cuando se registraran dos desviaciones de espesor positivas consecutivas y disminuir ΔD cuando se registraran dos desviaciones de espesor negativas consecutivas. Con esta idea el algoritmo de evaluación del parámetro K_g se definió tal como se muestra en el siguiente diagrama de flujo:

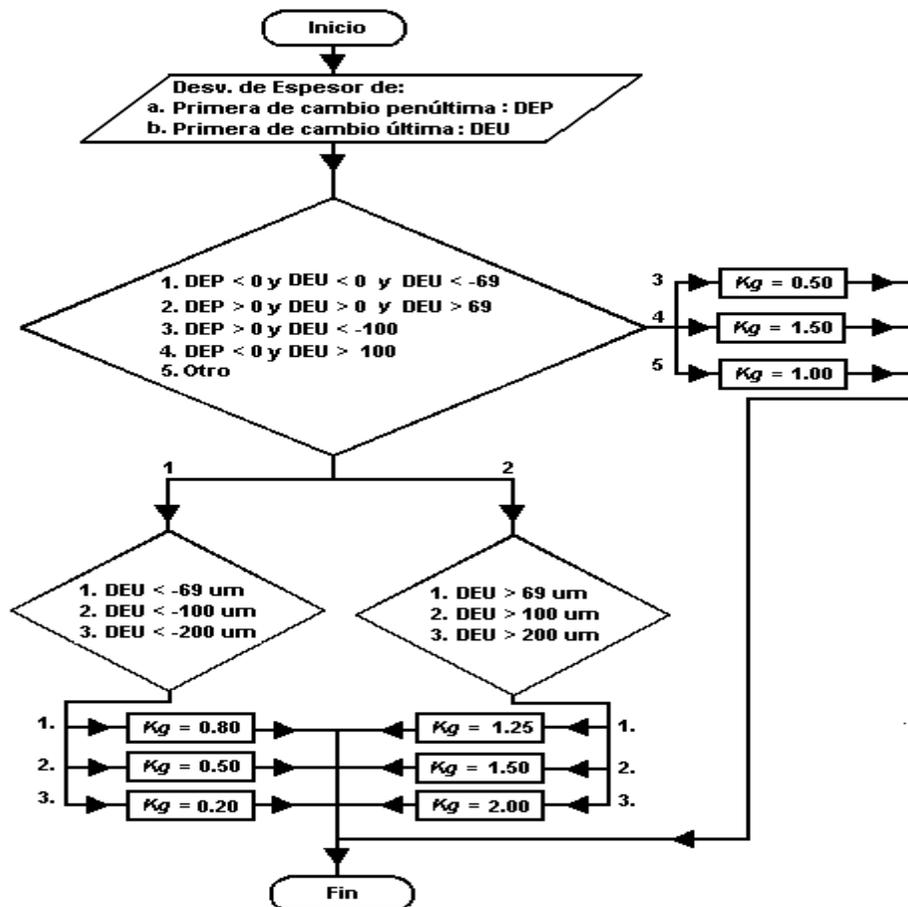


Figura 36. Algoritmo adaptativo 1

Las dos primeras opciones de la estructura de decisión principal enmarcan los casos base. A partir de estos dos luego se revisa el rango donde cae la desviación de espesor última para variar la ganancia K_g . Las tercera y cuarta opciones representan aquellos casos en los que hay un cambio de signo entre las desviaciones de espesor penúltima y última y además una desviación última no admisible, con lo cual se toma como medida de precaución disminuir ó aumentar el cálculo respectivamente.

Este primer algoritmo muestra las variaciones del nuevo parámetro K_g ante la desviación de espesor de la primera de cambio última de la siguiente manera:

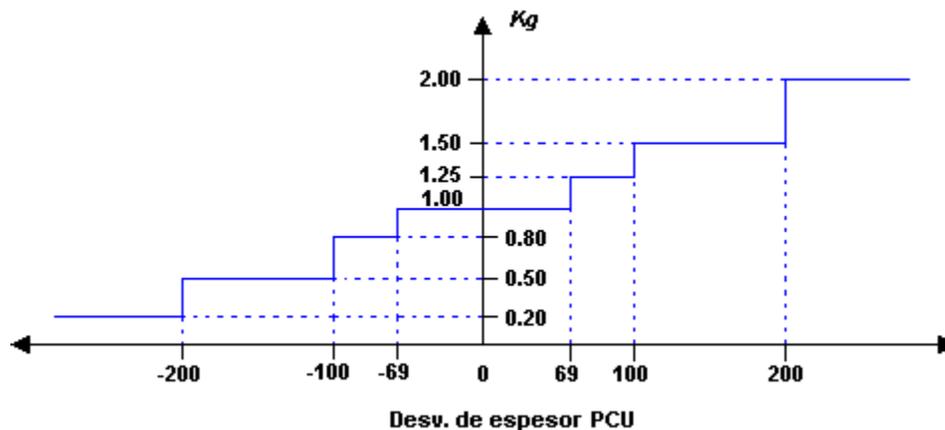


Figura 37. Forma del parámetro K_g en el algoritmo adaptativo 1

Ya que el modelo actúa solo sobre primeras de cambio, no existe la posibilidad de adaptar K_g pieza a pieza sino calcularlo solo una vez para todas las piezas de una línea y esperar la desviación de la primera de cambio siguiente para modificarlo. Eso hizo que la gran amplitud en ancho y alto de los escalones planteada en el algoritmo adaptativo 1 (ver figura 36) generara dos situaciones no deseables.

En los casos donde K_g es mayor que la unidad el cálculo se puede aumentar tanto, que además de lograr recuperar el déficit se puede generar un excedente que origine que el preset de la primera de cambio siguiente sea muy cerrado en vista de una predicción de desgaste mayor que el desgaste real.

De forma equivalente cuando K_g es menor que la unidad, el cálculo se puede disminuir tanto, que además de atenuar el excedente se puede crear un déficit tal que el preset de la primera de cambio siguiente sea muy abierto por una predicción de desgaste menor que el desgaste real.

Ante tal situación se redefinió la función generadora de K_g haciéndola modificable en un grupo más amplio de valores. Ahora K_g depende no solo de la secuencia de signos en las desviaciones y de la magnitud de la primera de cambio última sino también de la magnitud de la penúltima.

Se definieron dos estructuras matriciales de decisión, en las cuales los índices representan el rango donde caen las desviaciones de la primera de cambio penúltima y última y el centro representa los posibles valores de K_g

	Rango 6	Rango 7	Rango 8	Rango 9	Rango 10
Rango 1	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₆
Rango 2	K ₁	K ₃	K ₄	K ₅	K ₇
Rango 3	K ₁	K ₃	K ₅	K ₇	K ₈
Rango 4	K ₁	K ₃	K ₅	K ₈	K ₉
Rango 5	K ₁	K ₃	K ₅	K ₈	K ₁₀

■ Desv. PCP ■ Desv. PCU

Tabla 1. Forma genérica de la estructura de decisión matricial

Para las combinaciones de desviaciones por signo de los tipos negativa – negativa y positiva – positiva se definieron las matrices:

	(-70 0]	(-100 -70]	(-150 -100]	(-200 -150]	(-∞ -200]
(-70 0]	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
(-100 -70]	1,00	0,60	0,40	0,20	0,15
(-150 -100]	1,00	0,60	0,20	0,15	0,10
(-200 -150]	1,00	0,60	0,20	0,10	0,05
(-∞ -200]	1,00	0,60	0,20	0,10	0,01

■ DEP ■ DEU

Tabla 2. Estructura matricial para desviaciones negativa- negativa



	[0 70)	[70 100)	[100 150)	[150 200)	[200 ∞)
[0 70)	1,00	1,40	1,60	1,80	2,00
[70 100)	1,00	1,60	1,80	2,00	2,20
[100 150)	1,00	1,60	2,00	2,20	2,40
[150 200)	1,00	1,60	2,00	2,40	2,60
[200 ∞)	1,00	1,60	2,00	2,40	2,80

DEP
 DEU

Tabla 3. Estructura matricial para desviaciones positiva- positiva

Indudablemente la temperatura de la banda es de vital importancia en cualquiera de las áreas de la línea de laminación, y durante el desarrollo de los diferentes modelos implantados en el tren continuo de laminación en caliente de SIDOR fue primordial fijar un rango de temperaturas en cizalla (de entrada al tren) del desbaste dentro de una banda muerta, que diera validez a tales modelos, dependientes, directa o indirectamente de esa temperatura. El rango fijado fue de [1020 ° C 1100 ° C] y fuera de este no se garantiza que los modelos generen las salidas esperadas en las diferentes variables que se controlan a cada pieza (espesor, temperatura de laminación u otra).

Por esta razón se incluyó en el algoritmo un módulo de filtrado de desviaciones de espesor por efectos de temperatura en cizalla fuera de rango. En los tipos de desviaciones negativa – negativa y positiva – positiva en los cuales alguna de las bandas presente temperatura superior a 1100 ° C ó inferior a 1020 ° C, respectivamente, se obvia cualquier toma de decisión a través de la matriz correspondiente porque estas temperaturas son potenciales causas de desviaciones negativas y positivas en cada uno de los casos, y podrían dar origen a una adaptación no fundamentada de la ganancia K_g . Incluyendo la temperatura de banda en cizalla en el módulo de memoria, el esquema de lazo cerrado finalmente adoptado fue:

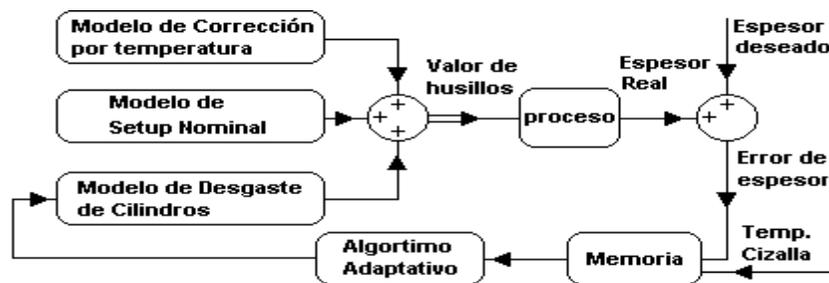


Figura 38. Introducción de la temperatura en cizalla a la memoria del lazo adaptativo

Con la nueva estructura de decisión para el valor de la ganancia K_g y la adición del filtrado de desviaciones por temperatura en cizalla, el nuevo algoritmo quedó definido como se muestra a continuación:

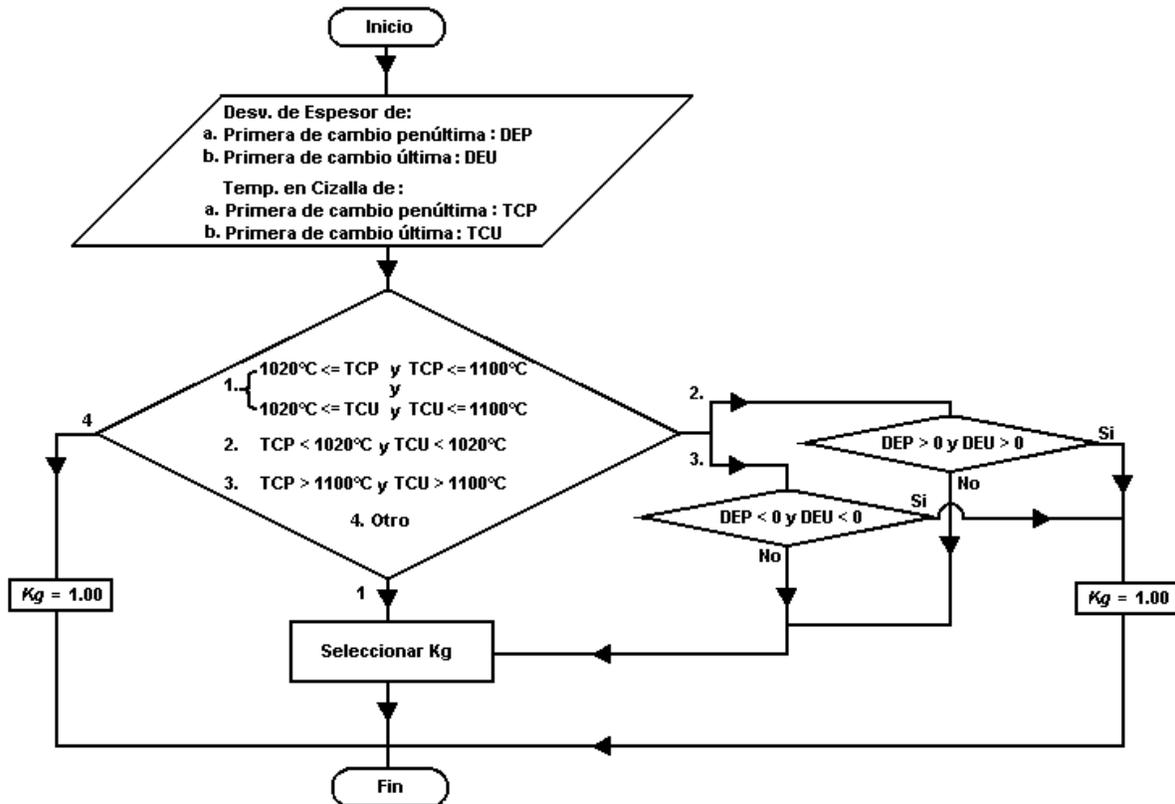


Figura 39. Algoritmo adaptativo 2

En el nuevo algoritmo la primera tarea es el filtrado por temperatura. La primera opción está referida a los casos en los cuales las temperaturas en cizalla de las primeras de cambio penúltima y última se encuentran dentro del rango admisible. Las segunda y tercera opciones representan los casos en los que potencialmente la temperatura en cizalla genere algún tipo de desviación de espesor. Si esto ocurre la ganancia adaptativa toma el valor unitario. En el proceso *Seleccionar K_g* (figura 36) se lleva a cabo la adaptación de dicho parámetro dentro de la estructura matricial planteada.

Con el signo de las desviaciones de espesor penúltima y última se hallan los rangos dentro de los que se encuentran cada una. Estos rangos obedecen a un índice de fila y columna

respectivamente. El parámetro K_g toma el valor de hallado en la posición que corresponda al índice matricial resultante. Si la multiplicación de los signos de las desviaciones de espesor de la penúltima y última primeras de cambio es negativa entonces el parámetro toma el valor unitario.

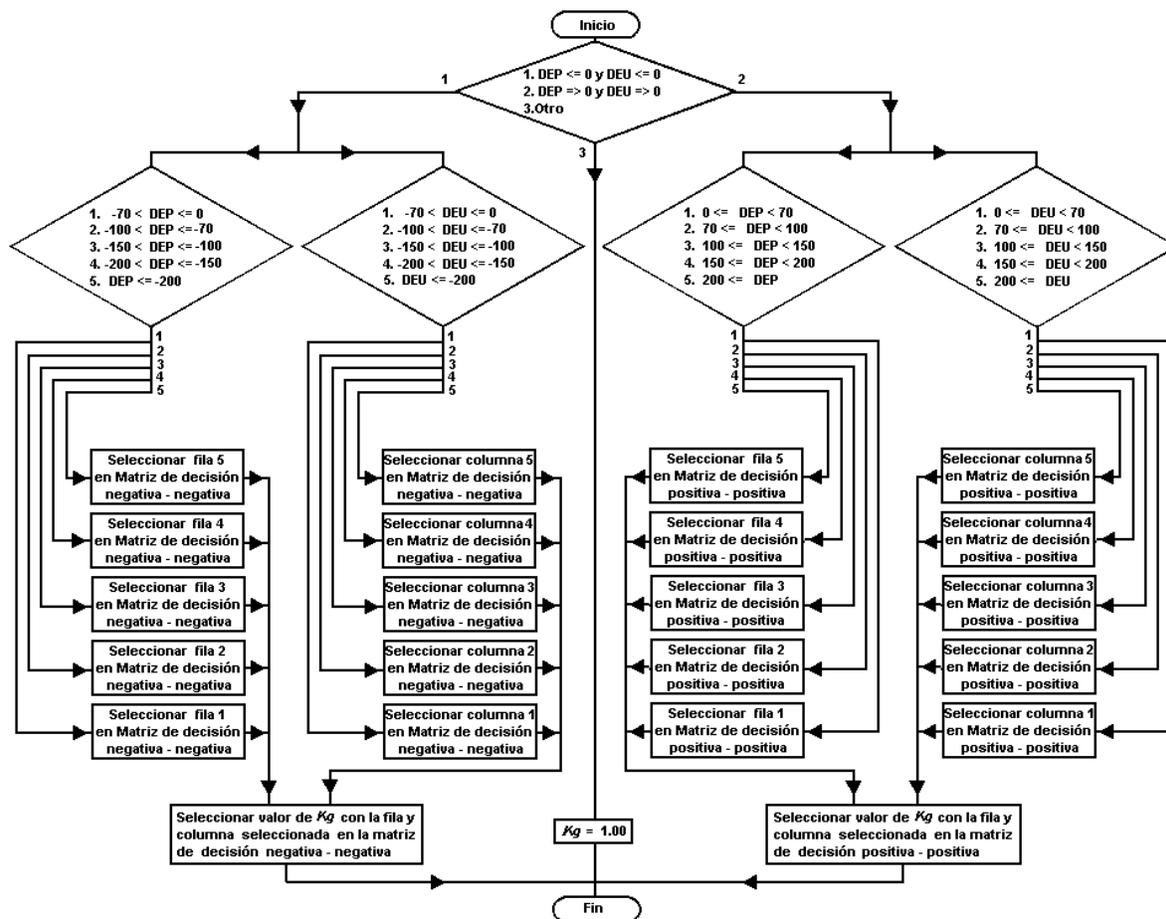


Figura 40. Selección de K_g en el algoritmo adaptativo 2

4. Análisis de las variables silicio, carbono y manganeso (de la composición química del acero) para estudiar su efecto sobre los óxidos de hierro formados sobre la banda.

De lo visto en el capítulo I concerniente al efecto que los elementos constituyentes del acero en el desgaste de los cilindros de laminación, se analizó la concentración de los elementos silicio, carbono y manganeso para buscar una asociación con los casos de mayor y menor

desgaste de los cilindros mediante un análisis de varianza, por medio del software estadístico STATGRAPHICS del parámetro K_{tace} respecto a estos tres. En la muestra recogida se encontró el silicio en el rango [0.0134404 0.186111] (%), carbono en el rango [0.049223 0.267172] (%) y manganeso en el rango [0.0244488 1.3389] (%). Estos rangos fueron divididos cada uno en tres grupos de acuerdo a un sistema de clasificación de 3 niveles, desde los más bajos hasta los más altos contenidos

Los grupos construidos fueron:

Silicio:

- Grupo 1 = [0.0134404 0.0189488] (%) (Bajo)
- Grupo 2 = [0.0374400 0.0955552] (%) (Medio)
- Grupo 3 = [0.1749080 0.1861110] (%) (Alto)

Carbono:

- Grupo 1 = [0.0492230 0.0641823] (%) (Bajo)
- Grupo 2 = [0.0904273 0.1397930] (%) (Medio)
- Grupo 3 = [0.2098050 0.2671720] (%) (Alto)

Manganeso:

- Grupo 1 = [0.0244488 0.295171] (%) (Bajo)
- Grupo 2 = [0.3486990 0.500448] (%) (Medio)
- Grupo 3 = [0.8410860 1.338900] (%) (Alto)

5. Análisis del uso de lubricantes y su efecto sobre el desgaste de los cilindros.

Mediante el software estadístico STATGRAPHICS y partir de los datos recolectados en el paso metodológico n ° 2 se realizó un análisis de varianza del parámetro K_{tace} respecto al uso de lubricante. En el tren continuo de laminación en caliente de SIDOR se utiliza por defecto lubricación en los primeros cuatro bastidores ante determinados productos, pero es posible que ante la ausencia de aceite en alguno de los depósitos se deje de utilizar lubricación en el bastidor

correspondiente. De esta forma puede haber cero, uno, dos, tres o cuatro bastidores utilizando lubricación.

En la muestra recolectada, las líneas de estudio en las cuales se utilizó lubricación incluían el uso de la misma en todos los bastidores.

6. Análisis por kilometraje laminado durante un programa de laminación y su efecto sobre el desgaste del cilindro

Para estudiar si existe alguna tendencia en el desgaste de los cilindros de laminación según el kilometraje laminado durante un mismo programa de laminación, se realizó mediante el software estadístico STATGRAPHICS un análisis de varianza del parámetro K_{lace} respecto a los kilómetros de banda laminados por los cilindros en el programa de laminación respectivo.

En la muestra recogida se encontró kilometraje de banda laminado en el rango [0 67,102] (Km.). Este rango fue dividido 5 grupos clasificados desde los más bajos hasta los más altos kilometrajes.

Grupo 1 = [0 10) (Km.)

Grupo 2 = [10 20) (Km.)

Grupo 3 = [20 30) (Km.)

Grupo 4 = [30 40) (Km.)

Grupo 5 = [40 ∞) (Km.)

7. Análisis por velocidades de enhebrado

Por la exigencia de mantener el flujo másico del material en cada bastidor se debe cumplir que la relación entre el espesor de entrada y el espesor de salida debe ser igual a la relación entre la velocidad final y la velocidad inicial.

$$\frac{E_o}{E_f} = \frac{V_f}{V_o} \quad (20)$$

Así, si deseamos conocer la velocidad inicial, conociendo la velocidad final, tendremos que:

$$V_o = V_f \frac{E_o}{E_f} \quad (21)$$

Suponiendo que la velocidad final permaneciera constante sin importar los espesores, entonces la velocidad inicial depende de la relación entre los espesores (alargamiento). Mientras más fino sea el espesor deseado (de salida), mayor velocidad inicial tendrá la banda. Con esto se evidencia la diferencia entre las velocidades que el tren debe emplear para materiales de un espesor u otro.

Cada producto es laminado a una determinada velocidad, en principio para mantener el flujo másico. Pero al analizar más en detalle, los productos delgados requieren ser laminados a altas velocidades por el alto grado de homogeneización en la temperatura de su cuerpo, por el bajo gradiente entre el núcleo y las superficies y por la magnitud del alargamiento generado. Los productos gruesos requieren ser laminados a bajas velocidades para minimizar el gradiente de temperatura entre núcleo y superficie, dando así, tiempo de homogeneizar su temperatura.

Aún cuando existen criterios encontrados acerca de la presencia de óxido abrasivo para la superficie del cilindro a las temperaturas a las cuales el desbaste entra al tren continuo en SIDOR, el óxido se regenera una vez que la banda se está laminando, durante el recorrido de cada sección transversal de la misma, desde la salida de un bastidor hasta la entrada al próximo. Por esto, la diferencia entre las velocidades de laminación es de importancia porque el óxido tiene mayor posibilidad de regeneración en los productos laminados a baja velocidad que en los laminados a alta velocidad en los cuales la banda demora menos tiempo entre bastidores.

Haciendo uso del software estadístico STATGRAPHICS se realizó un análisis de varianza del parámetro K_{tace} respecto a velocidades de enhebrado de la banda en el bastidor 6, que es un reflejo de las velocidades de enhebrado en los demás bastidores. En la muestra recogida se encontraron velocidades de enhebrado en el rango [1.83389 9.18249] (m/s). Este rango fue dividido en 5 grupos clasificados desde las más bajas a hasta las más altas velocidades.

Los grupos construidos fueron:

Grupo 1 = [1.83389 2.96117] (m/s)

Grupo 2 = [3.09270 4.18152] (m/s)

Grupo 3 = [4.52280 4.93934] (m/s)

Grupo 4 = [6.00971 7.47837] (m/s)

Grupo 5 = [7.50549 9.18249] (m/s)

8. Desarrollo e implementación de una estrategia de cálculo de desgaste por variación de la posición de husillos.

Al revisar los históricos de la posición de husillos a través de líneas de laminación de muchas bandas (30, 40 o más), fue notorio en la mayoría de los casos observar la tendencia de los husillos a cerrarse respecto a la posición de husillos del preset de la primera de cambio, evidenciando el desgaste de los cilindros de laminación. Ya que se dispone de la lectura de dicha variable se desarrolló un algoritmo que permite comparar el cálculo del modelo con la tendencia en la posición de husillos en los mencionados casos, y en base a tal comparación satisfacer cualquier déficit del modelo. La lógica desarrollada para tal fin se muestra mediante el siguiente diagrama de flujo:

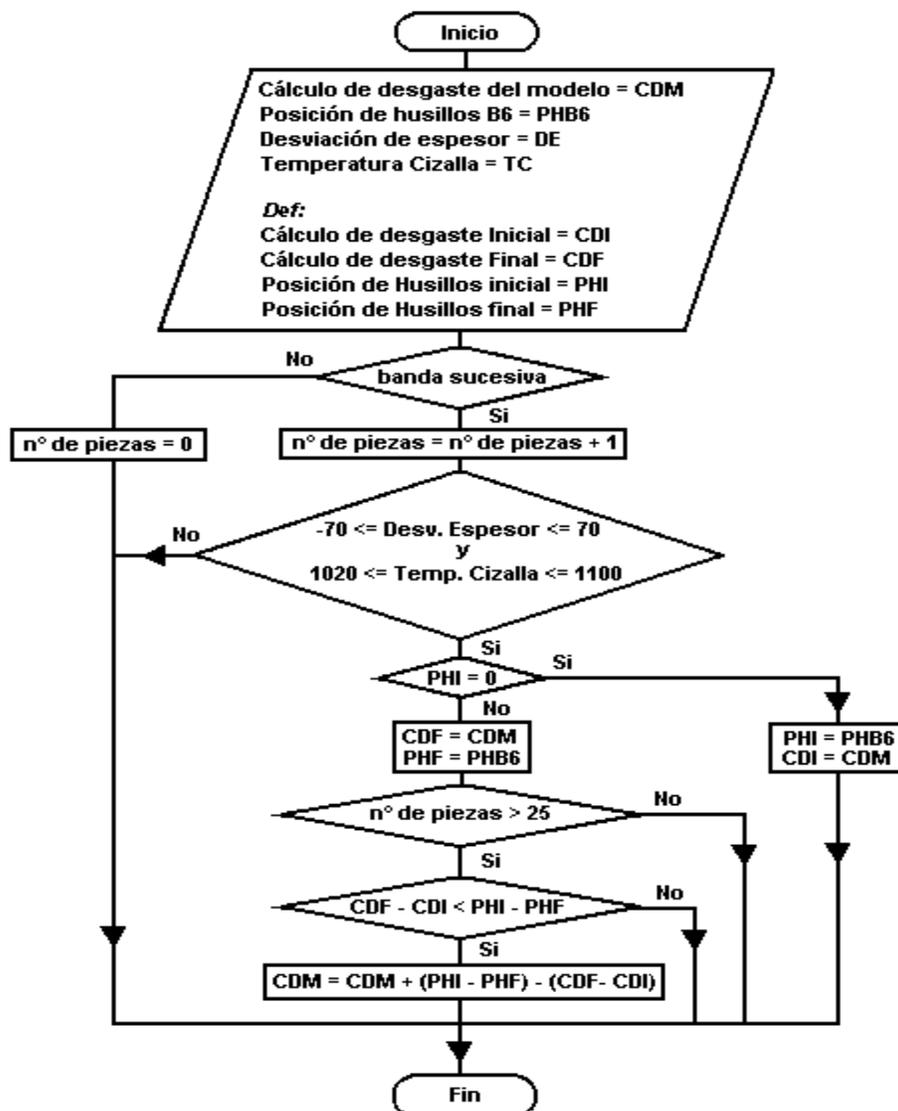


Figura 41. Algoritmo de cálculo de desgaste por cierre de husillos

A partir de la primera banda sucesiva de cada línea de un programa de laminación se revisa si la banda tuvo desviación de espesor mínima (admisible) y temperatura en cizalla dentro del rango establecido para tomar la posición de husillos inicial. Para conocer si el modelo está subestimando el desgaste, cada banda posterior a la toma de la posición de husillos inicial recibe el mismo tratamiento para tomar la posición de husillos final y comparar a partir de 25 piezas si el cierre de los husillos es mayor al cálculo del modelo de desgaste. La decisión de tomar acciones solo a partir de más de 25 piezas laminadas es debida a la gran variabilidad (en pequeñas pero significativas magnitudes para el proceso) de la variable posición de husillos, y esto permite ver si realmente hay alguna tendencia en el cierre de husillos cuando es estable el efecto que un mismo material puede tener sobre el desgaste de cilindro.

Resultados y análisis

Capítulo IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

1. Criterio de recolección de datos para hallar las variables x_i :

Al analizar el histórico de los meses de abril, mayo, junio y julio de 2004 se hallaron 170 muestras que satisficieran el criterio propuesto. En éstas se encuentran 36 tipos de acero diferentes de un total de 100 que han sido procesados por el tren continuo de laminación en caliente de SIDOR. Estas muestras incluyen aceros pertenecientes a 10 de los 12 grupos de dureza clasificados para el laminador y espesores de salida desde los 2 mm hasta los 12 mm en un rango que va desde los 1,8 mm hasta los 13 mm.

Los valores reconstruidos del parámetro K_{tace} no estuvieron alejados en promedio de los valores originales encontrados en base de datos, pero la variabilidad de estos es grande, aún en los aceros en los cuales se encontraron la mayor cantidad de muestras, tal cual lo demuestra el coeficiente de variación de las muestras del nuevo K_{tace} (ver tablas 4 y 5)

TACE	N ° Muestras	Ktace Original	Ktace Recons.	Coef. Var. (Ktace Recons.) %
1	5	3,59	7,10	91,24
2	10	3,52	3,95	45,52
5	5	4,79	3,07	54,11
6	14	5,27	4,12	66,20
9	7	3,00	6,48	43,34
10	13	4,32	5,82	45,18
14	9	10,00	3,26	84,19
23	7	4,07	10,64	24,13
28	6	2,53	3,55	28,48
30	5	2,00	5,36	49,49
99	5	4,17	15,00	52,28
32	9	3,82	6,34	73,65
44	9	2,68	15,24	33,35
91	14	1,85	8,78	66,41

Tabla 4. Aceros con mayor cantidad de muestras: Comparación entre K_{tace} real y K_{tace} reconstruido.

TACE	N ° Muestras	Ktace Original	Ktace Recons.	Coef. Var. (Ktace Recons.) %
12	3	2,94	2,78	52,65
13	3	2,71	9,50	42,76
31	3	3,43	3,58	72,05
41	3	2,58	3,19	14,69
92	4	2,01	10,03	47,54
95	3	2,72	11,61	55,68
116	4	3,11	14,21	45,88
122	3	2,00	3,67	31,88
328	5	2,00	3,03	44,33
303	5	2,00	4,02	35,00

Tabla 5. Aceros con menor cantidad de muestras. Comparación entre K_{tace} real y K_{tace} reconstruido

Ante la variabilidad del parámetro K_{tace} se descartó la posibilidad de utilizar los resultados promedio en un proceso de sustitución de éstos sobre la base de datos. Se hizo evidente que el parámetro no se debe comportar de la misma forma ante diferentes condiciones de proceso y se debe adaptar a estas de algún modo.

2. Evaluación del parámetro K_{tace} a través de un modelo de temperatura

En las pruebas fuera de línea (offline), el modelo de cálculo del parámetro K_{tace} dependiente de la temperatura en cizalla, dio mejores resultados, al obtenerse el mayor porcentaje de menores magnitudes en las desviaciones de espesor de las primeras de cambio analizadas.

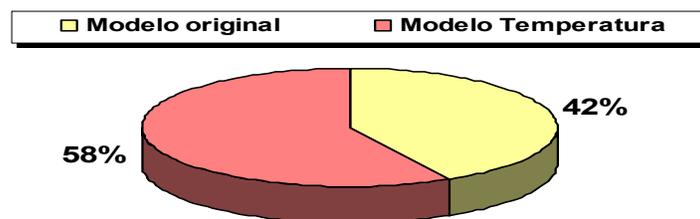


Figura 42. Comparación por porcentaje de casos con menor desviación de espesor de punta del modelo original y el modelo de temperatura. Se compararon 107 bandas primeras de cambio consecutivas desde el 7/10/2004 al 10/10/2004.

Sin embargo no hubo, programa a programa, diferencias notorias entre las desviaciones que uno u otro modelo produjo, dándose un contraste de resultados entre un programa de laminación y otro.

En el programa 10-683 del mes de octubre de 2004, el modelo evaluado se impuso en 5 de 7 primeras de cambio e igualó en el resto. En la siguiente tabla se muestran las desviaciones generadas por ambos modelos y el número de tabla de laminación de cada una de las líneas.

Tabla	Desv. Modelo Original (μ m)	Desv. Modelo Ktace (Temp) (μ m)
3129	178	178
4807	60	59
4018	173	170
4632	68	68
2603	91	86
4632	80	77
2593	156	152

Tabla 6. Comparación de modelos en programa 10-683

En el programa 10-766 del mes de octubre de 2004 el modelo original se impone en 6 de 10 casos, igualando en el resto y obteniendo en el mejor de los casos 11 micras de diferencia.

Tabla	Desv. Modelo Original (μ m)	Desv. Modelo Ktace (Temp) (μ m)
1380	58	58
2934	58	58
4250	98	99
3241	7	9
4646	29	31
4064	182	182
3858	22	22
4241	-22	-24
4232	-16	-27
4787	5	-10

Tabla 7. Comparación de modelos en programa 10-766

Esta naturaleza de resultados se produjo en los 12 programas estudiados lo cual es indicativo de que la temperatura de banda en cizalla (antes de entrar la banda al tren) no es un factor de peso en la mejor aproximación de un modelo de cálculo de desgaste de cilindros que depende en primera instancia del desgaste calculado en el último de los bastidores, el cual es el menos afectado por los efectos de la temperatura y fatiga térmica.

3. Desarrollo e implementación de un esquema adaptativo

En las pruebas fuera de línea (offline) del modelo adaptativo I, este superó al modelo original en dos tercios del conjunto de primeras de cambio estudiado.

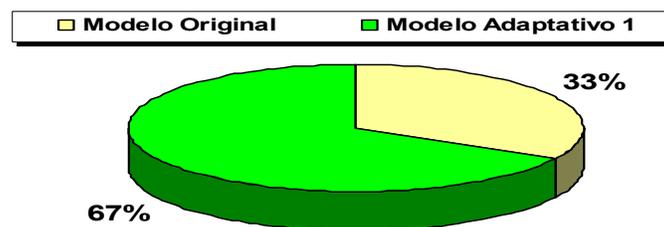


Figura 43. Comparación por porcentaje de casos con menor desviación de espesor del modelo original y el modelo adaptativo I. Se compararon 104 bandas primeras de cambio consecutivas desde el 5/11/2004 al 7/11/2004.

Al analizar los casos en los que uno u otro modelo resultó mejor, fue notorio que el modelo original tuvo más acierto en los casos en los que la desviación fue negativa y el modelo adaptativo tuvo más acierto en los casos en los que la desviación fue positiva (ver figura 43).

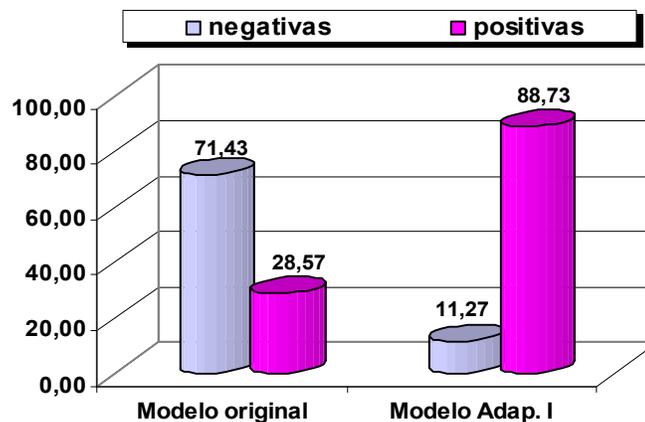


Figura 44. Comparación de modelos por tipos de desviación: original y adaptativo I.

Se compararon 104 bandas primeras de cambio consecutivas desde el 5/11/2004 al 7/11/2004.

Así se comprobó que la estrategia de aumento de la ganancia adaptativa genera buenos resultados ya que siempre que el modelo original se quedó corto en el cálculo, el modelo adaptativo I fue capaz de cubrir parte del déficit generado disminuyendo la magnitud de las desviaciones positivas posteriores. En el programa de laminación 11-621 de noviembre de 2004 se puede observar lo anterior (ver tabla 8).

Tabla	Desv. Modelo Original (μ m)	Desv. Modelo Adaptativo I (μ m)
3318	72	72
4861	113	113
4340	116	114
4426	59	51
3937	146	135
4426	164	155

Tabla 8. Comparación de modelos en programa 11-621

Sin embargo, ante la imposibilidad de tener retroalimentación durante la laminación de bandas sucesivas y habiendo obligado al algoritmo a fijar la ganancia durante toda una línea de laminación, se produjo un fenómeno de sobreestimación del desgaste reflejado en el hecho de que solo se alcanzó 28% de acierto en los casos en los que la desviación fue negativa (ver figura 43).

Además del problema anterior, hay que añadir que el algoritmo planteado no tiene un intervalo de muestreo periódico, debido a que las líneas (lotes) de programas pueden tener diferentes cantidades de piezas cada uno. Esto hace casi imposible que el tiempo de muestreo para la obtención de la desviación de espesor en dos primeras de cambio sucesivas sea siempre el mismo, lo cual es perjudicial ya que se asume que la ganancia debe permanecer invariante sin importar la longitud del intervalo. Es tanto así, que si la primera línea de un programa tiene 2 piezas, el intervalo de muestreo puede ser de alrededor 4,5 minutos, cuando es laminada la segunda primera de cambio. Y si la línea de esta última es de 10 piezas, el intervalo de muestreo respecto a la tercera primera de cambio sería de 22,5 minutos, ó de una hora si la línea tuviese al menos 25 piezas.

Si se observa la tabla n ° 9 (programa 11-622), la propuesta no tiene la capacidad de disminuir la

ganancia después de la primera de cambio de la tabla 4044 y esto hizo que las primeras de cambio de las tablas 3452 y 2753 tuvieran menor acierto en la desviación de espesor.

Tabla	Desv. Modelo Original (μ m)	Desv. Modelo Adaptativo (μ m)
2918	105	105
4471	29	29
1985	20	19
1452	117	116
4044	128	126
3452	-26	-31
2753	-16	-21
3306	135	131
4044	- 69	-74
1985	-1	-8
4136	99	92
594	128	120
3563	234	224
4471	9	-6

Tabla 9. Comparación de modelos en programa 11-622

Aunque se detectó la falla, por los mejores resultados en casos de desviaciones positivas, atribuibles al desgaste, se implementó en línea (online) el modelo adaptativo I sustituyendo al modelo original mientras se desarrollaba una nueva propuesta que corrigiera la falla.

Con la nueva propuesta (modelo adaptativo II) se logró solo se logró mantener el acierto en desviaciones negativas de espesor respecto al modelo predecesor (ver figura 45), pero se mejoró el acierto global medido en desviaciones de cualquier signo (ver figura 44).

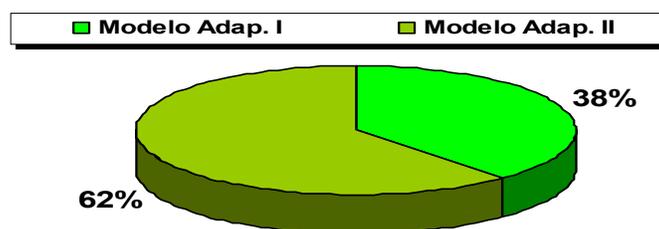


Figura 45. Comparación de modelos: Adaptativo retroalimentado I

y Adaptativo retroalimentado II. Se compararon 105 bandas primeras de cambio consecutivas desde el 9/11/2004 al 11/11/2004.

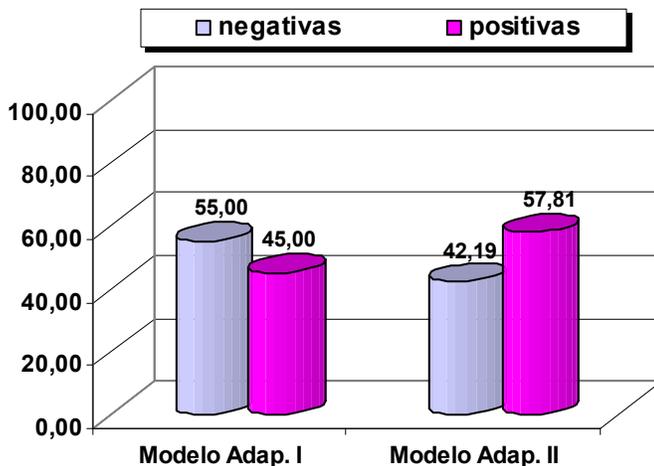


Figura 46. Comparación de modelos por tipo de desviación: Adaptativo retroalimentado I y Adaptativo retroalimentado II. Se compararon 105 bandas primeras de cambio consecutivas desde el 9/11/2004 al 11/11/2004.

En la figura 45 se observa que aunque el modelo adaptativo I es más efectivo en los casos de desviaciones negativas, el rendimiento de la nueva propuesta se encuentra solo 10 puntos por debajo, lo cual es aceptable. En los casos de desviaciones positivas la diferencia es a favor de la propuesta y es de 15 puntos, lo cual representa una mejora significativa.

En el programa 11-631 del mes de noviembre el modelo adaptativo II supera en tres de las cinco primeras de cambio al modelo adaptativo I, con logros intercalados para cada modelo.

Tabla	Desv. Modelo Adap I (μ m)	Desv. Modelo Adap II (μ m)
2488	142	143
3683	122	121
4632	9	1
4426	0	-10
4290	14	3

Tabla 10. Comparación de modelos adaptativos retroalimentados. programa 11-631

En el programa 11-189 del mes de noviembre el modelo adaptativo II supera en 9 de las 10 primeras de cambio al modelo adaptativo I, resaltando en este caso particular que se dieron mejoras en los casos de desviaciones negativas, tal cual se demuestra en las desviaciones de espesor de las primeras de cambio de las últimas 4 líneas del programa.

Tabla	Desv. Modelo Adap Retro I (μ m)	Desv. Modelo Adap Retro II (μ m)
2944	15	14
2838	-57	-58
2753	-43	-41
2944	-43	-42
2918	13	11
4471	58	56
3504	53	-47
4061	-137	-132
1282	-137	-135
4442	-133	-128

Tabla 11. Comparación de modelos adaptativos retroalimentados. programa 11-189

En vista de las mejoras obtenidas se decidió implementar en línea (online) el modelo adaptativo II sustituyendo este al modelo adaptativo I.

4. Análisis de las variables silicio, carbono y manganeso (de la composición química del acero) para estudiar su efecto sobre los óxidos de hierro formados sobre la banda.

A través de las muestras recogidas no fue posible obtener todo el rango de concentraciones de silicio, carbono y manganeso utilizado en los aceros producidos por SIDOR, reduciendo esto la posibilidad de realizar análisis de varianza donde interactuaran la mayor cantidad de combinaciones posibles de ellas, lo cual hubiese permitido conocer de mejor forma qué efecto producen al mismo tiempo sobre el desgaste de los cilindros. Sin embargo, en los resultados de los análisis de varianza univariados se muestra una clara tendencia de aumento del parámetro K_{tace} conforme aumentan los contenidos de cada uno de los elementos.

Al analizar el contenido de silicio (figura 46), los resultados avalan el hecho de que los altos

contenidos de silicio dan lugar a la mayor formación de faiilita [2] [15], la cual dificulta la remoción en el duo descamador y en la caja descamadora de la wustita a partir de la cual se generan más rápidamente los óxidos abrasivos para el cilindro (magnetita y hematita), y en consecuencia el aumento del desgaste. Sin embargo, es evidente que esto no concuerda con los resultados obtenidos por Olivares [7] quien propone que el desgaste es menor conforme aumenta el contenido de silicio en el acero laminado.

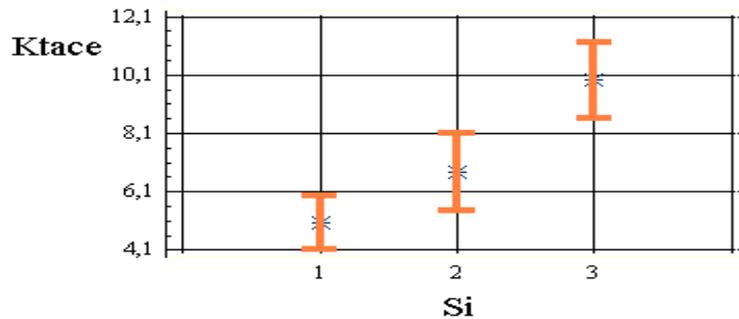


Figura 47. Análisis de varianza. Parámetro K_{tace} ante Concentración de Silicio.

En cuanto al carbono y manganeso, el resultado del análisis univariable no es tan concluyente por el efecto combinado que ambos podrían producir sobre los óxidos (ver figuras 47 y 48). En el caso del carbono el resultado podría explicar una relación de aumento de desgaste de acuerdo a un aumento de dureza de la banda (y no del óxido), ya que el carbono es el principal responsable de dar el grado de dureza al acero y esto permitiría medir cuáles aceros lastiman más al cilindro a través del desgaste mecánico que se presenta normalmente en el laminado, es decir, en las operaciones de enhebrado y desenhebrado, en las cuales se producen los mayores impactos entre el cilindro y la banda. El grado de dureza de la banda sería un reflejo del grado de daño que esta ocasione al cilindro, y es que a pesar de que cualquier banda es considerablemente más blanda que el cilindro a las temperaturas de laminación, existen diferencias entre la dureza que presenta una de estas y otra de diferente contenido de carbono al ser laminada.

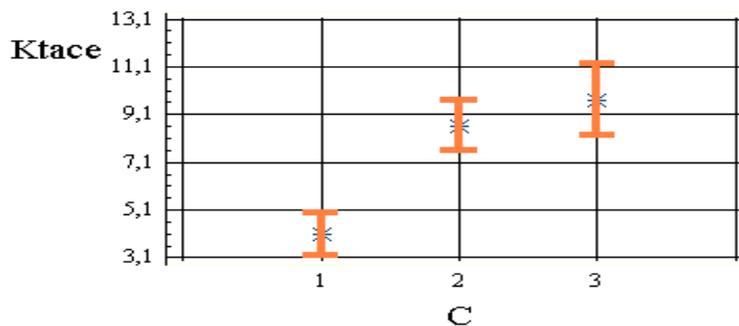


Figura 48. Análisis de varianza. Parámetro K_{tace} ante Concentración de Carbono.

Aunque el manganeso tiene la propiedad de actuar como un desoxidante del acero y esto haría pensar que una reducción de la oxidación conlleva a una reducción del desgaste del cilindro por el efecto del óxido sobre este último, los resultados de análisis univariable obtenidos son opuestos evidenciando que la información obtenida a través del manganeso puede ser de importancia en interacción con otros elementos como el carbono.

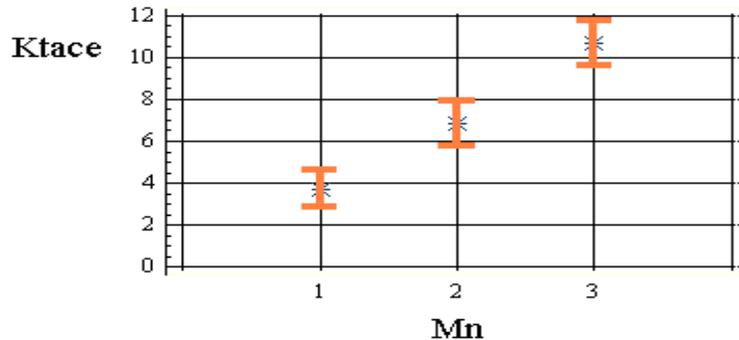


Figura 49. Análisis de varianza. Parámetro K_{tace} ante Concentración de Manganeso.

5. Análisis del uso de lubricantes y su efecto sobre el desgaste de los cilindros.

En principio, la idea planteada para ver el efecto que tiene el uso de lubricación sobre el desgaste de los cilindros fue comparar el comportamiento del parámetro K_{tace} mediante un análisis de varianza respecto al uso o no de la lubricación, manteniendo constante todos los demás factores. El resultado de tal prueba indicó lo esperado, el parámetro K_{tace} fue 2,28 veces mayor cuando no se utilizó lubricación.

K_{tace0} : promedio de K_{tace} en la muestra que no utilizó lubricación.

K_{tace1} : promedio de K_{tace} en la muestra que utilizó lubricación.

$$K_{tace0} = 8,9947 \quad (22)$$

$$K_{tace1} = 3,9373 \quad (23)$$

$$K_{tace0} = 2,2844 K_{tace1} \quad (24)$$

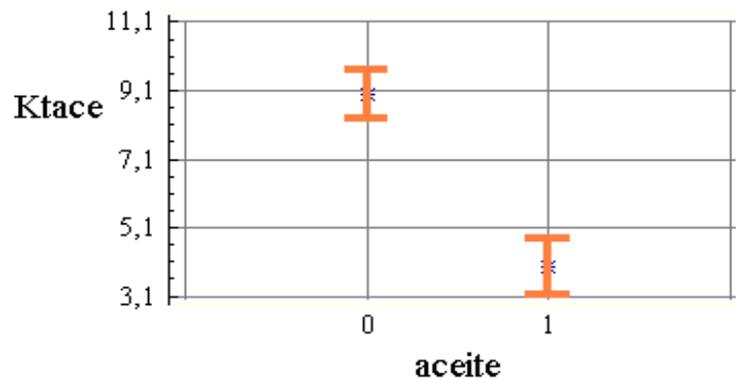


Figura 50. Análisis de varianza de K_{tace} respecto al uso de lubricante

Esto hizo pensar en utilizar la constante proporcional como un coeficiente dentro de la ecuación que diferenciara la forma de cálculo en los casos donde no se utiliza lubricación. Sin embargo los resultados obtenidos al realizar el análisis de varianza del parámetro K_{tace} ante el espesor de salida del bastidor 6 evidenciaron la actuación de otros factores en la magnitud de tal constante.

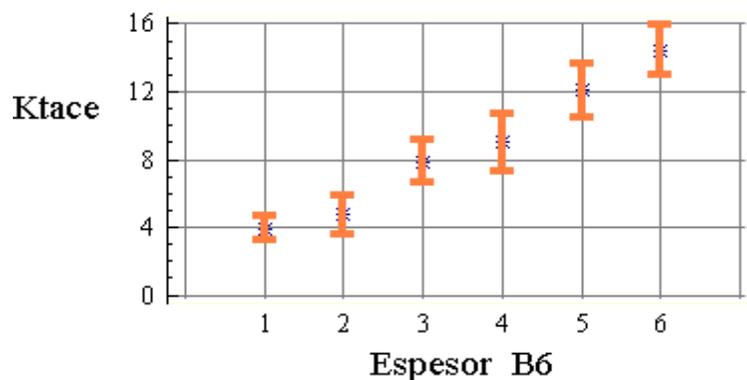


Figura 51. Análisis de varianza de K_{tace} respecto al espesor de salida del bastidor 6

En la figura 50 se observa una tendencia de aumento en el parámetro K_{tace} a medida que aumentan los espesores de salida en el bastidor 6. En el grupo 1 se encuentran todas las muestras en las que se utilizó lubricación. Se pudiera concluir que la diferencia entre los promedios obtenidos para los grupos 1 y 2 la representa el lubricante, pero no se podría explicar el aumento en la diferencia si se comparan los demás grupos con el grupo 1. Ya que la constante 2,2844 representa el estudio de todos los datos en los grupos desde el n° 2 hasta el n° 6 no se puede

concluir que el lubricante es la única causa de su magnitud.

A partir del grupo 3 se observó una tendencia más alta de aumento de los promedios de K_{tace} diferente a la obtenida hasta el grupo 2 (ver figura 49), lo cual evidencia que existen otros factores diferentes al aceite actuando en esos grupos.

En base al argumento anterior y ante la dificultad de obtener claramente el efecto generado por el lubricante, se supuso que la diferencia entre los promedios de los grupos 1 y 2 era debida en su totalidad al uso de lubricante y con esto se construyó un coeficiente de lubricación que representara la mínima diferencia entre un valor del parámetro K_{tace} aplicado a piezas laminadas con o sin lubricación.

K_{taceG1} : promedio de K_{tace} en la muestra del grupo 1.

K_{taceG2} promedio de K_{tace} en la muestra del grupo 2.

$$K_{taceG1} = 5.11223 \quad (25)$$

$$K_{taceG2} = 3.93732 \quad (26)$$

$$K_{aceite} = \frac{K_{taceG1}}{K_{taceG2}} \quad (27)$$

$$K_{aceite} = 1.32780 \quad (28)$$

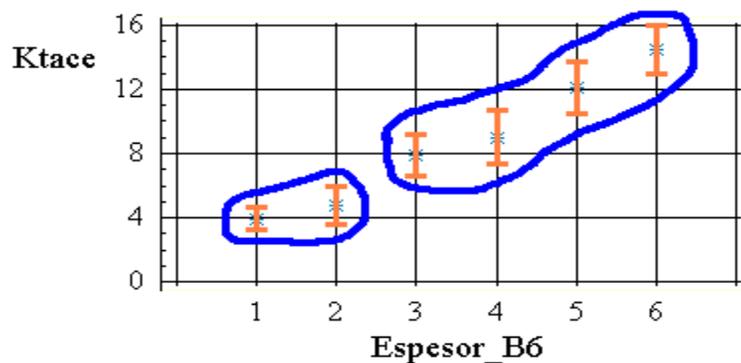


Figura 52. Tendencias de K_{tace} respecto a grupos de espesor de salida del bastidor 6

Debido a que el parámetro K_{aceite} se asumió en los casos en los que no haya lubricación en cualquiera de los bastidores, fue necesario implementar una estrategia para aquellos casos en los cuales se utilice aceite en tres, dos o uno de los bastidores. Se optó por asumir que el uso de lubricante en cada uno de los cuatro primeros bastidores representa una proporción equitativa de la constante asumida. Así, K_{aceite} quedó definida como:

$$K_{aceite} = \begin{cases} 1,3278 & \text{si lubricación en 0 bastidores} \\ 1,2458 & \text{si lubricación en 1 bastidores} \\ 1,1639 & \text{si lubricación en 2 bastidores} \\ 1,0819 & \text{si lubricación en 3 bastidores} \\ 1,0000 & \text{si lubricación en 4 bastidores} \end{cases} \quad (29)$$

6. Análisis por kilometraje laminado durante un programa de laminación y su efecto sobre el desgaste del cilindro

En el análisis de varianza realizado se observa (figura 52) que al inicio de los programas de laminación el desgaste es intenso (grupo 1) dando a entender que el cilindro (en su condición más fría) se calienta rápidamente por la alta transferencia de calor desde la banda producto del alto gradiente de temperatura entre ambos, lo cual hace que se agriete y pierda gran cantidad de material mientras se forma sobre su superficie una capa de óxido que actúa de forma protectora (grupos 2, 3 y 4) disminuyendo el desgaste hasta el punto (grupo 5) en que los efectos de la fatiga térmica eliminan material debajo de la capa de óxido y las partículas abrasivas facilitan el desalojo de regiones del cilindro lastimadas.

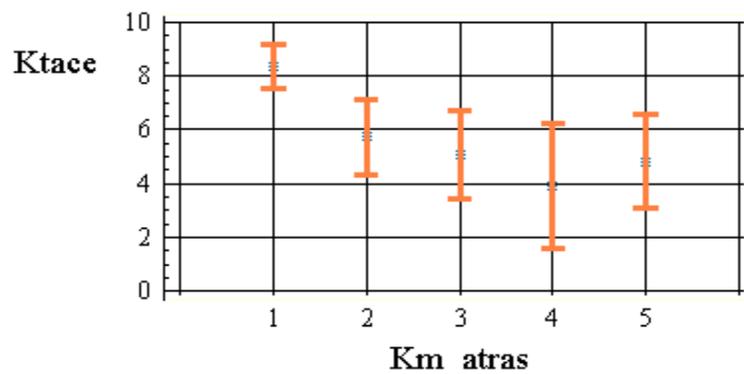


Figura 53. Análisis de varianza de K_{tace} respecto a grupos de kilometraje laminado antes de la línea de estudio.

El kilometraje laminado por los cilindros (exclusivamente en los programas de laminación estudiados) permitió ver la naturaleza del desgaste abrasivo. Los resultados obtenidos representan al menos dos zonas de intensidad de desgaste e incluso podrían verse ahí tres. En la figura 53 se pueden observar ambos casos. La única zona claramente definida es la zona 1. El kilometraje laminado hasta el grupo n ° 1 representa el punto de diferenciación entre las zonas 1 y 2. Hasta allí el parámetro K_{aceite} es máximo. En adelante la situación no es tan clara. El grupo n ° 4 podría representar el punto de diferenciación entre las zonas 2 y 3 (curva roja) pero siendo el de mayor variabilidad también podría ser considerado como un grupo dentro de la zona 2 (curva azul) haciendo que la experiencia no permita divisar la zona 3 en la cual se podría dar desgastar el cilindro tanto como en la primera de las zonas.

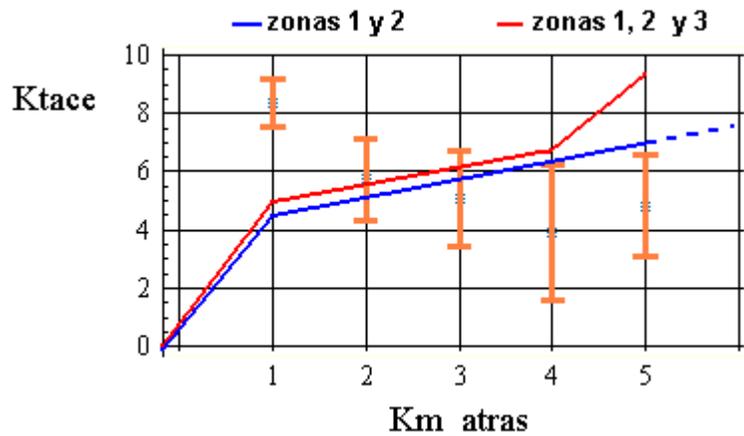


Figura 54. Zonas de intensidad de desgaste abrasivo ante Kilometraje laminado antes de la línea de estudio.

7. Análisis por velocidades de enhebrado

A través de los resultados obtenidos en el análisis de varianza del parámetro K_{tace} respecto a los espesores de salida del bastidor 6 (Ver *Análisis del uso de lubricantes y su efecto sobre el desgaste de los cilindros.*) era previsible obtener los resultados obtenidos en el análisis de varianza del mismo parámetro respecto a las velocidades de salida del bastidor 6. Aquí, a medida que las velocidades aumentan (y disminuyen los espesores de salida) se obtiene un desgaste menor, en forma análoga, a medida que las velocidades disminuyen (y aumentan los espesores de salida) se obtiene un desgaste mayor (ver figura 54).

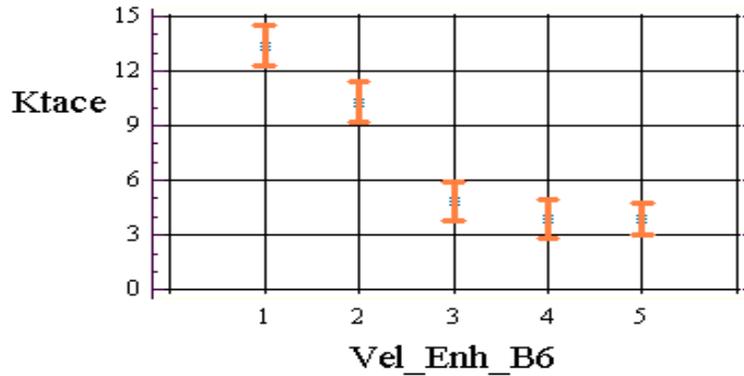


Figura 55. Análisis de varianza de K_{tace} respecto a la velocidad de enhebrado del bastidor 6

En los grupos 4 y 5, donde se encuentran los aceros laminados a mayores velocidades, el desgaste es muy similar y menor que en los otros grupos. Allí se encuentran además todas las muestras en las cuales se utilizó lubricación. Desde el grupo 1 y hasta el 3, ó, desde los aceros laminados desde las velocidades más bajas hasta los laminados a velocidades medias, la no utilización de lubricante y al mayor crecimiento de óxidos entre bastidores hacen que el desgaste sea mayor.

En base a lo anterior, y ya que entre todas las variables analizadas la velocidad de enhebrado del bastidor 6 fue la que permitió modelar más fácilmente el comportamiento del parámetro K_{tace} se decidió implementar, dicho factor mediante una función que dependiera de la misma.

$$K_{tace} = -1,42212 + \frac{30,9142}{Vel_Enh_B6} \quad (24)$$

Con esto, y a partir de la ecuación original (ecuación 6), la nueva fórmula de cálculo de desgaste quedó definida como

$$\Delta D_j = K_g \frac{2}{\pi} \frac{\left(-1,4221 + \frac{30,9142}{Vel_Enh_B6} \right)}{H_{jh} Diam_{jh}} \sum_{i=1}^{N_j} \frac{F_{ij} L_{ij}}{W_{ij}} \quad (25)$$

En la figura 53 se observa la curva del modelo desarrollado a través de la muestra, permitiendo

que esta se encuentre en un límite de confianza de hasta 95%. La semejanza entre la muestra y la predicción del modelo se observa en la figura 51.

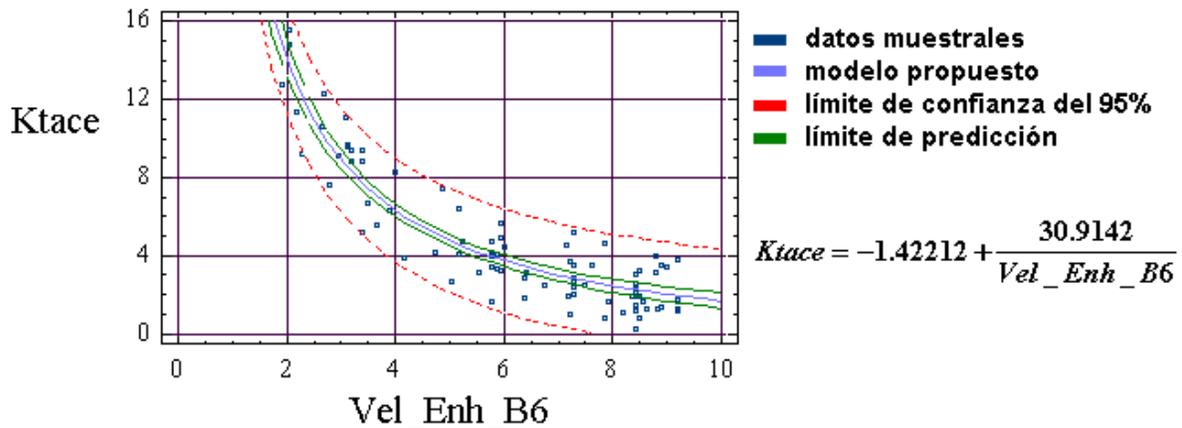


Figura 56. Modelo de K_{tace} respecto a la velocidad de enhebrado del bastidor 6.

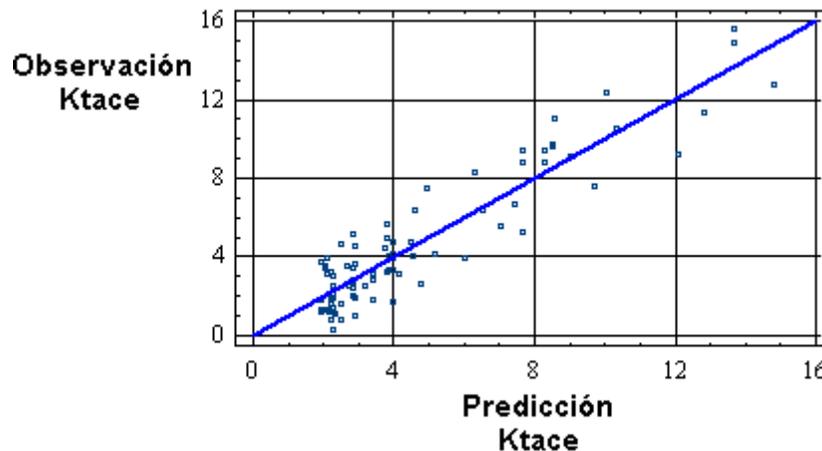


Figura 57. Comparación de datos observados y predichos por el modelo de velocidad

Habiendo implementado el uso del lubricante en el modelo mediante el factor K_{aceite} , y ya que en el laminador en caliente de SIDOR solo se utiliza lubricación hasta un cierto rango de espesores finos (y por tanto de velocidades), no hubo manera de estudiar al mismo tiempo el efecto sobre el desgaste del cilindro del lubricante y la velocidad. El modelo dependiente de la

velocidad es válido entonces para velocidades de enhebrado menores al promedio de 7.9405 m/s y lubricación nula, y velocidades de enhebrado mayores ó iguales al promedio de 7.9405 m/s y lubricación en los cuatro bastidores que la utilizan. De esta forma hubo que reacomodar el modelo de cálculo del parámetro K_{tace} de la forma:

$$K_{tace} = \begin{cases} \text{Si } Vel_Enh_B6 \leq 7,9405\text{m/s} & \begin{cases} \left(1 - 0,3278 \left(1 - \frac{BL}{4}\right)\right) \left(-1,42212 + \frac{30,9142}{Vel_Enh_B6}\right) & \text{Si } BL \geq 1 \\ -1,42212 + \frac{30,9142}{Vel_Enh_B6} & \text{Si } BL = 0 \end{cases} \\ \text{Si } Vel_Enh_B6 > 7,9405\text{m/s} & \begin{cases} \left(1 + 0,3278 \left(1 - \frac{BL}{4}\right)\right) \left(-1,42212 + \frac{30,9142}{Vel_Enh_B6}\right) & \text{Si } BL < 3 \\ -1,42212 + \frac{30,9142}{Vel_Enh_B6} & \text{Si } BL = 4 \end{cases} \end{cases} \quad (26)$$

donde,

- BL es el número de bastidores donde se utiliza lubricación.

Este modelo refleja valores de K_{tace} comunes a los que originalmente se encuentran en base de datos desde velocidades de enhebrado de 5 m/s, y a velocidades menores un rango de K_{tace} nunca utilizado por el modelo.

Una vez implementado el modelo, los resultados de las líneas 19 a la 23 del programa 01-012 del mes de enero de 2005 (ver tabla 11), hicieron ver que para velocidades de enhebrado bajas se sobreestimó el desgaste produciendo desviaciones negativas de espesor. Entonces, se tomó la decisión de modificar la curva de cálculo del parámetro K_{tace} por velocidad de enhebrado y también reducir el coeficiente de filtrado por espesor de primera de cambio próxima (PS en la ecuación 7) para espesores mayores a 9 mm. (ver tabla 12).

Así, se modificó y probó de inmediato en modo experimental con una curva que redujera la magnitud de K_{tace} calculada a través de la velocidad de enhebrado, sobretodo en el dominio de las velocidades bajas, pero siguiendo el mismo tipo de comportamiento obtenido para la curva original (ecuación 27).



$$K_{tace} = -0,3000 + \frac{15,9142}{Vel_Enh_B6} \quad (27)$$

Linea	Tabla	Esp. Laminado (mm)	Desv. Modelo Adap. II (μ m)
1	4471	4.00	-59
2	1607	3.00	95
3	2838	2.75	57
4	1219	4.00	-69
5	1055	4.00	-41
6	4326	4.00	-30
7	3563	5.00	-127
8	1601	4.50	-20
9	847	4.89	133
10	1569	5.87	141
11	4575	7.73	-1
12	1755	6.00	60
13	4618	7.15	261
14	4651	9.53	418
15	3647	6.70	-54
16	752	7.65	-144
17	595	6.13	108
18	752	7.73	-38
19	4061	7.73	-407
20	4119	9.85	-246
21	4442	11.00	-311
22	4827	11.00	-450
23	4119	9.85	-318
24	598	6.60	76
25	985	5.30	-62

Tabla 12. Resultados del modelo de velocidad en el programa 01-012

Solo fueron modificados los valores del coeficiente *PS* en los espesores citados porque en

espesores menores no se observaron mayores inconvenientes.

Esesor (mm)	Coficiente anterior	Coficiente nuevo
9000	0.70	0.65
10500	0.80	0.65
12500	1.00	0.80
13000	1.00	0.80

Tabla 13. Modificación de coeficientes de filtrado por espesor de primera de cambio próxima.

Con la nueva función dependiente de la velocidad sustituida en la función general (ver ecuación 28), se disminuyó fuertemente la magnitud de K_{tace} desde las bajas velocidades hasta lograr un menor efecto de reducción en las altas velocidades (Figura 57).

$$K_{tace} = \begin{cases} \text{Si } Vel_Enh_B6 \leq 7,9405 \text{ m/s} & \begin{cases} \left(\left(1 - 0,3278 \left(1 - \frac{BL}{4} \right) \right) \right) \left(-0,3000 + \frac{15,9142}{Vel_Enh_B6} \right) & \text{Si } BL \geq 1 \\ -0,3000 + \frac{15,9142}{Vel_Enh_B6} & \text{Si } BL = 0 \end{cases} \\ \text{Si } Vel_Enh_B6 > 7,9405 \text{ m/s} & \begin{cases} \left(\left(1 + 0,3278 \left(1 - \frac{BL}{4} \right) \right) \right) \left(-0,3000 + \frac{15,9142}{Vel_Enh_B6} \right) & \text{Si } BL < 3 \\ -0,3000 + \frac{15,9142}{Vel_Enh_B6} & \text{Si } BL = 4 \end{cases} \end{cases} \quad (28)$$

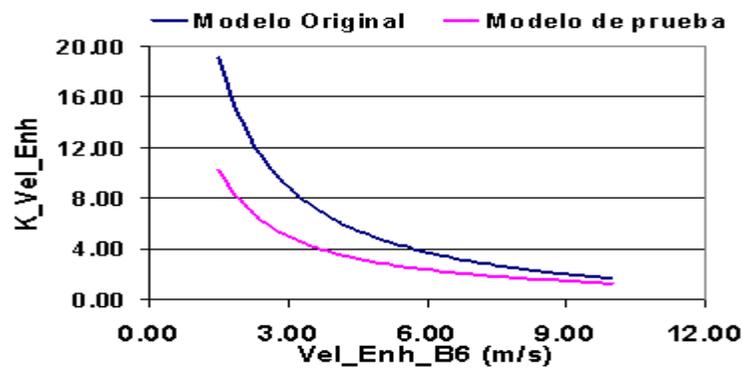


Figura 58. Curva de los modelos de velocidad original y de prueba. El modelo de prueba permitió reducir los efectos del modelo original.



Los buenos resultados obtenidos a través de la implementación de la curva experimental y que se reflejan en el resultado obtenido desde su implementación y en el acumulado a través del mes de enero de 2005 originaron que ésta permaneciera finalmente en el modelo.

Resultados obtenidos para el análisis de los objetivos planteados.

A través del modelo de predicción de desgaste propuesto y de la estrategia de verificación y corrección del modelo ante líneas de muchas piezas, se logró disminuir el número de demoras por calibración de husillos (ver figura 58) y por ende el tiempo acumulado de las mismas (ver figura 59).

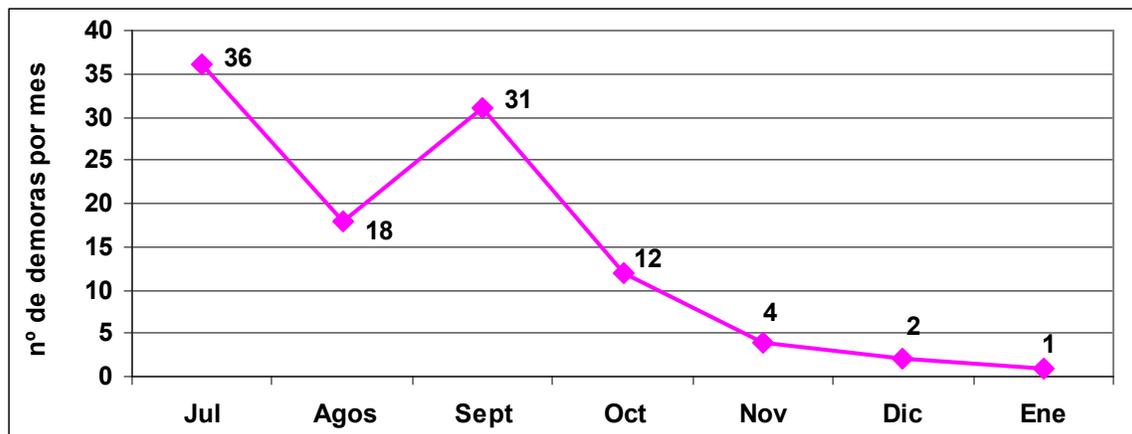


Figura 59. Evolución del número de demoras de producción por calibración de husillos.

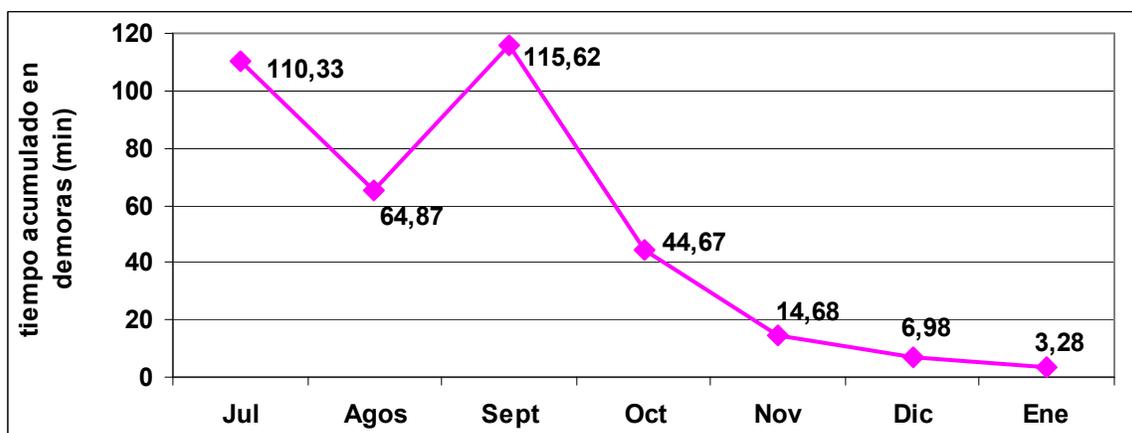


Figura 60. Evolución del tiempo acumulado en demoras de producción por calibración de husillos.

En el caso del conteo de demoras, al comparar el promedio de demoras de los meses de julio, agosto y septiembre, en los cuales no se realizaron implementaciones, con el de los meses de

octubre, noviembre y diciembre de 2004 y enero de 2005, el primero de éstos es al menos 5 veces mayor (ver figura 60), lo cual es bastante significativo para el proceso.

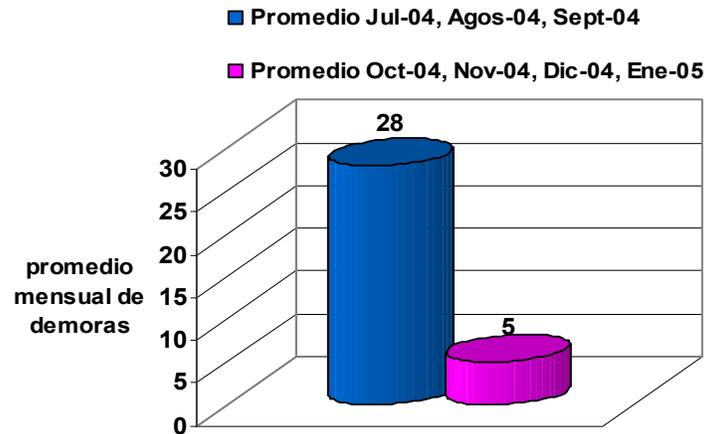


Figura 61. Comparación del promedio de número de demoras mensuales durante los períodos sin y con implementaciones.

De igual forma el tiempo acumulado en demoras se redujo en la misma proporción que el número de las mismas al comparar los promedios de demoras mensuales de los períodos propuestos (ver figura 61).

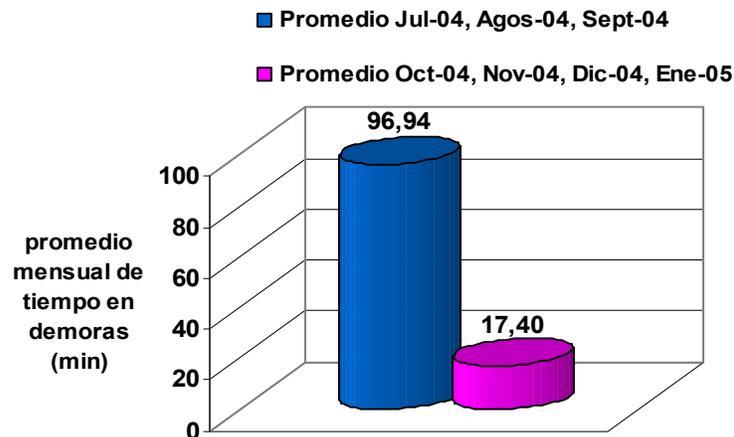


Figura 62. Comparación del promedio de tiempo por demoras mensuales durante los períodos sin y con implementaciones.

La importancia de los tiempos reducidos se traduce en aumento de tiempo de disponibilidad de la línea de producción, y esto significa que por cada demora evitada se gana la producción de aproximadamente dos bobinas, si se considera que la demora dura poco menos de cuatro minutos en promedio y que por el tren continuo puede pasar una bobina cada dos minutos en promedio.

Así, si se saca la diferencia del número promedio de demoras durante el período de no implementaciones (28 demoras), con las demoras ocurridas durante cada uno de los meses de implementaciones, el número potencial de bobinas rescatadas es importante (ver tabla 13).

Mes	Demoras por mes	Demoras evitadas	Bobinas rescatadas
Octubre	12	$28 - 12 = 16$	$16 * 2 = 32$
Noviembre	4	$28 - 4 = 24$	$24 * 2 = 48$
Diciembre	2	$28 - 2 = 26$	$26 * 2 = 52$
Enero	1	$28 - 1 = 27$	$27 * 2 = 54$

Tabla 14. Aproximación del número de demoras evitadas y el número de bobinas rescatadas

Sabiendo que el peso de las bobinas producidas se encuentra entre 5 y 21 toneladas, y que el valor de una tonelada de acero se encuentra por encima de los 300 dólares, se podría asumir que las bobinas rescatadas son de peso mínimo, y al sacar las cuentas del dinero recuperado se observa más fácilmente la magnitud de los resultados (ver tabla 14).

Mes	Bobinas rescatadas	Toneladas rescatadas	Dinero rescatado \$
Octubre	32	$32 * 5 = 160$	48000
Noviembre	48	$48 * 5 = 240$	72000
Diciembre	52	$52 * 5 = 260$	78000
Enero	54	$54 * 5 = 270$	81000

Tabla 15. Aproximación de la pérdida de dinero evitada

El otro logro alcanzado está relacionado al cumplimiento del segundo objetivo planteado. Sabiendo que las fallas en el modelo de desgaste son una de las causas por las cuales se puede incumplir con la especificación de espesor en bandas del tipo primera de cambio, los ajustes del modelo propuesto apuntaron hacia la disminución de tal incidencia.

Tal fue el efecto, que durante los 2 últimos meses de implementaciones se logró disminuir el porcentaje de primeras de cambio con defecto de espesor por debajo del 4% mensual (ver figura 62), el porcentaje más bajo desde la implementación del modelo de desgaste de cilindros.

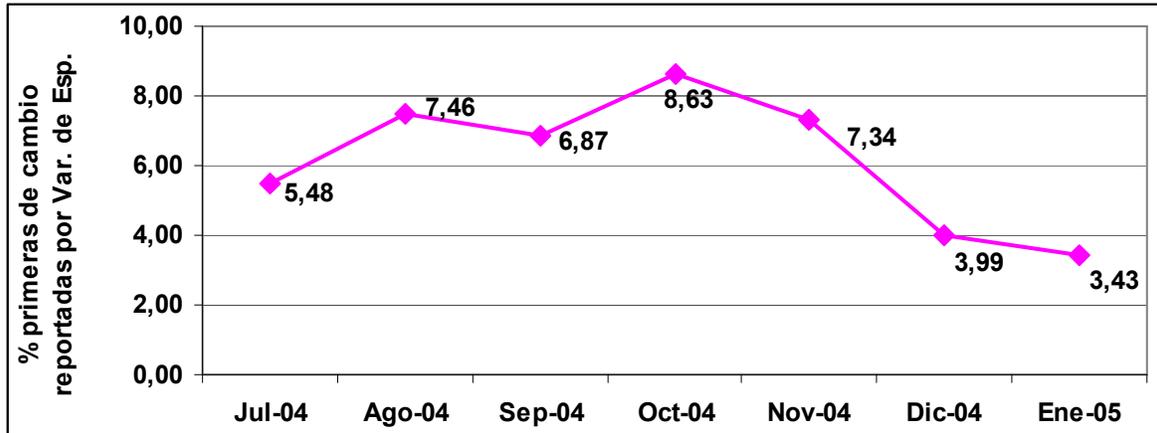


Figura 63. Evolución de bobinas primeras de cambio reportadas por variación de espesor

Finalmente, al porcentaje de bobinas con defecto de espesor causado a fallas en el modelo de desgaste, tuvo un comportamiento creciente durante los dos primeros meses de implementaciones. Sin embargo, después de la cresta del mes de noviembre, la tendencia fue decreciente hasta el mes de enero, reflejando que los ajustes finales tuvieron gran peso en la optimización del modelo (ver figura 63).

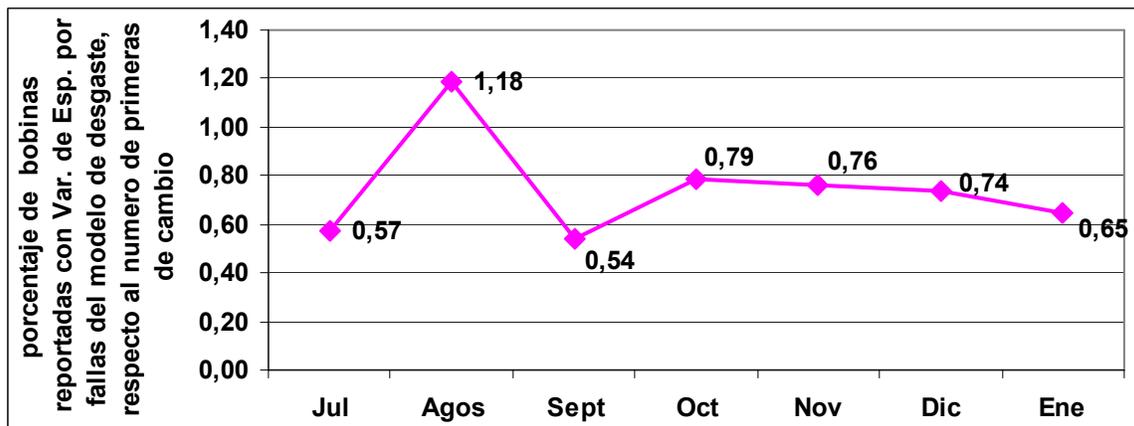


Figura 64. Evolución del porcentaje de bobinas reportadas por variación de espesor debido a fallas del modelo de desgaste, respecto al número de primeras de cambio.

Conclusiones

1.- Con el desarrollo e implementaciones realizadas para el ajuste del modelo de desgaste de cilindros del laminador en caliente de SIDOR se logró reducir:

1.1.- El número de demoras desde un promedio mensual de 28 demoras a un promedio mensual de 5, teniendo un mínimo de 1 demora.

1.2.- El porcentaje de bandas del tipo primera de cambio con defecto de espesor hasta un 3,43 % mensual durante el mes de enero de 2005, el más bajo desde la implementación del modelo de desgaste de cilindros.

2.- Para la obtención de los resultados propuestos en el punto 1 se desarrollaron 6 experiencias de las cuales se extrajo información de importancia para el ajuste del modelo, y además, se desarrolló una estrategia de corrección del modelo para las líneas (lotes) de muchas piezas en las cuales el modelo tendía a subestimar el desgaste. De esto, se concluye que:

2.1.- Respecto al parámetro K_{tace} : No se debe considerar invariante en cada tipo de acero ante diferentes condiciones características del proceso, como son la velocidad, el kilometraje de banda laminado por un mismo cilindros durante un programa de laminación y la química real de cada pieza.

2.2.- Evaluación del efecto térmico sobre el desgaste de cilindros: No es adecuado un modelo de desgaste de cilindros basado en el efecto puntual de la temperatura de cada banda, ya que los efectos de fatiga térmica y agrietamiento térmico no son inmediatos sino son el resultado de un proceso de esfuerzos que se van acumulando en el cilindro hasta sobrepasar sus propiedades físicas.

2.3.- Esquema de adaptación implementado: Con éste se demostró las bondades que pueden generar los algoritmos de naturaleza empírica, haciendo que sean una alternativa válida aún en problemas complejos como la estimación del desgaste de cilindros.

2.4.- Análisis de las variables silicio, carbono y manganeso (de la composición química del acero) para estudiar su efecto sobre los óxidos de hierro formados sobre la banda: El resultado de mayor validez encontrado, lo representa el análisis de la



composición de silicio ante la magnitud del parámetro K_{tace} , con el cual se avalan algunos resultados [2] [15] en los que se propone que las mayores proporciones de silicio son un agente que impide la remoción de óxido sobre el acero, lo cual genera mayor desgaste de los cilindros.

2.5.- Análisis del uso de lubricantes y su efecto sobre el desgaste de los cilindros: El uso de lubricación en los bastidores reduce el desgaste de los cilindros en los productos en los cuales se utiliza la lubricación, que son los que tienen alta exigencia superficial y/o en los cuales se requiere disminuir fuerzas. Debe tener un efecto diferente en aceros laminados a distintas velocidades, lo cual no se puede determinar ya que no es económicamente rentable para la empresa su uso en todos los productos.

2.6.- Análisis por kilometraje laminado durante un programa de laminación y su efecto sobre el desgaste del cilindro: El kilometraje laminado durante un programa de laminación, que puede ser una buena medida del desgaste abrasivo en los cilindros de laminación, permite distinguir entre 2 y 3 zonas de intensidad de desgaste. Una primera zona de alto desgaste al comienzo de la jornada de laminación y luego una zona de bajo desgaste que podría estar seguida de una tercera zona de repunte del desgaste.

2.7.- Análisis por velocidades de enhebrado: Se encontró que el parámetro K_{tace} (y en consecuencia el desgaste de los cilindros) tiene una relación inversa con la velocidad de la banda durante el proceso de laminación. Ya que en el tren continuo de laminación se emplean diferentes velocidades de laminación según el producto a obtener, estas deben influir en la cantidad de cascarilla presente sobre la banda mientras el acero es laminado. Las bajas velocidades de laminación deben incidir en el recrecimiento de los óxidos de hierro sobre cada sección transversal de la banda mientras se produce el traslado entre bastidores. Las altas velocidades, aunque no evitan el crecimiento de los óxidos, deben contribuir a que estos no se reproduzcan excesivamente sobre el acero, disminuyendo el efecto abrasivo sobre la superficie del cilindro. Estos resultados coinciden con los presentados por otros autores [16].

3.- El modelo de desgaste de cilindros es fuertemente no lineal

3.1.- Suponiendo que se laminara siempre el mismo tipo de acero y bajo condiciones de proceso similares, el desgaste es lineal hasta el momento en que hace mella el efecto

acumulativo de la temperatura porque de ahí en adelante el desprendimiento de material se potencia producto de lo blando que se torna el cilindro ante las partículas abrasivas, y las grietas térmicas y las fracturas térmicas más cercanas a la superficie del cilindro que facilitan el trabajo de estas partículas. Este fenómeno explica que en líneas de muchas piezas (30 o más) sea evidente el cierre no lineal de husillos producto del desgaste del cilindro.

3.2.- Los cambios de espesor a lo largo de un programa, representan cambios de velocidad de laminación y por tanto de fricción entre banda y cilindro. Los cambios en el tipo de acero representan cambios en la composición química y por tanto de variación en el contenido de aquellos elementos que contribuyan o no al desgaste de los cilindros. En estos dos últimos casos si es correcto decir que una banda desgasta más que otra, de distinta velocidad y composición química, al cilindro de laminación.

Recomendaciones

- 1.- Utilizar el modelo de desgaste con los algoritmos de adaptación desarrollados, ya que se demuestra una mejora sustancial tanto en demoras por calibración y mejoras en calidad.
- 2.- Los algoritmos de adaptación desarrollados, a pesar de estar basados en estrategias no tradicionales, pueden servir como base de futuros ajustes del modelo, ya que su naturaleza está directamente asociada a las limitaciones de muestreo y actuación del modelo.
- 3.- En caso de querer incorporar un modelo físico de desgaste dependiente de la temperatura, se debería tomar en cuenta los tiempos de trabajo y descanso del cilindro, la conductividad de los cilindros, el proceso de transferencia de calor entre cilindro y banda y el sistema de enfriamiento de los cilindros.
- 4.- Debido a la naturaleza empírica y no lineal del modelo de desgaste implementado, se recomienda su evaluación y mantenimiento con regularidad, para garantizar su acierto en la corrección.

Referencias Bibliográficas

1. Lozano, Luis. "Lubricación en la laminación" , *Curso de laminación plana de metales*, 2001, Sidor C.A, Puerto Ordaz , pp. 169-189.
2. Ramírez-Cuellar Jorge; LeDuc-Lezama, Luis; Cols, Rafael; Guerrero Mata, Martha Mecanismos de formación de óxido en un horno túnel durante a laminación en caliente en una planta compacta de productos planos, Hylsa S.A, San Nicolás de los Garza.
3. Lozano, Luis; Lara, José; Prado, Olga, Development of an on-line Mathematical Model for the setup of the finish mill in hot rolling mill of sidor C. A. "40° Seminario de laminación", Vitoria, ES, Brasil, 2001. pp 112 -117.
4. Reeve, P. J; MacAlister, A. F; Bilkhu, T. S. Control, automation and the hot rolling of steel. ALSTOM Drives & Controls Ltd, The royal society, U.K, 1999.
5. Breyer, J. P; Skoczynski, R. J; Walmag, G. Improvement of the Work Roll Performance on the 2,050 mm Hot Strip Mill at Iscor Vanderbijlpark. "SARUC conference", 2000.
6. Fukagawa, Tomoki; Okada, Hikawa; Maehara, Yasuhiro. Mechanism of Red Scale Defect Formation in Si-Added Hot-Rolled Steel Sheets. ISIJ International, Vol. 34 (1994). No.11.
7. Olivares, Ana. *Implementación del modelo de corrección por desgaste de los cilindros de trabajo en el tren continuo de laminación en caliente de SIDOR*, tesis de pregrado (inérita) Universidad Nacional Experimental Politécnica, Puerto Ordaz, 2003.
8. Lubricación (XXIII) *Curso sobre tecnología de la laminación*, 2000, Sidor C.A Puerto Ordaz, pp 451-493.
9. Zhimin, Xi; Anrui, He; Quan, Yan; Xiaoxia, Lai; Haodong, Huang; Lin, Zhao. Roll wear on finishing trains of ASP1700 hot strip mills. "Journal of University of Science and Technology of Beijing", Volume 11, Number 1, 2004, página 94.
10. Tahir, Mohammed. *Some aspects on lubrication and roll wear in rolling mills*, tesis doctoral, Division of materials forming. Department of production engineering. Royal Institute of technology, KTH.
11. Rabinomicz, Ernest. *Friction and wear of materials*. Department of mechanical engineering. Massachussets, Institute of technology. John Wiley & Sons 1970.
12. Hondros, E. D. *Tribology*. National Physical laboratory. Mills & Boon Limited. 1971.
13. Johnson, T. W; Sturgeon, G. M. Roll wear in the finishing stands of high speed hot section mills. *Tribology in iron and steels works*, The iron and steel institute, London, 1970.
14. Lansdown, A. R; Price, A. L. *Materials to resist wear. A guide to their selection and use*. Pergamon Press.
15. Dos Santos, Antonio Anel; Giacomim, Cristovao Nery; De Andrade Filho, Geraldo Martins. Formacao da carepa en placas de aco durante o processo de reaquescimento. "XXXVII Seminario de Laminacao – procesos e productos laminados e revestidos da ABM", Curitiba, 2000.



16. Chen, R. Y; Yuen, W. Y. D; Mak, T. Oxide scale growth and its pickling characteristics of hot rolled steel strip. "43^a MWSP Conference. Vol. XXXIX", 2001. página 292.