



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

**DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO PARA
RODAMIENTOS DE CAJAS LAMINADORAS DE HIERRO CORRUGADO Y
ALAMBRÓN, PARA UNA EMPRESA PRODUCTORA DE ACERO DE CONSTRUCCIÓN**

Wálter Estuardo Pérez Ramos

Asesorado por el Msc. Ing. Hugo Leonel Ramírez Ortiz

Guatemala, junio de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO PARA
RODAMIENTOS DE CAJAS LAMINADORAS DE HIERRO CORRUGADO Y
ALAMBRÓN, PARA UNA EMPRESA PRODUCTORA DE ACERO DE CONSTRUCCIÓN**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

WÁLTER ESTUARDO PÉREZ RAMOS
ASESORADO POR EL MSC. ING. HUGO LEONEL RAMÍREZ ORTIZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, JUNIO DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Carlos Enrique Chicol Cabrera
EXAMINADOR	Ing. Gilberto Enrique Morales Baiza
EXAMINADOR	Ing. Osmar Omar Rodas Mazariegos
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO PARA
RODAMIENTOS DE CAJAS LAMINADORAS DE HIERRO CORRUGADO Y
ALAMBRÓN, PARA UNA EMPRESA PRODUCTORA DE ACERO DE CONSTRUCCIÓN**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 20 de noviembre de 2013.

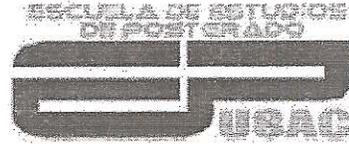


Wálter Estuardo Pérez Ramos



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Teléfono 2418-9142 / Ext. 86226



AGS-MIMPP-0003-2014

Guatemala, 23 de abril de 2014.

Director
Julio César Campos Paiz
Escuela de Ingeniería Mecánica
Presente.

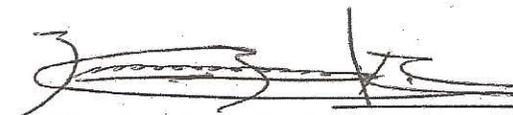
Estimado Director:

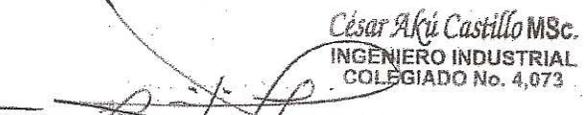
Reciba un atento y cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación del estudiante **Walter Estuardo Pérez Ramos** carné número **1999-11083**, quien optó la modalidad del **"PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO"**. Previo a culminar sus estudios en la **Maestría de Ingeniería en Mantenimiento**

Y si habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Actá 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

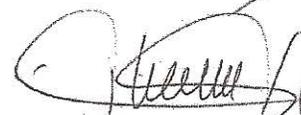
Sin otro particular, atentamente,

"Id y enseñad a todos"


MSc. Ing. Hugo Leonel Ramírez Ortiz
Asesor(a)


MSc. Ing. César Augusto Akú Castillo
Coordinador de Área
Gestión y Servicios

Ing. Hugo Ramírez
COL. No. 5545


Dra. Mayra Virginia Castillo Montes
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado



Cc: archivo
/la



USAC

TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.El.Mecánica 116.2014
Guatemala 3 de junio de 2014

Ingeniero
Hugo Humberto Rivera Pérez
Secretario Académico
Facultad de Ingeniería

Ingeniero Rivera:

De manera atenta le informo que el estudiante de la carrera de Ingeniería Mecánica, **Wálter Estuardo Pérez Ramos**, carnet No. **19911083**, ha cumplido con el proceso de graduación de Licenciatura, mediante la modalidad de "Estudio de Postgrado", presentando a esta dirección su trabajo de graduación titulado **DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO PARA RODAMIENTOS DE CAJAS LAMINADORAS DE HIERRO CORRUGADO Y ALAMBRÓN, PARA UNA EMPRESA PRODUCTORA DE ACERO DE CONSTRUCCIÓN**, asesorado por el Msc. Ing Hugo Leonel Ramírez Ortíz y aprobado para la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado.


MA Ing. Julio César Campos Paiz
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Mecánica

MA Ing. Julio César Campos Paiz
DIRECTOR
Esc. Ingeniería Mecánica

c.c Archivo
JC/mjm



DTG. 267.2014

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO PARA RODAMIENTOS DE CAJAS LAMINADORAS DE HIERRO CORRUGADO Y ALAMBRÓN, PARA UNA EMPRESA PRODUCTORA DE ACERO DE CONSTRUCCIÓN**, presentado por el estudiante universitario **Walter Estuardo Pérez Ramos**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympo Paiz Reinos
Decano

Guatemala, 5 de junio de 2014

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por ser mi Señor y Salvador, fuente de vida y sabiduría para lograr este éxito, por acompañarme día tras día en mi camino y llegar a este momento de victoria, la cual es tuya mi amado Jesús.

Mi padre

Eberto Andrés Pérez, por hacerme un hombre de bien lleno de principios, valores y enseñarme que con la dedicación alcanzamos nuestras metas. Te amo papá.

Mi madre

Alicia Ramos de Pérez, por ser una mujer dedicada al cuidado de su familia y de inculcar que el camino correcto es Dios, gracias por tu amor incondicional, te amo mamá.

Mi esposa

Nancy Palma de Pérez, por ser la mujer más sabia y bella, desde que Dios nos permitió estar juntos mi vida ha sido totalmente bendecida y llena de amor, gracias por ser mi apoyo en la vida y ayudarme para alcanzar esta meta, una de muchas que caminaremos juntos. Mi vida la dedico a amarte.

Mi hijo

Gabriel André, por ser mi fuente de inspiración, motivo y razón de luchar en cada momento, con tu ternura e inocencia me das las fuerzas para ser un mejor hombre y padre, te amo.

**Mi abuela
(q.e.p.d.)**

María Pérez Luttmann, por haber sido como una segunda madre que cuidó y amó incondicionalmente. ¡Que Dios la tenga en su gloria!

Mis hermanos

Otto, Byron, Xiomara y Carolina Pérez, por apoyarme en todas las áreas de mi vida, en ustedes he encontrado consejos y regaños que me han permitido ser mejor cada día.

Wendy de Pérez

Por ser mi nueva hermana que Dios me ha regalado, llegar a la familia y agregarle un valor importante.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por poner tus ojos en mi vida, brindarme la sabiduría para lograr este triunfo y ser mi guía en este caminar.
Mis padres	Por su apoyo y ayuda, este triunfo es de ustedes que siempre creyeron en mí.
Mi esposa e hijo	Por estar a mi lado dándome su amor y apoyo para lograr llegar a la meta.
Mis hermanos	Por estar apoyándome y brindarme confianza.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por darme la oportunidad de formarme como profesional cumpliendo con uno de mis sueños, sintiéndome orgulloso de pertenecer a la familia de sancarlistas.
Facultad de Ingeniería	Por darme el privilegio de ser parte de esta honorable y gloriosa facultad.
Mis catedráticos	Por compartir todo su conocimiento.
Msc. Ing. Hugo Ramírez	Por ser mi asesor y darme su atenta ayuda y colaboración para el desarrollo de este trabajo.

Mis compañeros de trabajo

Por compartir su experiencia.

Mis amigos

Eddy García, José Luis Argueta, Alejandro Fonseca, Elmer Flores, Raúl Paz, Claudia Higueros, Alex Calderón, Estuardo Donado, Giovanni Castellanos, Suly Yos, Michelle Chávez, Alejandro Villatoro, Julio Meza, Leslye Armida, Herbert Monzón, Adolfo Soberanis y Alejandro Brañas, por su valiosa amistad.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
1. ANTECEDENTES	01
2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	05
3. JUSTIFICACIÓN	07
4. OBJETIVOS	09
5. ALCANCES	11
6. HIPÓTESIS	13
7. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	15
7.1. Proceso de laminado	15
7.1.1. Laminación	15
7.1.2. Palanquilla	15
7.1.3. Tren de laminación	16
7.1.4. Potencia requerida.....	19
7.1.5. Enfriamiento y corte.....	20

7.2.	Cilindros de laminación	22
7.2.1.	Fabricación de cilindros.....	23
7.2.2.	Dureza de los cilindros	26
7.3.	Rotura de origen térmico.....	28
7.4.	Rotura de torsión de cuellos de cilindros accionados	30
7.5.	Rodamientos para laminadores	31
7.5.1.	Condiciones para el diseño	31
7.5.2.	Rodamientos de rodillos cilíndricos	33
7.5.3.	Cálculo de las cargas sobre los rodamientos.....	34
7.6.	Ampuestas autoalineables	35
7.7.	Rodillos perfilados	36
7.8.	Ampuestas rígidas	38
7.9.	Averías de rodamientos (daños de gran superficie).....	42
7.10.	Aseguramiento de rodamientos averiados	45
7.10.1.	Determinación de los datos de servicio.....	46
7.10.2.	Toma de muestras de lubricante y valoración de las mismas	47
7.10.3.	Lubricación por grasa	47
7.10.4.	Desmontaje del rodamiento averiado.....	47
7.11.	Evidencias de fallos en planta productora de acero.....	50
7.12.	Mantenimiento predictivo	54
7.13.	Metodología de las inspecciones	55
7.14.	Técnicas aplicadas al mantenimiento predictivo	56
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS	61
9.	METODOLOGÍA	65
10.	ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	69

11.	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	71
12.	RECURSOS FÍSICOS Y FINANCIEROS.....	73
13.	BIBLIOGRAFÍA	75

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Proceso de conformación mecánica en caliente	16
2.	Efecto de las fuerzas de rozamiento sobre el cambio de espesor de la palanquilla	17
3.	Fuerza perpendicular del rodillo sobre el arco de contacto	18
4.	Esquema del proceso de transformación de la palanquilla mediante la laminación	20
5.	Historia térmica de la palanquilla en la carga convencional, la carga caliente y la laminación directa.....	22
6.	Distribución de la dureza en la superficie de un cilindro de trabajo alto en cromo para laminación en caliente (\varnothing 759 x 2 235 mm, promedio de dureza: $555,5 \pm 30,5$ HV).....	27
7.	Distribución de la dureza en la superficie de un cilindro de trabajo alto en cromo para laminación en caliente (\varnothing 850 x 2 300 mm, promedio de dureza: $549,5 \pm 46,2$ HV).....	28
8.	Rotura en el cilindro ranurado con fractura en la sección transversal de mayor tamaño	30
9.	Rotura de cuello en el extremo del par de accionamiento.....	30
10.	Espacio de montaje disponible	32
11.	Rodamiento de cuatro hileras de rodillos cilíndricos perforados y jaula de pasadores	34
12.	Ampuestas autoalineables	36
13.	Ampuestas autoalineable: rodillos de laminación con diferentes perfiles.....	37

14.	Ampuesa autoalineable: rodillos con idénticos perfiles	37
15.	Bastidor precargado.....	39
16.	Visualización de las presiones actuantes en el rodamiento de cuatro hileras de rodillos cilíndricos del rodillo de reenvío	41
17.	Distribución de cargas dentro del rodamiento de cuatro hileras de rodillos cónicos del rodillo de trabajo	41
18.	Tiempo de servicio vs. temperatura	45
19.	Tiempo de servicio y el aumento de la temperatura	45
20.	Fallo en lubricación de rodamiento (a)	50
21.	Fallo en lubricación de rodamiento (b)	51
22.	Fisura en el aro transversal en el aro exterior del rodamiento	52
23.	Fragmento del aro exterior de un rodamiento con deterioro	52
24.	Fractura transversal en el aro interior de un rodamiento.....	53
25.	Curva tiempo para la falla	54
26.	Registro de vibraciones en un ciclo de trabajo en función del tiempo	57
27.	Transformada tiempo-frecuencia	58
28.	Cronograma de actividades	71

TABLAS

I.	Materiales utilizados en cilindros de trenes de laminación	24
II.	Daños posibles a rodamientos.....	44
III.	Características de los rodamientos y fallos.....	48
IV.	Presupuesto del proyecto	73
V.	Costo de equipo para los ensayos no destructivos.....	74

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
w	Ancho de palanquilla
C	Carbón
P_w	Carga del rodillo laminador
Cr	Cromo
Ø	Diámetro
HV	Dimensiones de dureza
Y_F	Esfuerzo de fluencia promedio de la palanquilla en el espacio de laminación
F	Fuerza generada por el rodillo
F_r	Fuerza resultante a los rodamientos
H_z	Hertz
H_o	Hipótesis nula

L	Longitud de contacto entre el rodillo y la palanquilla
M_n	Manganesio
μ	Media poblacional
M_o	Molibdeno
N_i	Níquel
n	Número de la muestra
H₀	Posición de caja laminadora
V₆	Posición de caja laminadora
P	Potencia
S_i	Silicio
σ	Varianza
N	Velocidad de giro del rodillo

GLOSARIO

Alambrón	Producto final del proceso de laminado, materia prima para elaborar clavos y cualquier tipo de alambre.
Ampuesa	Rodamiento.
Análisis termográfico	Técnica que estudia el comportamiento del equipo a través de la temperatura.
Análisis ultrasonido	Técnica que estudia los equipos por medio de las ondas de sonido de alta frecuencia producidas por las máquinas.
Análisis de vibraciones	Técnica que estudia el funcionamiento de las máquinas rotativas a través del comportamiento de la vibración.
Calamina	Capa de óxido en la superficie del metal.
Carga en caliente	Cuando la palanquilla ingresa al horno de recalentamiento por encima de los 500 °C, luego del proceso de la acería.

Cilindro de laminación	Herramientas que se ven sometidas a todo tipo de esfuerzos para lograr laminar.
Composición química	Conjunto de elementos de la tabla periódica para darle una propiedad específica al acero.
Dilatación	Aumento de longitud, superficie o volumen de un cuerpo por reparación de sus moléculas con disminución de su densidad.
Dúctil	Propiedad mecánica de los metales que admite grandes deformaciones mecánicas en frío sin llegar a romperse.
Dureza	Resistencia que opone un metal a ser rayado por otro metal.
Elasticidad	Propiedad general de los cuerpos sólidos, en virtud de la cual recobran más o menos su extensión y forma tan pronto como cesa la acción de la fuerza que la deformaba.
Fatiga	Pérdida de la resistencia mecánica de un material al ser sometido largamente a esfuerzos repetidos.
Fricción	Roce de dos cuerpos en contacto.
Husillo	Tornillo de hierro que se usa para el movimiento de las prensas u otras máquinas.

Laminado	Deformación volumétrica que disminuye el espesor inicial del material.
Lubricación	Acción y efecto de lubricar.
Mantenimiento predictivo	Es un sistema que utiliza técnicas para determinar el punto donde puede ocurrir una falla.
Metalografía	Estudio de la estructura, composición y propiedades de los metales y de sus aleaciones.
Microestructura	Estructura que forma parte de otra más amplia.
Palanquilla	Acero de bajo contenido de carbono, fabricado de la fundición de chatarra.
Perfiles	Barras metálicas obtenidas por laminación cuya sección transversal tiene diversas formas: cuadradas, redondas, rectangulares y triangulares.
Pirómetro	Instrumento para medir las temperaturas muy elevadas.
Tren laminador	Conjunto de maquinaria para realizar el proceso de laminado compuesto por: desbaste, intermedio y acabador.
VOSO	Técnicas que registra datos de los equipos a través del ver, oír, sentir y oler.

RESUMEN

En el presente trabajo se plantea para el taller mecánico de cajas y guías, de una empresa productora de acero para la construcción, la implementación de un sistema de mantenimiento predictivo y sus técnicas para los rodamientos de las cajas de laminación. El proceso sufre de interrupciones por fallo inesperado de los rodamientos de las cajas, la investigación se concentra en el cálculo de la vida útil de los rodamientos monitoreando las variables de trabajo y analizando la grasa utilizada para determinar si influye en los fallos del rodamiento, comparándola con otras grasas de diferentes propiedades mecánicas.

En primer lugar se presentan los rodamientos para laminación, como calcular las cargas de los mismos, la lubricación y tolerancias si están siendo tomadas en consideración como las prácticas de montaje y mantenimiento. A continuación se describen los cilindros de laminación, la forma de fabricarlos, sus propiedades, tratamientos térmicos y aplicaciones en el proceso de laminado. Se presentan también las fallas de rodamientos de cilindros de laminación, el comportamiento irregular de los rodamientos como: indicio de averías, aseguramiento de los rodamientos averiados y la inspección de rodamiento que falló, la forma de inspeccionar para encontrar la evidencia que garantice o de pista de la causa raíz.

Se introduce el mantenimiento predictivo, su definiciones, la organización, metodologías y técnicas que aplica para garantizar le prevención de fallo, y su implementación en los rodamientos de laminación, así como, la metodología

que utilizará para tener el control de la vida útil de todos los rodamientos de las cajas laminadoras.

INTRODUCCIÓN

En una empresa productora de hierro corrugado ubicada en el municipio de Masagua, departamento de Escuintla, específicamente en el taller de cilindros y guías cuya función principal es mantener los molinos laminadores en perfectas condiciones, se lamina varilla corrugada en (7,2, 7,8, 8,9, 9,3 milímetros hasta 1 3/8 pulgada) con medidas milimétricas y comerciales. El tren laminador consta de 19 molinos, cada uno formado de dos cilindros que reducen la sección del área de la palanquilla iniciando en una sección de 150 x 150 milímetros por 12 metros de largo.

Se presenta el problema que los rodamientos de carga radial y axial de los cilindros laminadores fallan, algunas veces provocando pérdida metálica y una interrupción no programada, perjudicando la producción perdiendo tiempo que ha sido planificando para producir y afectando el indicador de utilización de la planta.

En el capítulo uno se desarrollarán la funcionalidad de los rodamientos en las cajas de laminación como elemento mecánico que permite soportar grandes cargas puntuales, radiales y cargas axiales o la combinación de ambas en los rodillos laminadores a través de todo el ángulo de contacto, hay una distribución de fuerzas que los rodamientos permiten que giren con facilidad soportando las compensaciones de impacto de los cilindros cuando ingresa el material para ser laminado (los cristales principian a reformarse en el trabajo en caliente). Es importante contar con lubricación adecuada para las condiciones de trabajo para prevenir posibles fallas, así como, la manutención y montaje de los rodamientos.

En el capítulo dos se analizará la herramienta para el proceso, los cilindros de laminación que se utilizan para reducir la sección transversal del material, un factor importante es la clasificación de los cilindros según su proceso de fabricación, cuyo peso puede oscilar entre unos pocos kilogramos hasta las 250 toneladas. Durante la laminación, el área de contacto entre el cilindro y el metal sufre desgaste, mientras que las demás partes del cilindro (cuerpo y cuellos) deben ser consideradas como partes normales de componentes diseñados capaces de soportar elevadas cargas.

Los cilindros están expuestos a variados esfuerzos de flexión, desgaste y dilatación por efecto de la temperatura, las propiedades importantes de los cilindros son: resistencia a la rotura, al desgaste, a la formación de grietas de calor y a la formación de cascarillas de óxidos y, por último, buen acabado superficial. Para alcanzar las propiedades mecánicas se desarrollarán los tratamientos térmicos a que se exponen los cilindros.

La aplicación de los cilindros según las tres partes que conforman el tren laminador, así como el tipo de cilindro, cambia según las necesidades que se requiere en el proceso. La composición química y las propiedades mecánicas para que el tren sea eficiente, pueden variar según el tipo (cilindros de hierro fundido, de acero fundido y acero forjado) y según su fabricación (doble colada y centrifugados).

En el capítulo tres se describirá las fallas de los rodamientos en los cilindros, el comportamiento irregular en servicios reconociendo los daños subjetivos, en la superficie y los puntuales. También los aseguramientos de rodamientos usados, utilizando la toma de muestras de lubricantes para determinar la presencia de agentes externos, el dictamen visual del rodamiento

averiado y el control de las ovalidades de las chumaceras donde se asienta el rodamiento.

La valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado, recolectando las medidas preparatorias de los elementos mecánicos, características de la huella dejada por la rodadura, daños en la jaula, inspección de rodamiento por medio de mediciones geométricas y partes de los rodamientos. El control del estado del material puede dar el indicio de la posible falla al realizar la comprobación de los cálculos de las condiciones de carga.

En el capítulo cuatro ampliará la definición del mantenimiento predictivo que relaciona una variable física con el desgaste o estado de la máquina, se basa en la medición, seguimiento y monitoreo de parámetros y las condiciones operativas del equipo. La organización para el mantenimiento predictivo define la estructura de las personas involucradas tomando en cuenta las habilidades necesarias para la correcta aplicación del sistema. También se usa la metodología de las inspecciones vosaa para el monitoreo de las variables y encontrar alguna que cambie.

Las técnicas aplicadas al mantenimiento predictivo son de carácter no destructivo y se realizan con los equipos en operación, indicando el funcionamiento de los mismos. Entre ellas están las vibraciones, lubricantes (que determinan que componentes ajenos hay en el sistema de lubricación), ultrasonido (para ver la apariencia interna de las piezas para detectar fisuras internas) y termografía (que expone los puntos donde existe más calor generado por fricción entre metales donde aumenta la temperatura).

En el capítulo cinco se implementará el sistema de mantenimiento predictivo a los rodamientos de las cajas de laminación, se definirá que equipos deben incluirse en el monitoreo de condición, definiendo la criticidad de los equipos y el estado actual de la probabilidad de falla, se evaluará el costo del monitoreo versus el costo potencial de averías de producción y reparación.

También se van a seleccionar las variables a monitorear con ayuda de chequeos visuales a los equipos y los parámetros de trabajo, la realización de ensayos no destructivos que orientarán a la condición del equipo, los cuales indicarán el perfecto funcionamiento de los equipos o posibles fallas. Al no tener los parámetros por medio del fabricante se puede recolectar datos y definirlos por medio de la adquisición de los datos.

Los datos obtenidos orientarán sobre el estado en que se encuentran los equipos evaluándolos para lograr la planificación de las tareas que ayudarán a tener los equipos disponibles y confiables. En la planificación se generan los avisos y la toma de decisiones sobre los equipos cuando una variable se encuentra por fuera de los parámetros de operación o el resultado de un ensayo no destructivo que evidencia la probabilidad alta de un fallo, los cuales traerán consecuencias de acciones al mantener o reparar el equipo. Todo esto conlleva a tener un orden en la generación de órdenes de trabajo y retroalimentación de las mismas.

1. ANTECEDENTES

En los últimos años se han desarrollado técnicas para determinar la vida útil de los rodamientos por medio de ensayos no destructivos, cuidando las variables que son de importancia para mantener los rodamientos en condiciones permitiendo que alcance su vida programada por su fabricante, A. Royo, Rabanaque y Torres en el 2000, en su investigación de análisis de vibraciones e interpretación de datos, se enfocan en la importancia de contar con un sistema de mantenimiento preventivo que se puede adoptar en el cuidado de los rodamientos, y definen los pasos en “Detección: Reconocimiento del problema, Análisis: Localización de la causa del problema y Corrección: Encontrar el momento y forma de solucionar el problema.”

Determinar el momento justo antes que falle un equipo es el éxito de un sistema de mantenimiento y propósito fundamental del gerente de mantenimiento.

El rodamiento es un elemento mecánico que es parte fundamental de cualquier equipo rotatorio, F. Otero y J. Pardo en el 2010, en su investigación de detección de fallas en rodamientos de bolas a través de lógica difusa usando señales de vibración, se enfocan en que la industria crea planes de mantenimiento basados en la condición de utilizar herramientas propias del mismo, describen: “El monitoreo de la condición de equipos, utilizando el análisis de vibración como herramienta para el diagnóstico de fallas” y “Ayuda a la generación de una base de conocimiento en la línea de detección de fallas en rodamientos aplicando una de las ramas de la inteligencia artificial como lo

es la lógica difusa, puesto esta permite representar el conocimiento común que es mayoritariamente de tipo lingüístico cualitativo y no cuantitativo”.

El emplear el análisis de vibraciones como método del mantenimiento predictivo es una técnica utilizada con éxito desde hace mucho tiempo, Bojórquez D. Gilberto, Rivera M. José, Chacón M. Mario, Carillo R. Mariano en el 2006, en su investigación, Diseño de un sistema para análisis de las vibraciones mecánicas como método de mantenimiento predictivo en máquinas rotativas, describe: “Se han desarrollado una gran variedad de aplicación para este propósito, que consisten en sensores de vibraciones (acelerómetros) los cuales son colocados en varios puntos de la o las máquinas que se deseen monitorear, estos sensores o transductores se encargan de transformar las vibraciones en señales eléctricas”.

Una de las herramientas del mantenimiento predictivo más utilizadas por las organizaciones productivas porque les permite detectar problemas antes que se produzca una falla grave que interrumpa la producción, los autores W. Olarte, M. Botero y B. Cañón en el 2011, describen en su estudio de aplicación de la termografía en el mantenimiento predictivo, “la termografía puede descubrir fallas en los equipos antes de que éstas generen un paro imprevisto de la planta de producción lo cual implica desperdiciar mucho tiempo en reparación y grandes pérdidas económicas”, esto demuestra que esta herramienta ayuda a tener el equipo siempre en disposición para la producción, entregando un equipo confiable y eficiente.

Es importante conocer los diferentes fallos de rodamientos en la industria en general, los cuales se detallan en el trabajo realizado por Cristian Mondaca en su trabajo de graduación titulado: Estudio de fallas comunes en rodamientos rígidos de una hilera de bolas mediante el análisis en el dominio del tiempo y de

la frecuencia, presenta algunas fallos evidenciadas en la industria de Chile en el 2002, cita las siguientes: “factor de corrosión, el desbalance, alguna forma de pulsación o modulación de la amplitud, desalineamiento, la lubricación, el montaje”.

Para otros autores existe una distribución de factores que evitan que el rodamiento cumpla con su tiempo de vida, se dividen en: contaminación 14 %, problemas de lubricación 36 %, remplazo prematuro 34 % y maltrato 16 %.

La lubricación para los rodamientos es vital para garantizarles la vida útil y es un punto importante en el presente trabajo, en el estudio realizado el autor habla del lubricante como: “El uso de un lubricante adecuado, garantiza una capa de lubricante suficiente para evitar la fricción entre los elementos rodantes y las pistas, evitando el contacto metal-metal (fricción), ayuda también a prevenir la corrosión de los elementos del rodamiento, actuando como una barrera ante los contaminantes externos ya sea humedad, químicos”, la propiedades mecánicas y químicas de las mismas son importantes según el trabajo que desempeñen, la necesidad requerida por el equipo.

Una regla muy importante que debe estar presente es “el rodamiento debe estar lleno de grasa entre un tercio y máximo un medio del volumen total libre del rodamiento” en el caso del aceite, debe llenar hasta la mitad del elemento rodante más inferior.

Es necesario gestionar un Departamento de Mantenimiento enfocado a la confiabilidad de los equipos listos a producir, por lo cual es importante anticiparse a las posibles fallas.

Respecto a la emigración al mantenimiento predictivo, los autores: D. Mata, J. Aller y A. Bueno en el 2008, en su estudio titulado: Análisis probabilístico del mantenimiento predictivo y correctivo de máquinas eléctricas rotativas en una planta siderúrgica, especifica que “El mantenimiento juega un papel determinante para mantener o incrementar los niveles de disponibilidad”, el medir con indicadores probabilísticas que permiten analizar y corregir los procesos de inspección, mantenimiento preventivo y correctivo utilizado en este tipo de plantas. Esto lleva a impulsar el reto de implementar el predictivo a plantas hermanas.

En este último siglo, las estrictas normas de calidad que se deben cumplir, así como, la presión competitiva entre las industrias para mantener los mercados nacionales y extranjeros, ha forzado a los responsables del mantenimiento en las plantas industriales a implementar cambios en sus departamentos de mantenimiento.

Como lo menciona el autor Edgar A. en su estudio titulado: Alcances de la implementación de nuevas técnicas de análisis en los programas de mantenimiento predictivo proactivo en la industria, en el 2003, manifiesta, “Hoy en día es importante considerar en las grandes y medianas industrias la implementación de una estrategia de mantenimiento predictivo-proactivo para aumentar la vida de componentes de las máquinas, aumentando así su disponibilidad y aumentando la productividad de la Planta”, el cual impulsa a utilizar las herramientas que servirán de control a los equipos como: análisis de vibraciones mecánicas, termografía, análisis de aceite usado, entre otras.

2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En el proceso de conformado de barras corrugadas, suceden eventos frecuentes en que las cajas laminadoras han fallado sus rodamientos provocando paros inesperados, esto lleva a pensar:

- ¿Cómo poder evitar los paros de producción por fallos de los rodamientos de las cajas de laminación, que traen como consecuencia equipos estén fuera de línea y no confiables?

Y por consiguiente,

- ¿Qué técnicas se pueden aplicar para determinar el comportamiento en operación y si el rodamiento ha alcanzado su vida útil de operación?
- ¿Es posible que el lubricante existente cumpla con las propiedades mecánicas necesarias del equipo?
- ¿Los volúmenes suministrados de la grasa son adecuados para las condiciones de trabajo?
- ¿Existe un sistema de monitoreo en línea que determine el comportamiento de las variables del proceso funcionando donde se ve involucrado el rodamiento encontrando desvíos el cual genera alarmas?

- ¿Existe por parte del taller mecánico un sistema de mantenimiento que garantice la disponibilidad de las cajas laminadoras donde los rodamientos se encuentran en el intervalo de vida útil?

Por lo cual la empresa se ha incentivado en el interés de realizar el estudio para el apoyo del taller mecánico de cajas y guías, para evitar las fallas de los rodamientos. El objetivo es disminuir la frecuencia de los fallos y se basa en la confianza de tener equipos disponibles y listos para trabajar con el fin de mejorar los indicadores del taller como los de la producción, esto se replicará en otras industrias productoras del acero para la construcción.

El estudio de controlar la vida útil de los rodamientos fue realizado con el propósito de reducir los paros por fallo de rodamientos, lo cual lleva a la pregunta:

- ¿Qué se debe de conocer exactamente para fomentar la inversión para adquirir los equipos predictivos para generar ahorro a la industria productora de acero?

3. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación surge de la necesidad de promover la reducción de las fallas de los rodamientos de las cajas laminadoras, en la sección del curso de Ingeniería de Mantenimiento tiene dentro de su línea de investigación el mantenimiento predictivo, este brindará una disponibilidad, confianza y control en los equipos laminadores al momento de implementar el sistema de mantenimiento que servirá de soporte a la administración del taller mecánico de cajas y guías.

La empresa productora de acero para la construcción tiene el propósito de mejorar en su indicadores productivos, prevé la necesidad de adoptar el mantenimiento predictivo y sus técnicas para el cuidado de los rodamientos de las cajas laminadoras ayudando al personal operativo y administrativo del taller para poder detectar anomalías antes de la falla y retirarlo de funcionamiento antes que provoquen algún contratiempo con la producción. Esto es parte del estudio de factibilidad de lo que representa una falla económicamente al proceso productivo.

Para el cuidado de los equipos y evitar fallas inesperadas es importante la adquisición de equipos especiales (ensayos no destructivos) para monitorear los rodamientos en funcionamiento y encontrar elementos ájenos que puedan provocar un daño prematuro, claro es, que toda la inversión es para obtener menos materia prima perdida donde se mejora el indicador de barra laminada por barra pérdida.

Actualmente existe un crecimiento en el mercado de las empresas productoras del acero para la construcción, este estudio genera rentabilidad y ahorros en paros inesperados al proceso de manufactura, mejora el sistema de mantenimientos donde la mayoría de las variables serán controladas, haciendo al proceso eficiente y al taller mecánico de cajas y guías eficaz.

4. OBJETIVOS

General

Implementar el mantenimiento predictivo para rodamientos de cajas laminadoras para tenerlas en perfectas condiciones y disponibles para no interrumpir el proceso.

Específicos

1. Describir el estudio del monitoreo de la vida de los rodamientos del molino laminador aplicando técnicas de ensayos no destructivos, comprobando que lleguen al final de su vida útil.
2. Verificar si es el sistema o el tipo de grasa el adecuado para las necesidades del equipo para determinar si es la responsable de los fallos.
3. Describir las variables de cada caja laminadora (velocidad, carga, temperatura, etc.) y observar el comportamiento de los rodamientos en determinado tiempo para encontrar cualquier anomalía que genere un fallo.
4. Determinar el sistema de gestión del mantenimiento predictivo hacia el taller mecánico de cajas y guías que garantice la disponibilidad de las cajas laminadoras, al finalizar la investigación.

5. ALCANCES

La presente investigación es de tipo descriptivo, enfocada específicamente al taller mecánico de cajas y guías a nivel departamental, en la planta laminadora productora de acero para la construcción, la cual busca incentivar:

- El estudio y las aplicaciones de los procedimientos, técnicas utilizadas en el sistema de mantenimiento predictivo teniendo controles que son variables de los equipos que se pueden medir y monitorear, para evitar el fallo inesperado.
- Crear y alimentar sistemas digitales como ayuda del comportamiento de los elementos rodantes, para lograr detectar el rodamiento previamente a fallar y así no sufrir el inconveniente de un paro, explotando la vida útil que nos garantiza el fabricante.
- Fomentar la investigación a los operadores mecánicos para ser eficientes en sus labores, adoptando una actitud de excelencia al mantener un indicador de medición al taller de cajas y guías por debajo de la meta esperada.
- Fomentar el estudio de los operadores de las distintas técnicas que se utilizan en el sistema de mantenimiento predictivo y proponer que entes certificadores sean los instructores para que el departamento tenga personal altamente calificado y certificado.

- Ayudar a fomentar en otros talleres mecánicos de cajas y guías en cualquier otra empresa similar, en el cuidado de los rodamientos de las cajas laminadoras, implementando el mantenimiento predictivo y poseer controles de vida a los equipos de laminación aplicando las distintas técnicas el mantenimiento y ensayos no destructivos a los equipos.

6. HIPÓTESIS

El fallo de los rodamientos de las cajas de laminación, más de 50 %, no logran cumplir con las horas mínimas establecidas por el fabricante, esto por no tener un mantenimiento predictivo para los rodamientos.

El tipo de grasa utilizada para lubricación de los cilindros laminadores no cumple con las condiciones de trabajo, propiedades mecánicas y el volumen necesario, es imperioso emigrar a una grasa que ayude a cumplir la vida útil de los rodamientos que establece los fabricantes.

La implementación de un sistema predictivo aumentará la disponibilidad del equipo en un 5 % en la producción y un 30 % en la gestión del mantenimientos de los rodamientos, porque detectar las diferentes posibilidades que ocurra un fallo garantiza las variables a controlar para no poseer una falla.

La falta de estándares para realizar los trabajos de montaje, mantenimiento y desmontaje, provoca que se dañen los rodamientos porque los operadores mecánicos realizan la tarea de diferente manera.

La implementación del mantenimiento predictivo en rodamientos está basada en la determinación del estado de la máquina en operación. El concepto se basa en que las máquinas o rodamientos darán un tipo de aviso antes de que fallen y este mantenimiento trata de percibir los síntomas para después tomar acciones lo cual garantizará la disminución de los paros no programados.

7. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

7.1. Proceso de laminado

Es la deformación volumétrica en la cual se disminuye el espesor inicial de los materiales, por medio de fuerzas de compresión que las ejercen los cilindros sobre el material. Los cilindros giran en sentidos opuestos para que entre ellos el material pase para la deformación.

7.1.1. Laminación

El proceso de laminado en caliente es elevar la temperatura del acero de bajo carbón aproximadamente a 1 110 °C, la materia prima es conocida como palanquilla que se transforma en los productos comerciales como: las barras corrugadas (acero de contracción) para la industria de construcción y el alambón como materia prima para el proceso de conformado de alambres y perfiles. Se describe en (Muñoz., H. A., 2012), “La laminación consiste entonces en la conformación mecánica del acero mediante el paso sucesivo a través de rodillos que reducen la sección del acero. Este proceso se lleva a cabo mediante tres etapas: precalentamiento de la palanquilla y calentamiento, tren laminador (desbaste, intermedio y acabador), enfriamiento y corte a medida.”

7.1.2. Palanquilla

Acero de bajo contenido de carbono elaborado en la fundición de chatarra con componentes para lograr cierta composición química, con dimensiones cuadradas por un largo determinado según el producto a laminar, para lograr

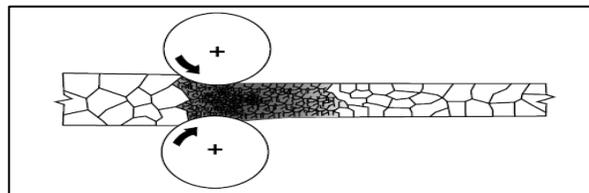
propiedades mecánicas en la fabricación de barras corrugadas, perfiles, alambroón. (Maneiro., A., 2010)

7.1.3. Tren de laminación

Consiste en pasar la palanquilla a través del rodillo girando a la misma revolución que permite la reducción de la sección cuadrada. De esta forma se reduce la sección transversal y se aumenta la longitud de la barra de acero en cada paso; en este paso se aprovecha la propiedad de ductilidad del acero solidificado.

Como hace referencia, (Muñoz., H. A., 2012), en el Manual del acero Gerdau Diaco para construcciones sismo resistentes, “Es por esto que las propiedades del producto dependerán mucho de la calidad (composición química) del acero que se utilice así como de las condiciones de trabajo (temperatura, velocidad, reducciones y acabado) en el proceso de laminación, este proceso se puede realizar en frío o en caliente. La laminación en caliente aprovecha el aumento de la ductilidad del material directamente proporcional a la temperatura, lo que ayuda al alivio de tensiones durante el proceso de conformación mecánica.” Se refiere que la laminación en caliente realiza un tratamiento término que mejora las propiedades de acero.

Figura 1. **Proceso de conformación mecánica en caliente**

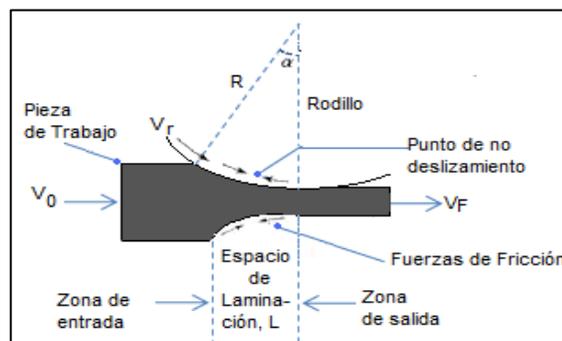


Fuente: Muñoz, H.A. (2012).

Del tren laminador la sección del desbaste se produce las primeras de formaciones a la palanquilla acondicionándola para los siguientes pasos, se eliminan asperezas y buena parte de la calamina (capa de óxido superficial). El tren intermedio se deforma la barra de acero en diferentes tipos de sección realizando las reducciones necesarias para ajustar la sección final al tipo de perfil y a las tolerancias deseadas. En el tren de acabado se obtiene secciones uniformes mediante pasos finos que logran el acabado superficial y ajustan las tolerancias deseadas de cada producto, (Maneiro., A., 2010) describe el proceso similar.

Esta disminución de espesor y secciones de área se da gracias a que los rodillos tiran el material hacia dentro del espacio de laminación a través de una fuerza de fricción neta sobre la palanquilla, Garabito., J. (2008). Laminación Protocolo Curso de Materiales, “Esta fuerza de fricción neta debe actuar hacia la derecha, por lo cual la fuerza de fricción a la izquierda del punto de no deslizamiento debe ser mayor que la fuerza de fricción a la derecha del punto de no deslizamiento”. Esto se puede demostrar en la figura 2.

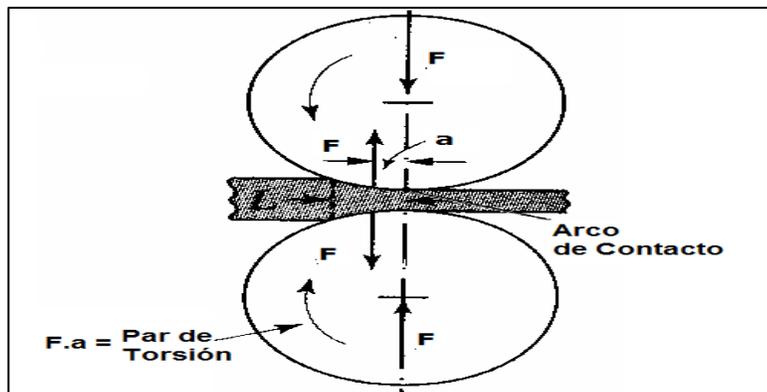
Figura 2. **Efecto de las fuerzas de rozamiento sobre el cambio de espesor de la palanquilla**



Fuente: Garabito, J. (2008).

Según (Garabito., J., 2008), los rodillos laminadores aplican una presión sobre el material para poder reducir el espesor y la sección de la palanquilla, por lo cual se necesita una fuerza perpendicular al arco de contacto, o perpendicular al plano de la palanquilla, ya que el arco es muy pequeño en relación al tamaño del rodillo se puede apreciar en la figura siguiente.

Figura 3. **Fuerza perpendicular del rodillo sobre el arco de contacto**



Fuente: Garabito, J. (2008).

(Garabito., J., 2008), desarrolla una serie de enunciados sobre la fuerza que debe generar el rodillo laminador en el laminado plano es:

$$F = L \times w \times Y_F$$

En donde:

L = Longitud de contacto entre el rodillo y la palanquilla, pulg. (mm).

Teniendo en cuenta que:

$$L = \sqrt{R(H_o - H_F)}$$

Siendo:

R = radio del rodillo, pulg. (mm)

H_o = espesor inicial, pulg. (mm)

H_F = espesor final, pulg. (mm)

W = ancho de la palanquilla (pulg.)

Y_F = esfuerzo de fluencia promedio de la lámina en el espacio de laminación (lb/pulg).

Esta ecuación es válida para una situación donde no hay fricción, por lo tanto entre mayor fricción entre la lámina y los rodillos mayor será la divergencia, la longitud de contacto, por lo cual la fuerza real del rodillo será mayor a la fuerza teórica calculada.

7.1.4. Potencia requerida

Para calcular la potencia requerida en cada rodillo según la figura 3, se puede considerar a:

$$a = \frac{L}{2}$$

Potencia = Torque * velocidad angular

$$P = T * w$$

$$P = \frac{1}{2} * F * 2\pi N$$

Para los dos rodillos, o sea el tren de laminación completo, la potencia será:

$$P = 2\pi NFL$$

En donde:

P = potencia, pulg-lb/min (w)

N = velocidad de giro del rodillo, RPM

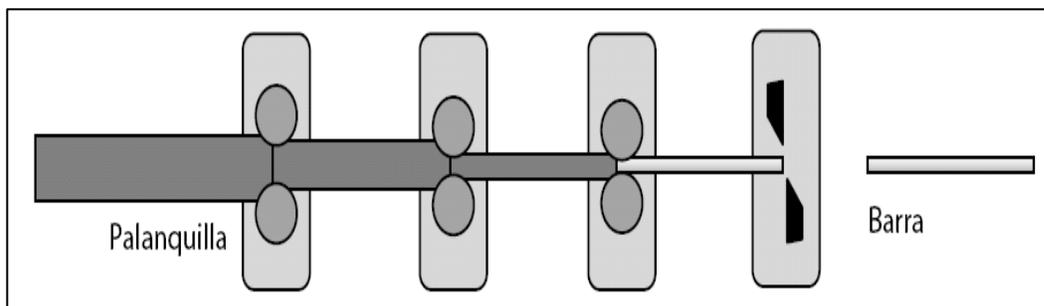
F = fuerza perpendicular del rodillo, lb (N)

L = longitud de contacto, pulg (m)

7.1.5. Enfriamiento y corte

Al finalizar la laminación la barra se somete a un enfriamiento acelerado con el objetivo de modificar la estructura del grano y conseguir una estructura de grano fino. Según (Muñoz., H. A., 2012), “En este proceso se consigue que la zona externa de la barra sea dura y resistente y la zona interior dúctil con lo cual se consigue mejores propiedades mecánicas para su función estructural resistente a sismos”. Las barras se cortan a longitudes comerciales de 6,00, 9,00 y 12,00 metros.

Figura 4. **Esquema del proceso de transformación de la palanquilla mediante la laminación**



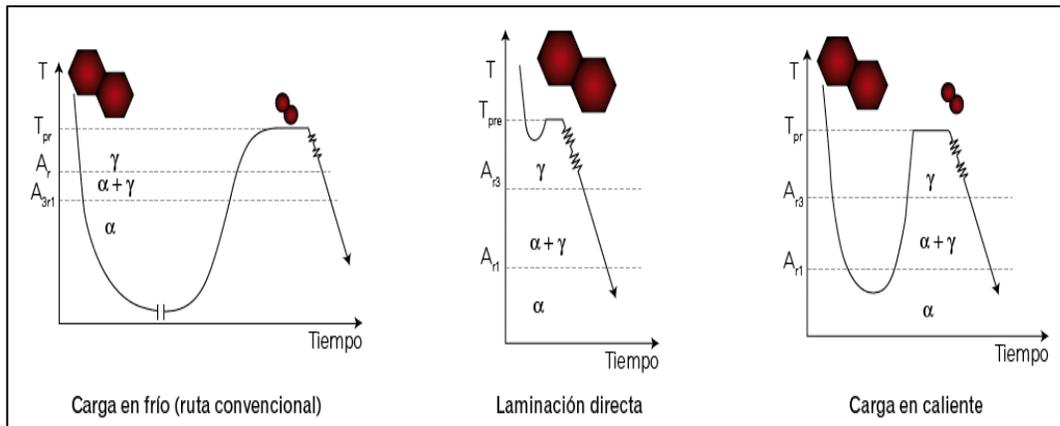
Fuente: Muñoz, H. A. (2012).

Menciona (Madías., J., 2009), la carga caliente es una práctica realizada cuando se cuenta con el proceso de fundición y coladas continuas, su objetivo principal es disminuir el consumo de combustible en el horno de recalentamiento. Inició por un impulso grande en el período de los '80, debido al alza de los precios de los combustibles. Fue necesaria la eliminación parcial o total de los controles de calidad sobre las palanquillas frías y la instalación de los equipamientos adecuados para el movimiento de las palanquillas calientes.

(Madías., J., 2009), en Avances recientes en la laminación de productos largos, menciona “En términos generales, se ahorra energía, se mejora el rendimiento metálico y se incrementa la productividad del horno de precalentamiento. Sin embargo, para las medidas de producto en que el laminador tiene más capacidad de producción que la acería, la carga caliente puede limitar la productividad.”

Deben tomarse en cuenta algunas diferencias, entre la carga convencional, la carga caliente, desde el tamaño de grano, la estructura metalográfica y la presencia o no de precipitados en el material que ingresa al proceso de laminación, debido a las diferentes historias térmicas. Las ventajas asignadas a este proceso, frente a una laminación convencional, se cuentan una mayor disponibilidad y productividad de la planta, mayor rendimiento metálico y menor consumo de energía, (Madías., J., 2009).

Figura 5. **Historia térmica de la palanquilla en la carga convencional, la carga caliente y la laminación directa**



Fuente: Madías, J. (2009).

7.2. Cilindros de laminación

(Maneiro., A., 2010) y (Heinrich S., K. 2003), dicen que los cilindros de laminación son herramientas que se ven sometidas a todo tipo de esfuerzos, cargas asociadas a las condiciones normales y anormales de laminación que varían a medida que los cilindros se van desgastando a lo largo de la campaña. La función de los cilindros es realizar un enorme trabajo de reducción de la sección de la palanquilla necesario para la laminación.

La variedad de grados utilizados en su fabricación es también muy amplia, desde fundición dúctil a carburo de tungsteno, incluyendo todo tipo de aceros para herramientas y aceros especiales, utilizados exclusivamente en cilindros (Heinrich S., K. 2003). Los cilindros de acero forjado se consideran tecnología punta en el ámbito de la laminación en frío, mientras que los de fundición se

emplean en múltiples aplicaciones, así como los cilindros de carburo de tungsteno sinterizado y cilindros recubiertos, ver la tabla I.

(Heinrich S., K. 2003). Descripción básica de los fundamentos mecánicos de los cilindros de laminación, “¡La selección del grado óptimo de los cilindros consiste en buscar el punto de equilibrio entre el rendimiento y la sensibilidad en relación con los accidentes en el tren!”

7.2.1. Fabricación de cilindros

En el mercado de la construcción existe una amplia variedad de cilindros, aplicaciones, procesos/tecnologías de fabricación, así como de grados de cilindros, para los que no existen normas. Se trata de un campo reservado a los especialistas a la vez que es un mercado muy reducido, (Heinrich S., K. 2003).

Tabla I. Materiales utilizados en cilindros de trenes de laminación

Material	Utilizado desde	2000	1970	1850	1960	1965	1995	1930	2000	1870	1950	1980	1990	1920	1995	1870	
	C (%)	---	8-15	---	2-4	0,4-1,0	0,4-1,0	0,4-1,0	2-10	---	0,8-2,0	1-22	0,4-0,8	0,3-1,0	0,4-1,0	0,4-1,0	
	Si (%)	Si ₃ N ₄	---	---	1-3	---	---	---	2-10	---	---	---	---	---	---	---	
	Σ (Cr, Mn, Mo, Ni, Co) (%)	---	5-15 (Co)	<3	3-6	14-22	6-9	6-9	30	---	2-5	8-12	<6	<4	5-8	1-6	
	Σ (V, W, Ti, Nb) (%)	---	70-90	---	---	<0,5 ?	1-4	---	---	---	<0,5 ?	<0,5 ?	8-15	<0,5	5-10	<0,5	
	Carburos (%)	---	70-100	5-15	1-15	20-30	30-40	30-40	30-40	40-50	5-15	10-20	3-5	6-15	2-5	0-2	
	Grafito (%)	---	---	✓	✓	---	✓	✓	---	---	✓	✓	---	---	---	---	
	Dureza de la tabla (HV)	2200	1300-1800	250-450	280-500	500-700	600-700	600-900	600-900	500-650	300-450	500-700	600-750	300-450	500-700	180-700	
	Forjado (F), Colado (C)	Otros	Otros	C	C	C (y otros.)	C	C	C	C	C ((F))	C	C, F, otros	C ((F))	C (F)	F/C	
	Monocolada (M) Colada compuesta (C)	Camisas	Camisas	M	M	C (M)	C	C	M	M	M (C)	C	C(M)	M	C	M/(C)0	
	Peso en el mercado/consumo (de 0 a 10, máximo: 10)	?	2-5	0	3-4	8-9	7-8 (10)	?	?	1	2-3	4-7	?↑	4	3	10	
		¿Diámetro máximo?	Diámetro máximo: 450	Productos largos	Cilindros de trabajo en trenes de lam. en caliente	Cilindros de trabajo en trenes de lam. en caliente, trenes de chapa, ST	?	Trenes de chapa (prácticamente obsoletos), camisas de pequeño diámetro	Trenes de perfiles pesados, desbastadores en TBC, pr. largos	Cilindros de trabajo en TBC, desbastadores, F1, F2	Cilindros de trabajo en TBC, productos largos, trenes de alambón	Productos largos	Desbastadores en TBC, F1, F2, ? Rompedora, ?? Universal	Cil. trabajo, CSM; cilindros de apoyo para TBC/CSM; cajas rompedoras, ...			

CILINDROS DE TRABAJO PARA TRENES DE LAMINACION EN CALIENTE (BANDA Y CHAAPA)
 CILINDROS PARA PRODUCTOS LARGOS
 MATERIALES NUEVOS DESARROLLADOS RECIENTEMENTE

Fuente: Heinrich S., K. (2003).

Un fuerte grupo de los fabricantes de cilindros de laminación son pequeñas empresas (a menudo no logran tener 300 trabajadores), mientras que los consumidores forman parte de grandes conglomerados industriales del sector del acero. Por su parte, los cilindros son solamente herramientas, pero son absolutamente necesarias. (Heinrich S., K. 2003)

Los cilindros pueden ser:

- Fundidos
- Forjados
- Sinterizados

Las tecnologías tienen sus ventajas, desventajas y limitaciones en cuanto a la producción. Dichos límites pueden deberse a:

- Dimensiones de los cilindros
- Grados de los cilindros (contenido de C, elementos aleantes)
- Requisitos de dureza o resistencia al desgaste
- Costos de fabricación

Según (Heinrich S., K. 2003), la parte crucial no es tanto la tecnología de fabricación de cilindros, sino el control de la misma, pues es importante controlar en todo momento el procedimiento. Ello depende del cuidado en la aplicación de la tecnología y del grado de conocimientos por parte de los fabricantes de cilindros. Esta afirmación resulta evidente si se realiza una comparación entre los índices de achatarramiento de los diferentes fabricantes (un secreto muy bien guardado), o cualquier otro dato de calidad.

7.2.2. Dureza de los cilindros

Precisamente en el caso de los cilindros, esta situación es aún peor, ya que los materiales con los que están fabricados son extremadamente duros y por consiguiente, se ven seriamente afectados por el endurecimiento mecánico (en el torno o en la rectificadora) y el revenido (en la rectificadora).

Con respecto al impacto de la dureza en las propiedades de los cilindros, en especial en lo que al desgaste se refiere algunos incluso creen que todo mejora a medida que aumentan los niveles de dureza. Se ha visto que esta premisa es incorrecta, llegando a darse el caso de que lo contrario. Otros parámetros si tienen una mayor repercusión en las propiedades de los cilindros, tales como la composición, la microestructura y las tensiones residuales. (Heinrich S., K. 2003)

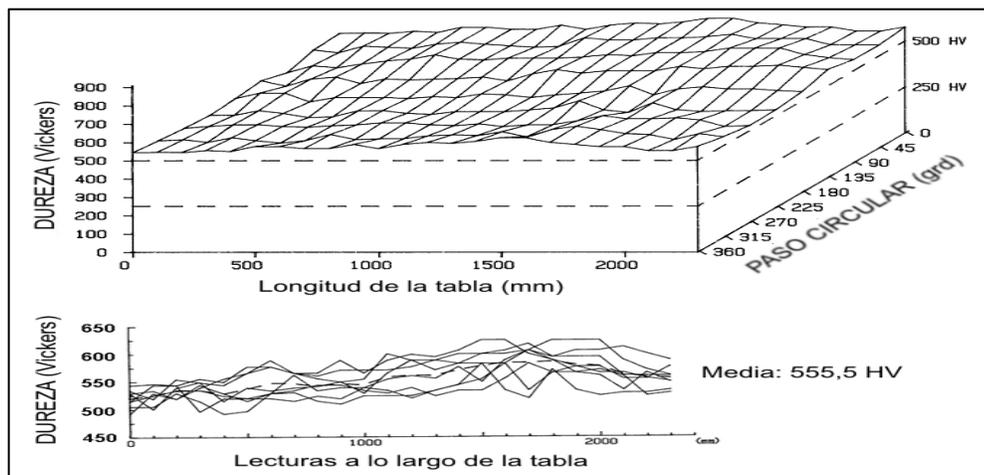
(Heinrich S., K. 2003) en su trabajo, Descripción básica de los fundamentos mecánicos de los cilindros de laminación, hace mención: “El área total de la superficie de la tabla de un cilindro de trabajo para laminación en caliente de dimensiones normales (600 mm < diámetro < 800 mm; 1 250 mm < longitud de tabla < 2 200 mm) ocupa varios metros cuadrados. Por múltiples razones, la dureza a lo largo de esta superficie no es uniforme, un hecho al que nadie presta atención realmente.”

En la figura 6 hace referencia a la distribución típica de dureza en un cilindro nuevo previo al usarse. Tras varias toneladas producidas en el tren, la distribución empeora (¿o mejora?) como se observa en la figura 7. La parte central del cilindro que ha estado en contacto con la banda caliente, ahora ha sufrido un revenido; la dureza en esta sección se ha reducido y es menor que en los extremos de la tabla. La desviación estándar aumenta y es, con mucho,

muy superior a cualquier tolerancia especificada. Por lo general, las especificaciones permiten un rango de 5 *shore*, que nunca se cumple, lo cual parece ser irrelevante.

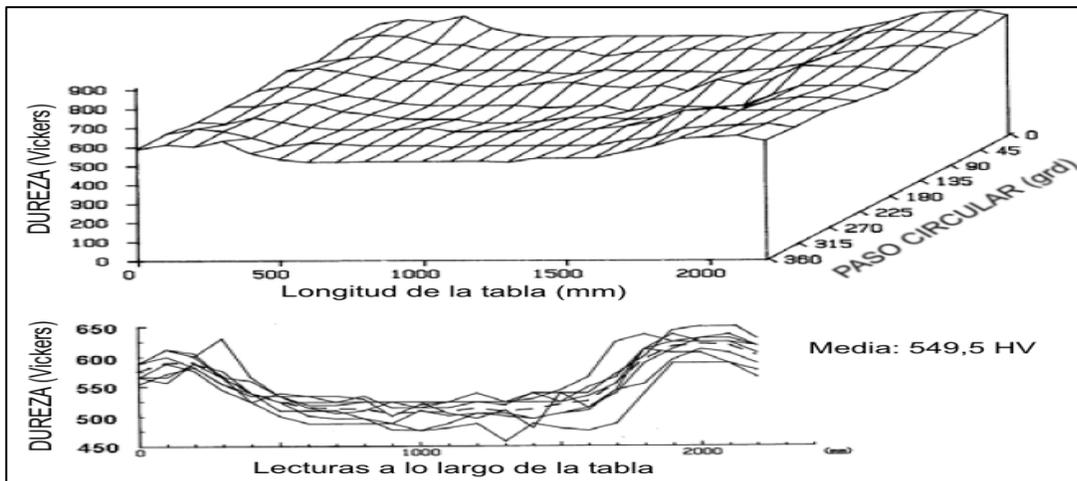
Únicamente el promedio o la media pueden, estar dentro del rango especificado, pero cuando esta situación se produce realmente, puede ser simplemente una cuestión de suerte. (Heinrich S., K. 2003)

Figura 6. Distribución de la dureza en la superficie de un cilindro de trabajo alto en cromo para laminación en caliente (Ø 759 x 2 235 mm, promedio de dureza: 555,5 ± 30,5 HV)



Fuente: Heinrich S., K. (2003).

Figura 7. **Distribución de la dureza en la superficie de un cilindro de trabajo alto en cromo para laminación en caliente (Ø 850 x 2 300 mm, promedio de dureza: 549,5 ± 46, 2 HV)**



Fuente: Heinrich S., K. (2003).

7.3. Rotura de origen térmico

Al poner a funcionar un cilindro en el tren y al comenzar a trabajar, la superficie se calienta, si se trata de laminación en caliente, hasta alcanzar una temperatura media, la cual se estabiliza una vez transcurrido cierto tiempo de laminación. Durante este período existe un gradiente de temperatura en el cilindro, que está más caliente en el exterior y más frío en el interior.

Como consecuencia de ello, la parte exterior presenta un mayor grado de dilatación térmica que la interior. De este modo, se crea una tensión térmica, al existir un esfuerzo de compresión en el exterior y un esfuerzo de tracción en el interior. (Heinrich S., K., 2003)

Cuanto menor es la temperatura inicial del cilindro al colocarlo en el tren, mayor es el riesgo de rotura térmica. Los fallos de este tipo ocurren con mucha más frecuencia en invierno (con temperaturas exteriores más bajas) que en verano. De hecho, existen tres importantes factores que pueden provocar la rotura de tipo térmico:

- Gradiente térmico
- Resistencia e integridad del material de los núcleos
- Tensiones residuales

Estos cilindros solían romperse durante la laminación en la sección transversal mayor entre las ranuras (figura 8). La explicación a este fallo, que parece contradecir cualquier experiencia en el ámbito de la ingeniería mecánica, aparecía en la bibliografía al respecto. Las tensiones residuales (siempre por compresión en el exterior y de tracción en la parte interna del cilindro) se reducen en todas las áreas en las existen ranuras mecanizadas en el cilindro, pero siguen siendo altas en las áreas entre las ranuras.

Como consecuencia del calentamiento que sufren los cilindros durante el proceso de laminación, las tensiones térmicas se suman a las residuales y cuando el total de tensiones de tracción (en su nivel máximo entre las ranuras) alcanza los límites de resistencia del material, se produce una rotura de origen térmico entre las ranuras; rotura de origen térmico, no fatiga por flexión o cualquier otra situación., (Heinrich S., K., 2003).

Figura 8. **Rotura en el cilindro ranurado con fractura en la sección transversal de mayor tamaño**



Fuente: Heinrich S., K. (2003).

7.4. **Rotura de torsión de cuellos de cilindros accionados**

Rara vez se observan fallos en los cuellos de los cilindros por fatiga torsional. En la actualidad, al igual que en el pasado, cuando se rompe un cuello se típica de una rotura instantánea, frágil, con áreas de fracción en un ángulo de 45° con respecto al sentido axial (figura 9).

Figura 9. **Rotura de cuello en el extremo del par de accionamiento**



Fuente: Heinrich S., K. (2003).

Según (Heinrich S., K. 2003), siempre que se produce un accidente grave durante la laminación (por ejemplo, la separación entre cilindros es demasiado reducida), los motores de accionamiento acumulan un momento par enorme y, dado que estos motores son tan fuertes y potentes, una parte del sistema total está expuesto a sufrir los siguientes daños:

- El motor puede quemarse
- El husillo puede deformarse
- El cuello del cilindro puede romper

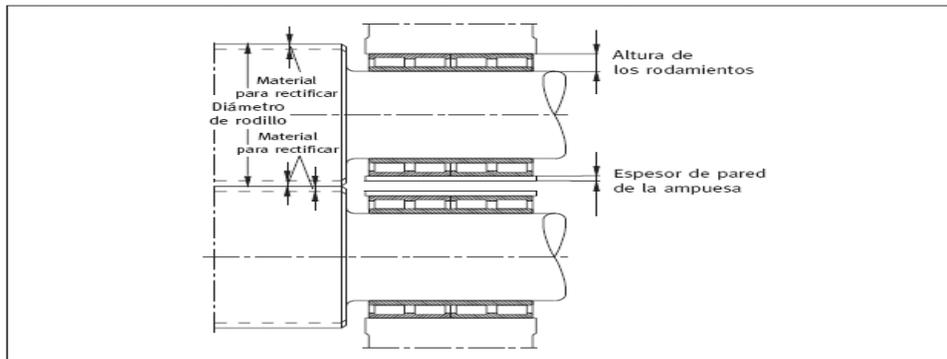
7.5. Rodamientos para laminadores

Los rodamientos están diseñados para garantizar y respaldar la mayor cantidad de carga posible para el limitado espacio de las cajas laminadoras, estos son sometidos a grandes cargas y velocidades, al soportar cargas radiales como axiales los elementos mecánicos permiten que los rodillos laminadores giren sin encontrar resistencia distribuyendo la carga entre estos.

7.5.1. Condiciones para el diseño

Según (Schaeffler Group Industrial), los rodamientos para los cuellos de los rodillos de laminación suelen estar fuertemente cargados y sujetos a elevadas presiones específicas. Por ello, para que estos rodamientos puedan soportar con seguridad dichas cargas, deben disponer de una elevada capacidad de carga. Por otro lado, el espacio constructivo, especialmente en dirección radial, está bastante restringido como se puede observar en la figura 10.

Figura 10. **Espacio de montaje disponible**



Fuente: Schaeffler Group Industrial.

El diámetro exterior de los rodamientos está limitado por el diámetro de los rodillos de laminación, menos el material eliminado al mecanizar dichos rodillos y el espesor de pared de la ampuesa. Su agujero corresponde al diámetro de las manguetas de los rodillos. Si la carga es muy elevada debe existir un compromiso, por un lado, entre el diámetro de la mangueta y su resistencia a la flexión y, por otro lado, entre la altura del rodamiento y su capacidad de carga. (Schaeffler Group Industrial)

El espacio disponible de montaje se debe utilizar, sobre todo, para acomodar los rodamientos radiales ya que comparadas con las cargas radiales, las cargas axiales son relativamente más reducidas.

Los rodamientos de rodillos tienen una capacidad de carga mayor que los rodamientos de bolas. Por ello, los rodamientos de rodillos como los cilíndricos, de rodillos cónicos u oscilantes de rodillos, son la mejor opción para absorber las cargas radiales. El material para los anillos y para los elementos rodantes es

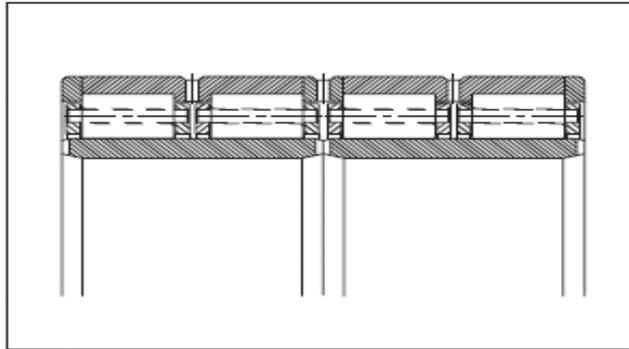
acero para rodamientos templado hasta el núcleo o, en algunos casos, acero cementado.

La selección de los rodamientos para cada aplicación específica está influenciada por la frecuencia de cambio de los rodillos de laminación. Normalmente, el espesor de pared de las ampuestas debe ser modificado al rectificar los rodillos. Esta operación es más difícil con los rodamientos no desmontables como, por ejemplo, los oscilantes de rodillos, cuyo anillo interior está ajustado con interferencia en las manguetas, (Schaeffler Group Industrial).

7.5.2. Rodamientos de rodillos cilíndricos

Cuando se dispone de volumen constructivo con el rodamiento de rodillos cilíndricos se alcanza una capacidad de carga más elevada. Por esta razón, son adecuados para absorber las más altas cargas radiales y, debido a su reducido rozamiento son aptos para las mayores velocidades. Para disponer del máximo número posible de rodillos, especialmente en rodamientos grandes, y para que estos tengan la máxima capacidad de carga, los rodamientos se equipan con rodillos perforados, guiados por jaulas de pasadores como se muestra en la figura 11.

Figura 11. **Rodamiento de cuatro hileras de rodillos cilíndricos perforados y jaula de pasadores**



Fuente: Schaeffler Group Industrial.

Estas jaulas constan de dos anillos que retienen lateralmente los rodillos y están conectados mediante pasadores que pasan por el centro de los rodillos. Este tipo de jaula tiene una resistencia muy elevada. Esta característica es especialmente importante en rodamientos montados en grandes laminadores que están expuestos a fuertes aceleraciones y deceleraciones. Por ejemplo, en rodillos de retorno para conseguir una precisión de rotación especialmente buena, se utilizan rodamientos de rodillos cilíndricos con las pistas de rodadura del anillo interior rectificadas previamente y posteriormente acabadas y pulidas junto con el rodillo laminador, cuando el anillo interior está montado en la mangueta. (Schaeffler Group Industrial)

7.5.3. Cálculo de las cargas sobre los rodamientos

Según (Schaeffler Group Industrial), la magnitud de las cargas sobre los rodamientos hoy en día generalmente se efectúa mediante programas de cálculo con ordenador. Especial influencia tienen el material a laminar, el tipo de

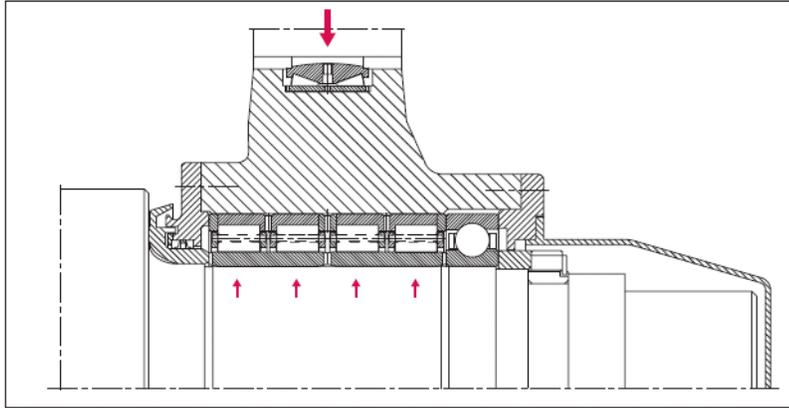
rodillos de trabajo (para fleje, alambre o palanquilla) y el programa de cálculo específico.

Por otra parte, las cargas de choque que se producen en la entrada de material entre los rodillos de trabajo no se contemplan en el cálculo. La carga de los rodillos en la primera pasada puede ser más del doble que la carga constante. La magnitud de la carga punta de la primera pasada depende de la forma del material que pasa entre los rodillos y de la temperatura del mismo. Dicha carga punta de inicio es de corta duración. No obstante, no debería pasarse por alto que este tipo de tensiones pueden, ocasionalmente, afectar drásticamente la duración de vida de los rodamientos. La distribución de las cargas entre ambas posiciones de rodamientos depende del tipo de laminador, de las ampuestas y de la clase de material a laminar.

7.6. Ampuestas autoalineables

Según (Schaeffler Group Industrial), las ampuestas están apoyadas separadamente en el bastidor. Las cargas en los rodillos de laminación se transmiten al bastidor mediante la presión de los rodamientos (axiales de rodillos cónicos) con superficie exterior abombada. Esto permite a las ampuestas adaptarse a la posición de las manguetas en caso de flexiones de los rodillos de laminación o de ajuste deficiente entre los mismos. Esto garantiza que todas las hileras de rodillos de los rodamientos de varias hileras, estén cargadas uniformemente como se puede observar en la figura 12.

Figura 12. **Ampuestas autoalineables**



Fuente: Schaeffler Group Industrial.

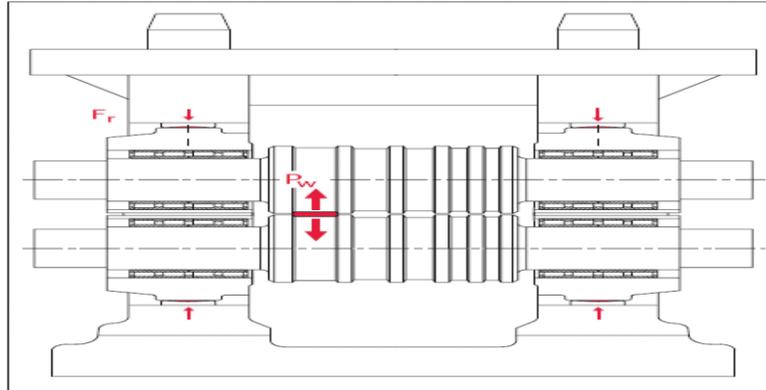
(Schaeffler Group Industrial), desarrolla las siguientes fórmulas para el material a laminar que pasa simétricamente entre ambas posiciones de rodamientos para cada mangueta que está cargada con $1/2 \times P_w$.

$$F_r = \frac{1}{2} \times P_w$$

7.7. **Rodillos perfilados**

Es necesario distinguir entre rodillos laminadores con diferentes perfiles (por .ejemplo, laminadores de palanquilla) y rodillos con los mismos perfiles (por .ejemplo, laminadores de alambre). Con los primeros (figura 13), debe establecerse una secuencia indicando el porcentaje de tiempo y las cargas en cada perfil individual. Con ello se pueden determinar las cargas actuantes en ambas manguetas. El cálculo de la duración de vida a la fatiga se basa en las cargas medias que actúan en la mangueta más cargada. (Schaeffler Group Industrial)

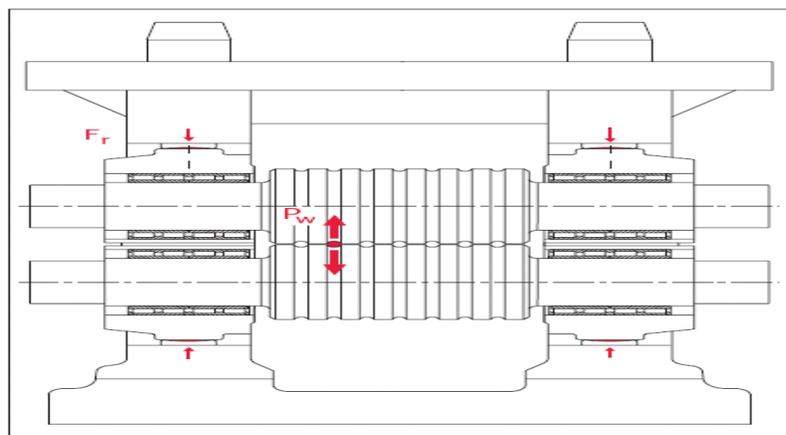
Figura 13. **Ampuesa autoalineable: rodillos de laminación con diferentes perfiles**



Fuente: Schaeffler Group Industrial.

Para (Schaeffler Group Industrial) los rodillos de laminar con idénticos perfiles (figura 14) y las diferentes cargas en las manguetas pueden ser calculadas con el programa de laminación.

Figura 14. **Ampuesa autoalienteable: rodillos con idénticos perfiles**



Fuente: Schaeffler Group Industrial.

(Schaeffler Group Industrial) alternativamente considera los siguientes valores orientativos para las cargas máximas en las manguetas:

Laminador simple: carga máxima en la mangueta

$$F_r = 0.67 \times P_w$$

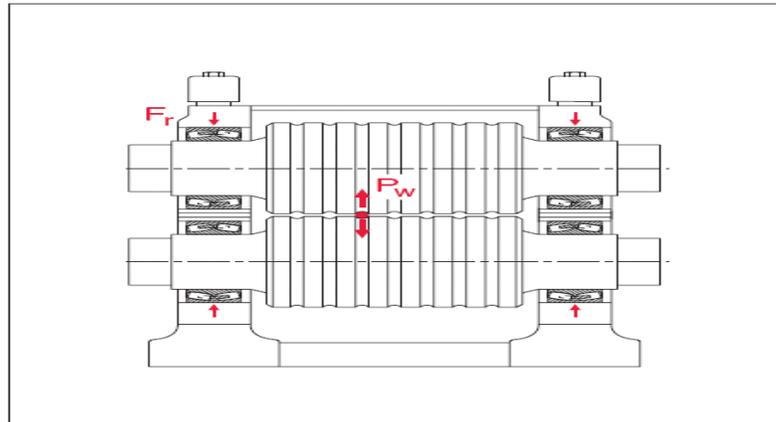
En donde:

P_w = carga en el rodillo laminador, relativa a un bastidor.

7.8. Ampuestas rígidas

Según (Schaeffler Group Industrial), ambos rodamientos están montados en alojamientos que están rígidamente conectados uno con el otro. Las flexiones de los rodillos de laminar, las desviaciones de las manguetas o las desalineaciones causan un vuelco mutuo entre los dos anillos del rodamiento. Esto no tiene influencia alguna en el cálculo del rodamiento, ya que las manguetas están apoyadas en rodamientos oscilantes de rodillos. Al utilizar rodamientos de dos o más hileras de rodillos cilíndricos, debe esperarse una distribución desigual de la carga entre las hileras de rodillos, como se muestra en la figura 15.

Figura 15. **Bastidor precargado**



Fuente: Schaeffler Group Industrial.

(Schaeffler Group Industrial) plantea el cálculo de las flexiones de los rodillos de laminar y de las condiciones de carga en los rodamientos. Las reacciones en los apoyos, las tensiones internas en los rodamientos, las tensiones equivalentes en las manguetas y otros datos importantes pueden ser impresos y representados gráficamente.

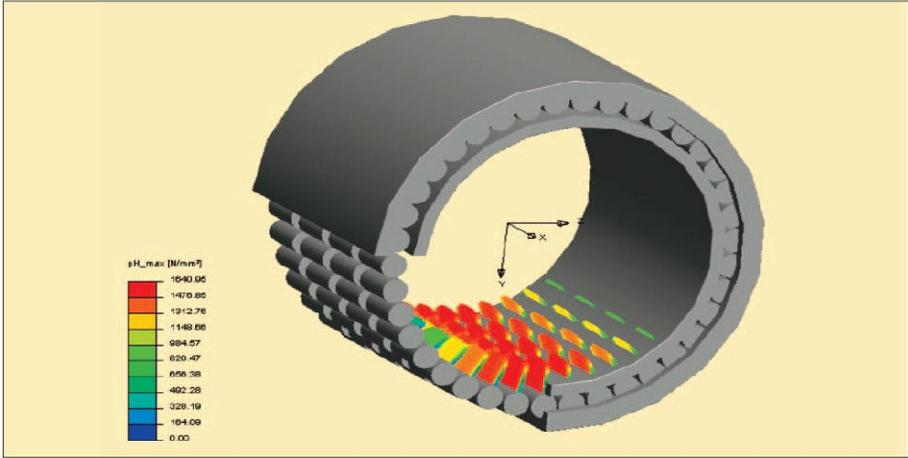
Las siguientes influencias pueden ser analizadas por (Schaeffler Group Industrial):

- Elasticidad de los rodillos de laminar planos o perfilados, macizos o huecos, de diferentes materiales, deformación debida a fuerzas transversales.
- Las cargas en las manguetas, procedentes de las fuerzas de laminado, los momentos de flexión y las fuerzas exteriores actúan sobre los rodamientos.

- Se tienen en cuenta los apoyos de los ejes en forma de rodamientos con elasticidad no lineal, la geometría de los rodamientos, el juego radial de los mismos, el perfil de los elementos rodantes y de las pistas de rodadura, así como, las condiciones especiales de transmisión de las cargas.
- Puede crearse y calcularse cualquier número de casos de carga (combinaciones carga/velocidad).

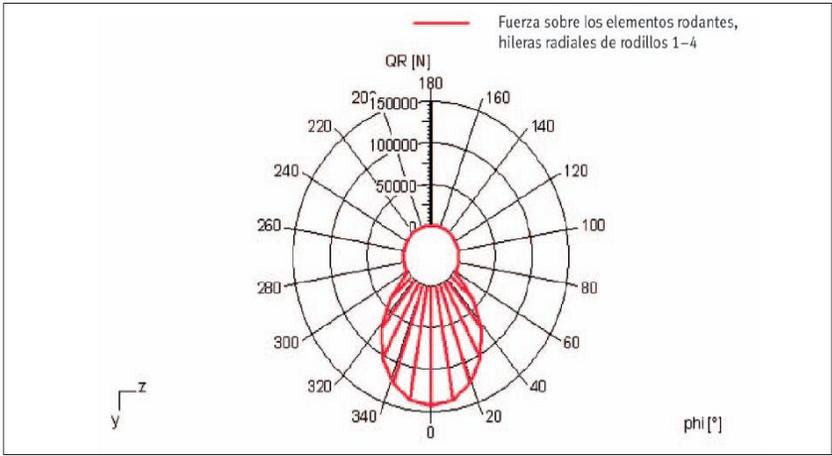
Los siguientes resultados de cálculo pueden ser impresos: según (Schaeffler Group Industrial), la flexión y la inclinación del eje del rodillo en cualquier punto, las fuerzas transversales y los momentos de flexión, las tensiones, las fuerzas de reacción en los rodamientos, la elasticidad de los mismos, las condiciones de carga dentro de los rodamientos y la distribución de las tensiones en las áreas de contacto de los elementos rodantes.

Figura 16. **Visualización de las presiones actuantes en el rodamiento de cuatro hileras de rodillos cilíndricos del rodillo de reenvío**



Fuente: Schaeffler Group Industrial.

Figura 17. **Distribución de cargas dentro del rodamiento de cuatro hileras de rodillos cónicos del rodillo de trabajo**



Fuente: Schaeffler Group Industrial.

7.9. Averías de rodamientos (daños de gran superficie)

Para (Schaeffler Group Industrial) el requisito fundamental para un funcionamiento sin problemas consiste en proporcionar el suficiente lubricante limpio. Las condiciones desfavorables se pueden detectar del modo siguiente:

- Reconocimiento de daños por el personal de servicio (ver tabla II).
- Evolución de la temperatura en el caso de una máquina herramienta con apoyo del husillo principal en perfecto estado. Condición del ensayo: $n \cdot dm = 750\,000 \text{ min} - 1 \cdot \text{mm}$ (ver figura 18).
- Evolución de la temperatura con función de rodamiento libre alterada. Condición del ensayo: $n \cdot dm = 750\,000 \text{ min} - 1 \cdot \text{mm}$.
 - Control del suministro de lubricante, entre los factores que deben tomarse en cuenta están:
 - Mirilla del nivel de aceite.
 - Medición de la presión de aceite.
 - Medición del caudal de aceite.
 - Medición de partículas procedentes del desgaste en el lubricante, entre las que se pueden enumerar las siguientes:
 - De forma discontinua: tapón magnético, análisis espectral de muestras de lubricante, investigación de muestras de aceite en el laboratorio.
 - De forma continua: emisor de señales magnético, determinación de la cantidad de partículas en circulación con un contador de partículas en línea.

- Medición de la temperatura
 - En general, con elementos termoelectrónicos.

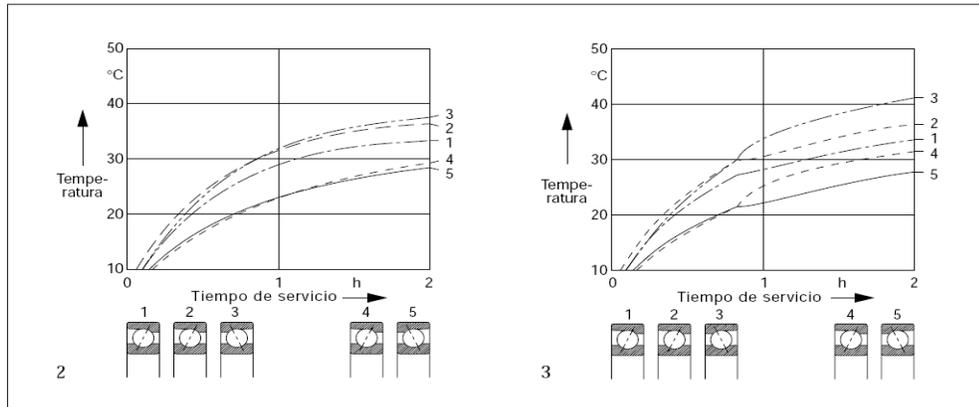
- Evolución de la temperatura en función del tiempo en caso de una lubricación con grasa deficiente. Condición de ensayo: $n \cdot d_m = 200\,000$ $\text{min}^{-1} \cdot \text{mm}$ (ver figura 19).

Tabla II. Daños posibles a rodamientos

Comportamiento en servicio	Posibles causas	Ejemplos
Funcionamiento irregular	Deterioro de los aros y elementos rodantes	Automóviles: Oscilación creciente de las ruedas Aumento del ladeo Sacudidas de los elementos de dirección
	Contaminación	Ventiladores: Vibración de intensidad creciente
	Juego excesivo del rodamiento	Sierras: Choques y golpes de intensidad creciente en los tirantes
Disminución de la precisión de trabajo	Desgaste a consecuencia de contaminación o de lubricación insuficiente	Torno: Aparición progresiva de marcas de vibraciones en la pieza mecanizada
	Deterioro de los aros y elementos rodantes	Rectificadoras: Aspecto ondulado de la superficie rectificada
	Variación del ajuste (juego o precarga)	Tren de laminación en frío: Aparición de defectos superficiales, generalmente periódicos, en el material laminado, como sombreados, huellas onduladas, y otros fenómenos similares
Ruido de servicio inusual: Ruido ululante o silbante	Insuficiente juego interno de servicio	
	Ruido en forma de ronquido o irregular	Excesivo juego interno de servicio Daños en las superficies de los rodillos Contaminación Lubricante inadecuado
	Variación paulatina del ruido de servicio	Variación del juego interno de servicio por influencia de la temperatura Caminos de rodadura dañados (p.ej. por contaminación o fatiga)
		Motores eléctricos Engranajes (en los engranajes, los ruidos de los rodamientos son difícilmente reconocibles, porque predomina por lo general el ruido de las ruedas dentadas)

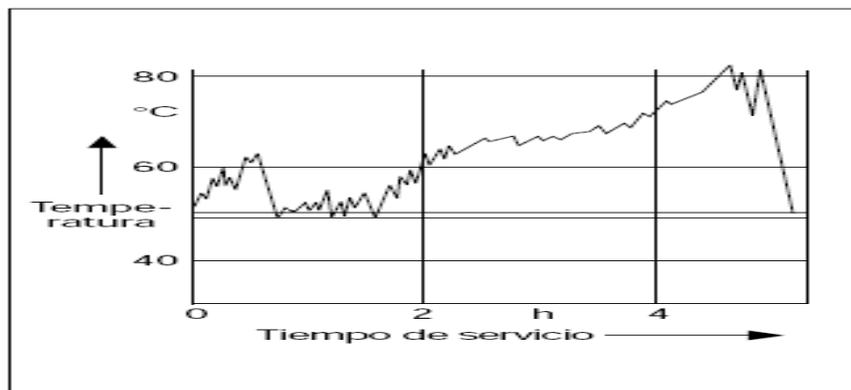
Fuente: FAG Sales Europe GMBH.

Figura 18. **Tiempo de servicio vs temperatura**



Fuente: FAG Sales Europe GMBH.

Figura 19. **Tiempo de servicio y el aumento de la temperatura**



Fuente: FAG Sales Europe GMBH.

7.10. **Aseguramiento de rodamientos averiados**

Para (Schaeffler Group Industrial), si se requiere extraer de una máquina un rodamiento averiado, es imprescindible aclarar cuál es la causa del daño y

cómo se puede evitar un nuevo fallo en el futuro. Si se desea obtener información al respecto lo más fiable posible, es conveniente proceder de modo sistemático en el aseguramiento y el estudio del rodamiento. Lógicamente, muchos de los puntos que se enumeran a continuación se han de tener en cuenta también, por otra parte, al inspeccionar rodamientos que se desmontan dentro del programa de mantenimiento predictivo.

7.10.1. Determinación de los datos de servicio

Al estudiar los daños sufridos por un rodamiento no sólo se comprueba el propio rodamiento, previamente las condiciones del entorno y de servicio también deben ser inspeccionadas (a ser posible, en combinación con un plano de montaje). (Schaeffler Group Industrial)

Se debe considerar:

- Lugar donde se emplea (máquina, lugar de montaje, tiempo de servicio alcanzado, número de pases laminadores y de fallos).
- Estructura de apoyo (disposición de rodamiento fijo / rodamiento libre, disposición flotante, ajuste propio).
- Velocidad de rotación.
- Carga
- Condiciones ambientales (calentamiento externo, refrigeración, vibraciones, polvo, suciedad, humedad, medios corrosivos).
- Lubricación
- Historial del rodamiento dañado (primer montaje o rodamiento de repuesto, frecuencia de fallos).

7.10.2. Toma de muestras de lubricante y valoración de las mismas

Según (Schaeffler Group Industrial) a partir del lubricante se pueden obtener una gran diversidad de indicios en lo que respecta a la causas de los daños producidos en rodamientos. Sin embargo, es requisito indispensable que la toma de muestras se lleve a cabo correctamente (solo en rodamientos abiertos); véase también DIN 51750, ASTM Standard D270-65 y 4057-81.

7.10.3. Lubricación por grasa

- Documentación de la distribución y el color de la grasa en el entorno del rodamiento.
- Toma de muestras en diversos lugares del rodamiento y de su entorno, con el correspondiente marcado.

7.10.4. Desmontaje del rodamiento averiado

Para (Schaeffler Group Industrial), en el desmontaje de un rodamiento averiado hay que tener cuidado en principio de que la imagen del daño no resulte falseada. Si ello es inevitable, es conveniente identificar y anotar los daños. Se debe seguir en la medida de lo posible el siguiente procedimiento:

- No dirigir las fuerzas de desmontaje a través de los cuerpos rodantes.
- Fuerzas de desmontaje elevadas indican eventualmente un funcionamiento alterado del rodamiento libre.
- No deben abrirse rodamientos obturados.
- No deben destruirse o dañarse partes sensibles al calor (lubricante, obturación, jaula) por calentamiento excesivo.

- Debe identificarse el rodamiento (lugar de montaje, dirección de montaje).

Tabla III. Características de los rodamientos y fallos

Característica	Zonas dañadas del rodamiento					Causas típicas de daños en los rodamientos						
	Superficies de asiento	Superficies de rodadura	Pestañas y caras de los rodillos	Jaula	Obtención	Proced. de montaje o herramientas incorrectos	Falta de limpieza	Ajuste forzado precarga elevada	Ajuste flojo precarga baja	Mal apoyo de los aros	Error de alineación o flexión de eje	
a) Comportamiento de servicio irregular						Montaje						
	Funcionamiento irregular					■	■		■			
	Ruido inhabitual					■	■	■	■	■	■	
Comportamiento alterado de la temperatura								■			■	
b) Aspecto de los componentes del rodamiento desmontado												
1 Impresiones de cuerpos extraños	■						■					
2 Daños causados por fatiga	■					■	■	■		■	■	
3 Marcas producidas en las paradas	■											
4 Cráteres de fusión y estrías	■											
5 Daños por deslizamiento	■								■			
6 Impresiones producidas por los cuerpos rodantes Estrías longitudinales	■	■				■						
7 Gripado	■	■	■									
8 Daños por desgaste	■	■	■	■			■					
9 Daños por corrosión	■	■	■	■								
10 Daños por calentamiento	■	■	■	■	■			■				
11 Roturas	■	■	■	■		■		■		■		
12 Daños debidos a oxidación de contacto (falso Brinelling)	■								■	■		

Continuación de la tabla III.

Característica	Causas típicas de daños en los rodamientos									
	Solicitaciones durante el servicio			Influencias del entorno				Lubricación		
	Carga excesiva o insuficiente	Vibraciones	Velocidades de rotación elevadas	Polvo, suciedad	Medios agresivos, agua	Calor externo	Paso de corriente	Lubricante inadecuado	Falta de lubricante	Lubricación excesiva
a) Comportamiento de servicio irregular										
Funcionamiento irregular		■		■	■		■	■		
Ruido inhabitual	■	■		■	■		■	■	■	
Comportamiento alterado de la temperatura	■		■			■		■	■	■
b) Aspecto de los componentes del rodamiento desmontado										
1 Impresiones de cuerpos extraños				■						
2 Daños causados por fatiga	■			■		■		■	■	
3 Marcas producidas en las paradas		■								
4 Cráteres de fusión y estrías							■			
5 Daños por deslizamiento	■								■	
6 Impresiones producidas por los cuerpos rodantes Estrías longitudinales	■									
7 Gripado	■		■					■	■	
8 Daños por desgaste				■				■	■	
9 Daños por corrosión					■			■		
10 Daños por calentamiento			■			■		■	■	■
11 Roturas										
12 Daños debidos a oxidación de contacto (falso Brinelling)		■								

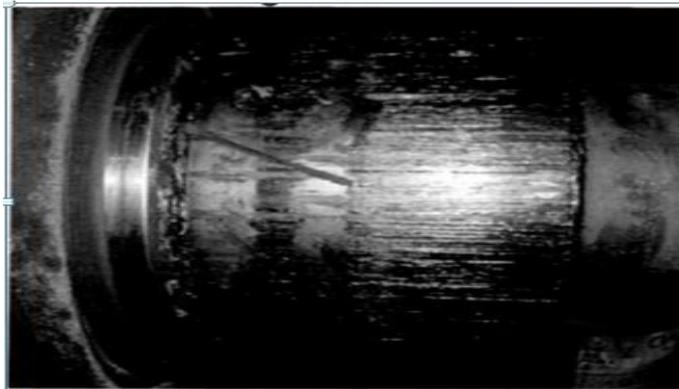
Fuente: FAG Sales Europe GMBH.

7.11. Evidencias de fallos en planta productora de acero

- Primer caso: pase de laminación V2, rodamiento Z-508727.ZL

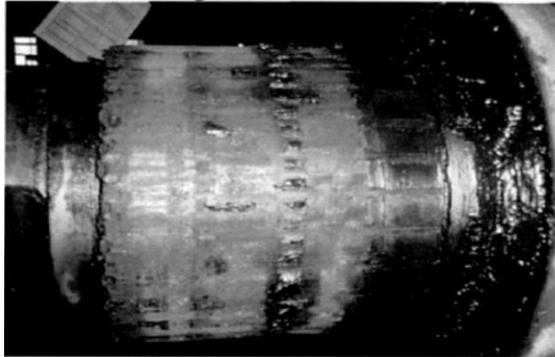
Observación: se encontraron ambos ejes de los rodillos que se habían sacado a mantenimiento reciente encontrando que coinciden en resequedad en dos y tres caminos de rodadura respectivamente. En la figura 20, se aprecia que la grasa solo alcanzó a lubricar la mitad del rodamiento, es decir solo dos pistas de rodadura en lugar de haber lubricado las cuatro pistas. En la figura 21 se observa que la grasa solo estuvo presente en uno de los cuatro caminos de rodadura, de manera tal que en los tres caminos de rodadura hacia el exterior del rodillo existió carencia de lubricante.

Figura 20. **Fallo en lubricación de rodamiento (a)**



Fuente: taller de cajas y guías de laminación de la planta productora de acero.

Figura 21. **Fallo en lubricación de rodamiento (b)**



Fuente: taller de cajas y guías de laminación de la planta productora de acero.

Posible causa: la falta de lubricante en una Regino Percival del rodamiento puede deberse a que se colocó muy poca cantidad de lubricante, es decir si solo se colocó una fracción del gramaje que necesitaba el rodamiento en su totalidad. Otra posible causa es el taponamiento de una de las venas proveedoras de la grasa, aunque es coincidencia que en ambos lados de un mismo rodillo se esté presentando este problema, que definitivamente si es posible. También la grasa al endurecerse después de cierto tiempo de permanecer sin movimiento puede formar un sello interno en el rodamiento que posteriormente obstruya el paso de grasa fresca hacia otras áreas del rodamiento.

- Segundo caso: pase de laminación del área del desbaste, no se comprueba a que pase de laminación ocurrió el fallo (H0 hasta V6), rodamiento Z-508727. ZL.

Observación: de manera relevante en la figura 22 se aprecia una fisura transversal en el aro exterior del rodamiento acompañada de óxido de contacto

y huellas de rozamiento sobre la superficie de asiento del mismo aro. En la figura 23, se observa un fragmento del aro exterior de un rodamiento, que muestra indicios de partículas que fueron atrapadas por los rodillos, pero también se muestra el deterioro excesivo en la superficie de rodadura, un desprendimiento de material. La figura 24 muestra un aro interior del rodamiento, con una fractura transversal y huellas de deslizamiento tanto en las pistas de rodadura como en la superficie de asiento.

Figura 22. **Fisura transversal en el aro exterior del rodamiento**



Fuente: taller de cajas y guías de laminación de la planta productora de acero.

Figura 23. **Fragmento del aro exterior de un rodamiento con deterioro**



Fuente: taller de cajas y guías de laminación de la planta productora de acero.

Figura 24. **Fractura transversal en el aro interior de un rodamiento**



Fuente: taller de cajas y guías de laminación de la planta productora de acero.

Posible causa: una fractura transversal ocurre generalmente cuando el aro del rodamiento estuvo girando y rozando contra otra pieza estática, provocando cambios bruscos de temperatura en regiones aisladas de este mismo aro. El óxido de contacto que se observa en la superficie de asiento de la figura 24 es un indicio de que las dimensiones del alojamiento no estaban dentro de lo recomendado por las normas ISO, lo cual también puede en ocasiones restringir a la rotura del aro exterior por carecer de un apoyo uniforme en toda la superficie circunstancial.

Este es el caso también del aro interior que se observa en la figura 24, solo que el asiento del aro de la parte interna, en donde se muestra un deslizamiento excesivo, que seguramente fue la causa de la fractura transversal.

En la figura 23, se puede apreciar lo que se llama fatiga superficial, que corresponde al daño de la pista de rodadura y esta va siempre precedida de un daño en la parte interna del aro, cuando al acero ha concluido su vida útil dentro del funcionamiento del rodamiento. Sin embargo, este daño puede presentarse antes de lo normal en el caso de que las condiciones de funcionamiento en

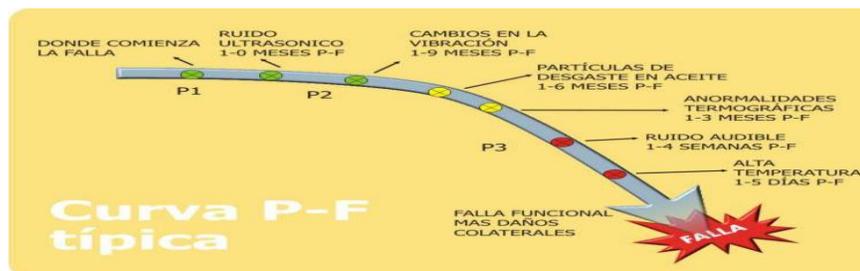
general so sean las adecuadas; como puede ser la lubricación, la precisión de los ejes y alojamiento.

7.12. Mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo es una técnica para pronosticar el punto futuro de rotura o avería de un componente de una máquina, por ejemplo el fallo de un rodamiento o del rodillo laminador, de tal forma que dicho componente pueda reemplazarse, con base en un plan, justo antes de que falle. Así el tiempo muerto del equipo se minimiza y el tiempo de vida del componente se maximiza. (Nieto G., H. 2011) y (Labaien., E., Carrasco., G. 2009)

No obstante lo complejo de las tecnologías aplicadas y lo especializado que puedan resultar los procedimientos, la filosofía es sencilla: la gran mayoría de las fallas de rodamientos de laminación no se presentan de manera brusca, en general son el resultado de un periodo de desgaste progresivo. Este proceso de desgaste es cuantificable y desde el momento de la detección inicial de la falla puede evaluarse su progreso y predecirse el momento del colapso con semanas, meses o años de anticipación. (Labaien., E., Carrasco., G. 2009)

Figura 25. Curva tiempo para la falla



Fuente: Nieto G., H. (2011).

7.13. Metodología de las inspecciones

Para Nieto G., H. (2011) una vez determinada la factibilidad y conveniencia de realizar un mantenimiento predictivo a los rodamientos de los cilindros de laminación, el paso siguiente es determinar las variables físicas a controlar que sean indicativas de la condición de los rodamientos. El objetivo de esta parte es revisar en forma detallada las técnicas comúnmente usadas en el monitorizado según condición, de manera que sirvan de guía para su selección. La finalidad del monitorizado es obtener una indicación de la condición (mecánica) o estado de salud de los rodamientos, de manera que pueda ser operada y mantenida con seguridad y eficacia. (Labaien., E., Carrasco., G. 2009)

Por monitorizado, se entendió en sus inicios, como la medición de una variable física que se considera representativa de la condición de los rodamientos y su comparación con valores que indican si ellos está en buen estado o deteriorado. Con la actual automatización de estas técnicas, se ha extendido la acepción de la palabra monitorizado también a la adquisición, procesamiento y almacenamiento de datos. De acuerdo a los objetivos que se pretende alcanzar con el monitorizado de la condición de una máquina debe distinguirse entre vigilancia, protección, diagnóstico y pronóstico. (Olarte, W., Botero, M., Cañón, B. 2010)

- Vigilancia de máquinas: su objetivo es indicar cuándo existe un problema. Debe distinguir entre condición buena y mala, y si es mala indicar su grado de severidad.
- Protección de máquinas: su objetivo es evitar averías catastróficas. Una máquina está protegida, si cuando los valores que indican su condición

llegan a valores considerados peligrosos, la máquina se detiene automáticamente.

- Diagnóstico de averías: el objetivo es definir cuál es el problema específico y estimar cuánto tiempo más podrá funcionar la máquina sin riesgo de sufrir una avería.

7.14. Técnicas aplicadas al mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo consta de una serie de ensayos de carácter no destructivo orientados a realizar un seguimiento del funcionamiento de los equipos para detectar signos de advertencia que indiquen que alguna de sus partes no está trabajando de la manera correcta. (Labaien., E., Carrasco., G. 2009)

Los ensayos que más utilizan en las industrias son los siguientes:

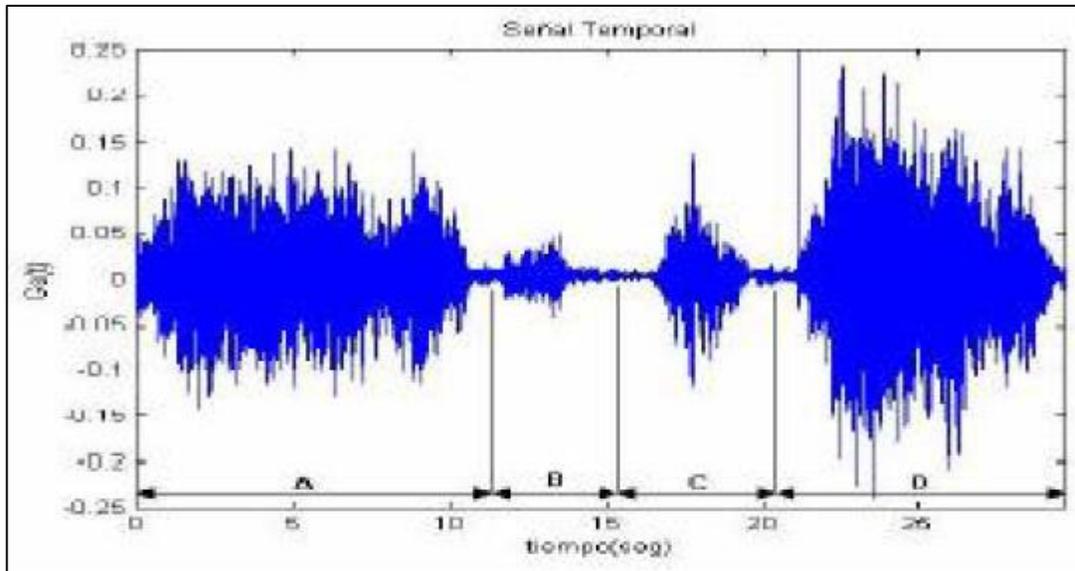
- Análisis de vibraciones

Esta técnica de mantenimiento predictivo se basa en el estudio del funcionamiento de las máquinas rotativas a través del comportamiento de sus vibraciones. Todas las máquinas presentan ciertos niveles de vibración aunque se encuentren operando correctamente, sin embargo, cuando se presenta alguna anomalía, estos niveles normales de vibración se ven alterados indicando la necesidad de una revisión del equipo. (Olarde, W., Botero, M., Cañón, B. 2010)

Las vibraciones pueden analizarse midiendo su amplitud o descomponiéndolas de acuerdo a su frecuencia como puede observarse en la

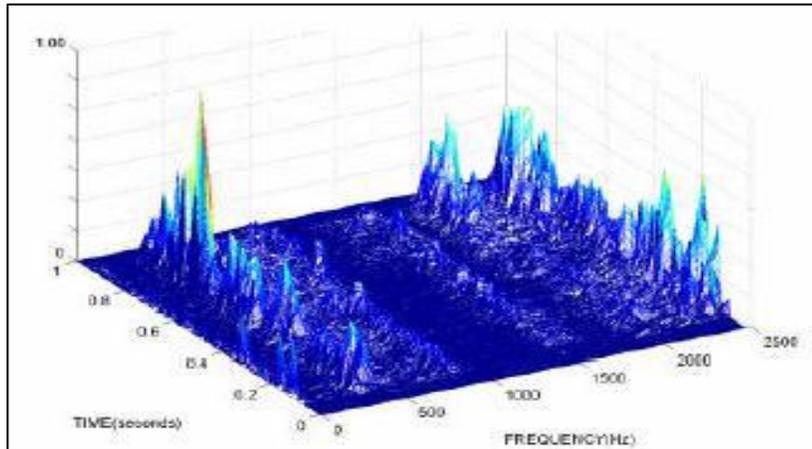
figura 26, así cuando la amplitud de la vibración sobrepasa los límites permisibles o cuando el espectro de vibración varía a través del tiempo, significa que algo malo está sucediendo y que el equipo debe ser revisado. (Labaien., E., Carrasco., G. 2009)

Figura 26. **Registro de vibraciones en un ciclo de trabajo en función del tiempo**



Fuente: Labaien., E., Carrasco., G. (2009).

Figura 27. Transformada tiempo-frecuencia



Fuente: Labaien., E., Carrasco., G. (2009).

Los problemas que se pueden detectar por medio de esta técnica, son:

- Desequilibrio
 - Desalineamiento
 - Excentricidad
 - Defectos en rodamientos y/o cojinetes
 - Defectos en engranajes
 - Defectos en correas
 - Holguras
 - Falta de lubricación
-
- Termografía

Es una técnica que estudia el comportamiento de la temperatura de las máquinas con el fin de determinar si se encuentran funcionando de manera correcta. La energía que las máquinas emiten desde su superficie viaja en

forma de ondas electromagnéticas a la velocidad de la luz; esta energía es directamente proporcional a su temperatura, lo cual implica que a mayor calor, mayor cantidad de energía emitida. Debido a que estas ondas poseen una longitud superior a la que puede captar el ojo humano, es necesario utilizar un instrumento que transforme esta energía en un espectro visible, para poder observar y analizar la distribución de esta energía. (Labaien., E., Carrasco., G. 2009) y (Olarte, W., Botero, M., Cañón, B. 2010)

Gracias a las imágenes térmicas que proporcionan las cámaras termográficas, se pueden analizar los cambios de temperatura. Un incremento de esta variable, por lo general representa un problema de tipo electromecánico en algún componente de la máquina. (Nieto G., H. 2011)

Las áreas en que se utilizan las cámaras termográficas son las siguientes:

- Reductores, frenos, rodamientos, acoplamientos y embragues mecánicos.
 - Hornos, calderas e intercambiadores de calor.
 - Instalaciones de climatización.
 - Líneas de producción, corte, prensado, forja, tratamientos térmicos, etc.
-
- Análisis por ultrasonido

Está basado en el estudio de las ondas de sonido de alta frecuencia producidas por las máquinas cuando presentan algún tipo de problema. El oído humano puede percibir el sonido cuando su frecuencia se encuentra entre 20 Hz y 20 kHz, por tal razón el sonido que se produce cuando alguno de los componentes de una máquina se encuentra afectado, no puede ser captado por

el hombre porque su frecuencia es superior a los 20 kHz. Las ondas de ultrasonido tienen la capacidad de atenuarse muy rápido debido a su corta longitud, esto facilita la detección de la fuente que las produce a pesar de que el ambiente sea muy ruidoso.

Los instrumentos encargados de convertir las ondas de ultrasonido en ondas audibles se llaman medidores de ultrasonido o detectores ultrasónicos. (Nieto G., H. 2011) y (Olarte, W., Botero, M., Cañón, B. 2010)

El análisis de ultrasonido permite:

- Detectar fricción en máquinas rotativas
- Detectar fallas y/o fugas en válvulas
- Detectar fugas en fluidos
- Detectar pérdidas vacías
- Detectar arco eléctrico
- Verificar la integridad de juntas de recintos estancos

Según (Nieto G., H. 2011), estas técnicas acompañadas de un sistema de recolección de datos que pueda fácilmente indicar cuál es el estado actual de los rodamientos o cilindros laminadores, por ejemplo, la técnica de revisión diaria o periódica utilizada VOSO (ver, oír, sentir y oler) da parámetros registrándolos de forma digital desplegando datos vitales para el buen funcionamiento y acompañado de los ensayos no destructivos brindará la seguridad de tener equipos altamente confiables como un ahorro al mantenimiento correctivo y resultados increíbles a la producción. (Olarte, W., Botero, M., Cañón, B. 2010)

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE
PREGUNTAS ORIENTADORAS

OBJETIVOS

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. RODAMIENTO PARA LAMINACIÓN

- 1.1. Rodamiento para laminadores
- 1.2. Cálculo de las cargas sobre los rodamientos
- 1.3. Lubricación
- 1.4. Tolerancia de los rodamientos
- 1.5. Montaje y mantenimiento

2. CILINDROS DE LAMINACIÓN: PROCESO DE FABRICACIÓN

- 2.1. Fundición
- 2.2. Fundición estática
- 2.3. Fundición centrífuga
- 2.4. Tratamientos térmicos
- 2.5. Mecanizado de los cilindros
- 2.6. Aplicación de los cilindros
 - 2.6.1. Aplicación de desbaste

- 2.6.1.1. Cilindros de hierro para posición de desbaste
 - 2.6.1.2. Cilindro de acero para posición de desbaste
 - 2.6.2. Aplicación de intermedio
 - 2.6.2.1. Cilindro para posición intermedios
 - 2.6.3. Aplicación de acabado
 - 2.6.2.1. Cilindro para posiciones de acabado
- 2.7. Dureza
- 2.8. Enfriamiento con agua

3. FALLAS DE RODAMIENTOS DE CILINDROS DE LAMINACIÓN

- 3.1. Comportamiento irregular en servicio como indicio de averías
 - 3.1.1. Reconocimiento subjetivo de daños
 - 3.1.2. Monitoreo de rodamiento con ayuda de medios técnicos
 - 3.1.3. Daños de gran superficie
 - 3.1.4. Daños puntuales
- 3.2. Aseguramiento de rodamientos averiados
 - 3.2.1. Determinación de los datos de servicio
 - 3.2.2. Toma de muestras de lubricante y valoración de las mismas
 - 3.2.3. Comprobación del entorno del rodamiento
 - 3.2.4. Dictamen del rodamiento averiado
 - 3.2.5. Control de los asientos
 - 3.2.6. Dictamen del rodamiento completo
- 3.3. Valoración de las características de rodadura y de deterioro en el rodamiento desmontado
 - 3.3.1. Medidas preparatorias

- 3.3.2. El estado de las superficies del asiento
- 3.3.3. Huella de rodadura característica
- 3.3.4. Valoración del contacto con el borde
- 3.3.5. Daños de jaula
- 3.3.6. Daños en la obturación
- 3.4. Inspección de rodamiento
 - 3.4.1. Medición geométrica de rodamiento y partes de rodamientos
 - 3.4.2. Análisis y ensayos de lubricantes
 - 3.4.3. Control del estado del material
 - 3.4.4. Ensayos de componentes
 - 3.4.5. Comprobación por cálculo de las condiciones de carga
- 4. MANTENIMIENTO PREDICTIVO
 - 4.1. Definición del mantenimiento predictivo
 - 4.2. Organización para el mantenimiento predictivo
 - 4.3. Metodología de las inspecciones
 - 4.4. Técnicas aplicadas al mantenimiento predictivo
 - 4.4.1. Análisis de vibraciones
 - 4.4.2. Análisis de lubricantes
 - 4.4.3. Análisis por ultrasonido
 - 4.4.4. Termografía
- 5. IMPLEMENTACIÓN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO A RODAMIENTOS DE CILINDROS DE LAMINACIÓN, METODOLOGÍA
 - 5.1. Análisis del sistema bajo estudio
 - 5.2. Selección adecuada de parámetros
 - 5.3. Adquisición de datos

- 5.4. Análisis e interpretación de datos
- 5.5. Evaluación del estado del equipo
- 5.6. Generación de avisos y toma de decisiones
- 5.7. Órdenes de trabajo y retroalimentación

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

APÉNDICES

ANEXOS

9. METODOLOGÍA

El contenido general del presente trabajo obedece a una investigación de tipo cuantitativo, se concentra en el cálculo de la vida útil de los rodamientos y en el análisis de los valores numéricos obtenidos de las variables monitoreadas en los diferentes puntos de medición de las chumaceras de las cajas laminadoras y en normalizar los datos de la vida útil de los rodamientos. Con esta información se hacen comparaciones con la vida promedio ofrecida por el fabricante, comparando el comportamiento de los rodamientos lubricados con distintas grasas para determinar.

Producto de la aplicación de la metodología del mantenimiento predictivo se logra obtener vidas promedio de rodamientos y comparar el promedio de una hipótesis nula que al cambiar el tipo de grasa se logra aumentar las horas útiles del rodamiento y la implementación total del mantenimiento predictivo con sus herramientas que garanticen la confiabilidad y disponibilidad. La metodología se va a dividir en las siguientes fases:

- Fase 1: análisis y muestreo de la condición de trabajo de rodamiento

En esta parte se analizarán los datos que son necesarios para el estudio de la vida de los rodamientos, para así poder realizar el cálculo de las horas de vida promedio. De igual forma las variables de operación que dependiendo del pase de laminación que trabaje, son diferentes y como afectan directamente a las horas del rodamiento. En esta parte se analizarán los instrumentos utilizados para realizar el monitoreo y si es el ideal para la recolección de estos datos.

- Fase 2: cálculo de las horas trabajo de los rodamientos

Con los datos requeridos de todos los puntos de monitoreo de la caja laminadora, se procederá al cálculo de las horas trabajadas del rodamiento, por medio de fórmulas matemáticas considerando que el tipo de grasa es el actual y la fuerza normal ejercida al rodillo laminador es absorbida por el rodamiento, en cada pase de laminación la fuerza es diferente.

- Fase 3: cálculo de las horas trabajo de los rodamientos, cambiando grasa

Se considera que la grasa utilizada en la actualidad es un factor que influye en que los rodamientos no logren llegar al final de su vida útil especificada por el fabricante, por lo cual se analizarán los mismos valores estudiados en la fase dos, ahora con un tipo de grasa con mejores propiedades mecánicas, las cuales serán comprobadas y servirá para hacer una comparación y análisis de costo beneficio.

- Fase 4: análisis de las variables de las cajas de laminación, comprobar por medio de prueba de hipótesis

Los datos generados por el estudio de ambas grasas permitirán demostrar que los rodamientos no siempre trabajan bajo la misma condición, las variables son afectadas por el pase laminador. El promedio de horas trabajadas serán variables por los factores de la velocidad y carga de trabajo (fuerza normal), lo cual servirá para encontrar cual es la desviación de horas de vida. Se comprobará estadísticamente si las horas que el fabricante promete son las que realmente el rodamiento opera, esto será con un nivel de confianza del 90 %

por las condiciones variables de trabajo y una muestra de un sector del tren laminador de todas las cajas laminadoras.

Esto ayudará a realizar el estudio económico de continuar con el proveedor o cambiar la marca del rodamiento y de la grasa.

- Fase 5: implementación del mantenimiento predictivo a los rodamientos

El entrenamiento del sistema de mantenimiento predictivo con la teoría adquirida por el personal operativo del taller se planifica por medio del PDCA, así como, la implementación del mantenimiento preventivo que llevará a una serie de tareas previas que no necesitarán una inversión fuerte, las cuales han surgido en el planear, identificar y rotular todos los molinos de laminación, cálculo de *stock* de repuestos consumibles, realizar estándares de operación, seguimiento a los rodamientos utilizando medios digitales, observaciones diarias a los equipos para obtener información de las variables definidas a observar. Todo esto generará reportes y cuadros estadísticos del comportamiento de los equipos y repuestos.

- Fase 6: inversión de equipo para ensayos no destructivos

El sistema de detección de fallas monitoreando la condición permite tener herramientas de gran ayuda en las cuales se requiere tener una inversión considerable para la adquisición del equipo. Las técnicas objetivas de este sistema son: variables operacionales, análisis de vibraciones y de aceite, termografía, ultrasonido, análisis de corriente, estroboscopia entre otros ensayos no destructivos. La selección de la tecnología adecuada permiten captar el lenguaje de la maquinaria, la máquina expresa su salud a través de diversos parámetros, es la clave para seleccionar la tecnología adecuada,

capaz de captar condiciones anormales en estado prematuro, antes de que las fallas se hagan incontrolables.

Estas tecnologías especializadas miden y registran variables representativas de la salud de la maquinaria a un nivel tal que permita hacer seguimiento a la evolución de los diversos problemas detectados y activen el potencial de la planificación y programación del mantenimiento.

10. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Los datos de control para determinar la vida de los rodamientos de laminación serán recolectados por medio de la observación de campo efectuada por los colaboradores diariamente en base a una lista de cotejo en proceso, donde la información recolectada será: temperatura de las chumaceras exteriores, revoluciones del rodillo laminador y carga (que es la diferencia de material de entrada con el de salida), para determinar la fuerza ejercida hacia los rodamientos.

Con base en esta información de carácter cuantitativo se pueden alimentar hojas electrónicas para encontrar horas promedio de vida útil de los rodamientos curvas de comportamiento a través del tiempo de trabajo y aplicar métodos estadísticos como la prueba de hipótesis para determinar la veracidad de lo ofrecido por los fabricantes.

Entre los instrumentos portátiles utilizados por los colaboradores para obtener los valores de trabajo están:

- Temperatura: es un pirómetro infrarrojo PCE 889 con rango de medición de -50 hasta 1 000 °C, precisión de +/- 2 °C, relación de distancia con el punto de medición y normas EMC; EN: 500082 - 1.
- RPM: es un medidor de revoluciones PCE DT62 con rango de mediciones 2,5 hasta 99 999 rpm, precisión de +/- 0,05 % del valor +/- 1 DGT y distancia máxima de medición 500 mm. Por otro lado también se puede medir las rpm del motor, por medio del HMI.

- La carga que es la diferencia de reducción para determinar la fuerza, es obtenida por el HMI.

Para este ensayo utilizará un modelo estadístico en el cual, se verificará los valores obtenidos en los diferentes escenarios, y se analizarán otros tipos de grasas con distintas propiedades de la que actualmente se utiliza. Se determinará que la vida promedio del rodamiento cumple con lo prometido por el fabricante y que al cambiar la grasa se aumentara la vida útil de los rodamientos como la de los equipos. El modelo estadístico es una prueba de hipótesis para el caso específico de la media poblacional μ , el estimador es $\hat{\mu} = \bar{X}$, cuya varianza es σ^2/n .

<i>Hipótesis</i>			
<i>Nula</i>	$H_0 : \mu = \mu_0$		
<i>Alternativa</i>	$H_1 : \mu < \mu_0$	$H_1 : \mu > \mu_0$	$H_1 : \mu \neq \mu_0$
<i>Estadística de Prueba</i>	$Z = \frac{\hat{\mu} - \mu_0}{\sigma_{\bar{x}}}$		
<i>R. Rechazo</i>	$\{Z : Z < Z_{\alpha}\}$	$\{Z : Z > Z_{1-\alpha}\}$	$\{Z : Z > Z_{1-\alpha/2}\}$

12. RECURSOS FÍSICOS Y FINANCIEROS

El mayor porcentaje de los recursos necesarios serán utilizados en la visita a la planta productora de acero para la construcción, específicamente, en el taller de cajas y guías de laminación. Para corroborar que las fases de la implementación son aplicadas en el mantenimiento de las cajas laminadoras especialmente a los rodamientos de los cilindros laminadores, las prácticas subjetivas utilizadas en el mantenimiento predictivo requieren de capacitaciones a los colaboradores e inversión de tiempo. Para la aplicación de las prácticas objetivas de la metodología se requiere de la implementación de ensayos no destructivos, donde es indispensable la compra de los equipos que permitan realizar las prácticas.

Tabla IV. **Presupuesto del proyecto**

VISITA A PLANTA	COSTO POR VISITA (Q)	COSTO TOTAL (Q)
Depreciación del vehículo	8,00	720,00
Combustible	90,00	8 100,00
Peaje	30,00	2 700,00
Alimentación	13,00	1 170,00
Imprevistos	50,00	4 500,00
Total de visitas		17 190,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Costo de equipo para los ensayos no destructivos**

EQUIPO	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (Q)	TOTAL (Q)
Análisis de vibraciones (vibrómetro PCE-VT 250)	1	14 900,00	14 900,00
Análisis <u>termográfico</u> (chamarra de termográfico CA 1888-1500)	1	88 426,00	88 426,00
Total de la inversión			103 326,00

Fuente: elaboración propia.

BIBLIOGRAFÍA

1. Albarracín D., S. (2008). Elaboración de un manual de producto para el área de laminación de Fundial LTDA. Memoria para optar por el Título de Especialista en Gerencia Estratégica, Instituto de Postgrados Especialización en Gerencia Estratégica Chia, Cumdinamarca, Colombia.
2. Bojorquez D. Gilberto, Rivera M. José, Chacón M. Mario, Carillo R. Mariano, (2006). Diseño de un sistema para análisis de las vibraciones mecánicas como método de mantenimiento predictivo en máquinas rotativas. *Revista de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación, Vol. 2, No. 1, Sonora México*. Obtenido de <http://www.itson.mx/publicaciones>.
3. Camurri, C., Carrasco C., Salazar, A. (2007). Disminución del desgaste de pases en un laminador de barras. Ponencia presentada en el Congreso SAM/CONAMET 2007, San Nicolás, Chile.
4. FAG Sales Europe , Averías de los rodamientos, reconocimiento de daños e inspección de rodamientos. *No. publicación. WL 82 102/2 SB, FAG Sales Europe GmbH – España*. Obtenido de <http://www.fag.com>.
5. Garabito, J. (2008). Laminación Protocolo Curso de Materiales. Facultad de Ingeniería Industrial Laboratorio de Producción, Colombia.
6. Heinrich S., K. (2003). Descripción básica de los fundamentos mecánicos de los cilindros de laminación.

7. Labaien, E., Carrasco, G. (2009). Mantenimiento predictivo, curso sobre mantenimiento predictivo y sus distintas técnicas de aplicación. Obtenido de: <http://www.coiig.com>.
8. Madías, J. (2009). Avances recientes en la laminación de productos largos. Ponencia presentada, Acero Latinoamericano, Argentina. Obtenido de <http://www.construccionenacero.com>.
9. Maneiro, A. (2010). Evaluación del método de trabajo en el área del taller de montaje de cajas de laminación adscrito a la gerencia de barras y alambro en siderurgia del Orinoco, (Sidor, C. A.), Milarys Gil Alcalá.
10. Muñoz, H. A. (2012). Manual del acero Gerdau Diaco para construcciones sismo resistentes. Tercera edición, Tuta, Colombia. Obtenido de: <http://www.gerdau.com.co>.
11. Nieto G. H. (2011). Modelo de optimización para el mantenimiento proactivo de los equipos críticos de un tren de laminación en frío basado en RCM. Memorial para optar Título de Especialista en Gerencia de Mantenimiento, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Obtenido de <http://www.repositorio.uis.edu.co>.
12. Olarte, W., Botero, M., Cañón, B. (2010). Técnicas de mantenimiento predictivo utilizadas en la Industria. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal Sistema de Información Científica, Vol. XVI, núm. 45, agosto, 2010*. Universidad Tecnológica de Pereira Colombia. Obtenido de: <http://www.revistas.utp.edu.co/index.php>.

13. Pintor, J. (2006). Influencia del comportamiento no lineal de cojinetes hidrodinámicos en la dinámica de rotores flexibles. Modelización matemática del sistema rotor-cojinete. Obtenido de: <http://www.imac.unavarra.es>.
14. Schaeffler Group (2011). Industrial. Rodamiento FAG en ampuestas de laminación. Obtenido de: <http://www.schaeffler.com>.
15. Schaeffler Iberia. (2011). Soluciones de rodamientos para laminadores. Obtenido de: <http://www.schaeffler.es>.
16. Veles Restrepo J. M., Suárez Bustamante. (2011). Influencia de texturas superficiales acondicionadas en el desempeño de cojinetes planos operando en condiciones HL. Obtenido de: <http://www.journals.unam.mx>.

