

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



**“DESGASTE DE RODILLOS DE TRABAJO DURANTE LA LAMINACIÓN EN
FRÍO DE ACEROS PLANOS”**

POR

DIEGO ARTURO ARANDA REGINO

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

DICIEMBRE, 2018

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**“DESGASTE DE RODILLOS DE TRABAJO DURANTE LA LAMINACIÓN EN
FRÍO DE ACEROS PLANOS”**

POR

DIEGO ARTURO ARANDA REGINO

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN, MÉXICO

DICIEMBRE 2018

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis "**Desgaste de rodillos de trabajo durante la laminación en frío de aceros planos**", realizada por el Ing. Diego Arturo Aranda Regino con número de matrícula 1646324, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales.

El Comité de Tesis



Dr. Luis Leduc Lezama
Director



Dr. Rafael Mercado Solís
Revisor



Dr. Jorge Ramírez Cuellar
Revisor

Vo. Bo.



Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado



San Nicolás de los Garza, Nuevo León
Diciembre 2018

DEDICATORIA

A mi madre Magaly y mi hermano Uriel por haberme apoyado incondicionalmente en todo momento.

A mi futura esposa Yameli por su paciencia, confianza, amor y motivación que fueron claves en mi vida personal y profesional.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi alma mater, la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) y a su Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME) por ser mi segunda casa durante más de 6 años y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado para realizar mis estudios de maestría.

A mis asesores académicos Dr. Luis Leduc y Dr. Rafael Mercado por haberme permitido formar parte de su grupo de investigación y por su constante orientación y enseñanza.

A la empresa Ternium por abrirme sus puertas y facilitarme las herramientas y recursos necesarios para el desarrollo de esta tesis.

A todo el personal de Ternium que me apoyó durante mi estancia en la empresa, especialmente a Jorge Salinas, Mauricio Casas, Jorge Ramírez, Carlos Gómez, Fernando Rodríguez y a todo el personal operativo del taller de rodillos de la planta de Pesquería N.L.

A mis compañeros de estudio por brindarme su valiosa amistad.

Pero principalmente a Dios por darme la felicidad, salud y estabilidad que permitieron que hoy concluya esta etapa de mi vida.

INDICE

1.INTRODUCCIÓN	1
1.1 Descripción del problema.....	1
1.2 Objetivo	1
1.3 Justificación	2
1.4 Hipótesis	2
1.5 Resumen.....	2
2.LAMINACIÓN	4
2.1 Introducción	4
2.2 Antecedentes históricos de la laminación.	4
2.3 Laminación en Frío	5
2.4 Diferencias entre laminación en frío y caliente.....	5
2.5 Molino de laminación	6
3. RODILLOS DE TRABAJO	15
3.1 Introducción	15
3.2 Composición química de los rodillos de trabajo	15
3.3 Proceso de fabricación de rodillos de trabajo.....	16
3.4 Contacto Rodillo de trabajo-Lamina	18
3.5 Shifting	20
4.TRIBOLOGÍA	23
4.1 Introducción	23
4.2 Desgaste	23
4.3 Lubricación	28
4.4 Fricción.....	29
5. FATIGA DE METALES	33
5.1 Introducción.....	33
5.2 Mecanismo de fractura por fatiga.	33
5.3 Fracturas por fatiga en rodillos de trabajo.....	34
6. DUREZA	37
6.1 Introducción.....	37
6.2 Ensayos de medición de dureza en metales	37

7. CONCEPTOS ESTADÍSTICOS	42
7.1 Varianza.....	42
7.2 Desviación estándar	42
7.3 Covarianza	42
7.4 Coeficiente de correlación	42
7.5 Matriz de correlaciones	42
7.6 Estudios R&R.....	43
7.7 Seis sigma (6 σ)	43
7.8 Coeficiente de variación	44
8. LAMINACIÓN EN FRÍO TERNIUM PESQUERÍA	45
8.1 Conceptos básicos.....	45
8.2 Ruta de rodillo de trabajo PLTCM-Taller de rodillos.....	47
8.3 Proceso de rectificado	49
8.4 Aceros producidos en Ternium Pesquería.....	51
8.5 Características físicas de rodillos de trabajo	53
9. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	55
9.1 Introducción.....	55
9.2 Extracción de datos de PLTCM.	55
9.3 Extracción de datos del taller de rodillos.	56
9.4 Mediciones físicas de dureza de los rodillos de trabajo.....	57
9.5 Conformación de base de datos general.....	61
9.6 Caracterización microestructural de rodillo de trabajo.....	63
9.7 Modificación de proceso de rectificado.....	65
9.8 Desarrollo de modelo matemático	66
10. RESULTADOS	67
10.1 Estudio R&R.....	67
10.2 Mediciones de dureza “por pase”	68
10.3 Base de datos general	70
10.4 Análisis de base de datos general	73
10.5 Caracterización microestructural de rodillo de trabajo.....	80
11.6 Modificación de proceso de rectificado.	84
11.7 Desarrollo de modelo matemático.....	85
11. DISCUSIÓN	86

11.1 Correlación KmL - $\Delta HPLTCM$	86
11.2 Correlación Dureza por zona - Shifting	86
11.3 Profundidad radial - <i>Hb ave</i>	87
11.4 Correlación <i>Hb ave</i> – número de castillo	87
11.5 Correlación número de castillo – Esfuerzo promedio σ	88
11.6 Correlación $\Delta HPLTCM$ – Esfuerzo promedio σ	88
11.7 Correlación $\Delta Hrectificadora$ – Esfuerzo promedio σ	89
11.8 Correlación Reducción de espesor (<i>tr</i>) - $\Delta H PLTCM$	89
11.9 Medición de dureza por pase	90
11.10 Caracterización microestructural de rodillo de trabajo.....	94
11.11 Modificación de proceso de rectificado.	95
11.12 Desarrollo de modelo matemático	96
12. CONCLUSIONES.	97
13. GLOSARIO	99
14. ANEXOS	102
15. REFERENCIAS	114

1.INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del problema

La laminación en frío actualmente es un proceso muy importante en la producción mundial de acero, y aunque por años ha sido estudiado, la demanda de productos elaborados por este proceso exige su permanentemente optimización para obtener aceros de cada vez mejor calidad de acuerdo con sus diversas aplicaciones.

En un molino de laminación en frío, un elemento primordial son los rodillos de trabajo (WR), ya que tienen la función directa de deformar los productos o láminas que pasan entre ellos. Es fundamental un control adecuado de su calidad ya que de eso depende obtener acero con las especificaciones requeridas. Después de una campaña, un rodillo de trabajo termina desgastado por diversos factores y su perfil no es uniforme en toda su superficie, por lo que es necesario rectificar o remover la zona desgastada para que el rodillo pueda entrar a una nueva campaña de laminación sin alterar la planicidad del producto.

El proceso de rectificado de los rodillos de trabajo desgastados en Ternium, aunque consigue su objetivo principal (que es obtener rodillos con perfil uniforme), no considera un gran número de variables necesarias para determinar el grado de rectificado óptimo, lo que ocasiona que se le remueva al rodillo más material del necesario, esto finalmente se traduce en reducción del tiempo de vida útil de los rodillos de trabajo.

Es viable y remunerable para la industria siderúrgica laminadora en frío conocer los factores que inciden en el desgaste de los rodillos de trabajo para optimizar este tipo de procesos.

1.2 Objetivo

La determinación del grado de rectificado de un WR debe estar en función de variables que intervienen en el desgaste del rodillo durante la campaña tales como el tipo de acero laminado, la cantidad de kilómetros laminados durante la campaña, el esfuerzo al que es sometido el rodillo, su dureza, etc. El objetivo principal de este trabajo es desarrollar un modelo capaz de determinar las relaciones entre cada una de dichas variables para finalmente calcular un valor que describa el desgaste del WR y en base este valor determinar el grado de rectificado óptimo para cada rodillo después de su respectiva campaña.

El desarrollo de este modelo dependerá de la obtención de una base de datos del proceso donde se conjuntan datos del molino de laminación, y del taller de rodillos, una vez obtenida la base de datos, se buscarán correlaciones entre las variables y datos que la conforman. Estas correlaciones nos darán una idea de qué datos se considerarán para incluirlos como variables independientes y dependientes en el modelo.

1.3 Justificación

El desarrollar este modelo tendrá un impacto directo en la reducción de tiempo de trabajo durante el proceso de rectificado de rodillos, la reducción de incidentes (como reventones o patinamiento) durante la campaña de laminación en frío, y el incremento del tiempo de vida útil de los rodillos de trabajo.

Hacer las mencionadas modificaciones al proceso significará reducir consumos de rodillos y por ende ahorros económicos importantes para la empresa. Por dicha razón se considera este trabajo de gran interés tecnológico para la industria siderúrgica.

Además, se explicarán a detalle los mecanismos de desgaste y fatiga de rodillos de trabajo durante la laminación en frío de aceros lo que representa un aporte científico importante.

1.4 Hipótesis

En el proceso de laminación en frío un factor importante para que exista el desgaste en los rodillos de trabajo es el “shifting” de los rodillos intermedios. La relación entre la posición del rodillo de trabajo y el intermedio, la fatiga Hertziana que existe en su contacto relativo durante una campaña y la cantidad de kilómetros de acero laminados son las principales variables a considerar para desarrollar un modelo que describa el desgaste generado.

1.5 Resumen

La presente investigación busca definir, describir y predecir el desgaste de los rodillos de trabajo durante la laminación en frío de aceros planos, con el fin de desarrollar un modelo que permita optimizar el proceso de rectificado de rodillos después de su campaña.

Se describen los mecanismos de desgaste que se presentan o pueden presentar en los rodillos de trabajo durante su campaña de laminación en frío, las variables más relevantes presentes en estos mecanismos, los factores externos y los procesos que de alguna forma están involucrados con las propiedades del rodillo desde su fabricación hasta su fin de vida útil.

Considerando estos factores, se implementaron una serie de técnicas estadísticas, computacionales y científicas para recabar información sobre el proceso de laminación, el proceso rectificado y las propiedades del rodillo de trabajo para conformar una base de datos que incluyó un conjunto de variables seleccionadas estratégicamente.

La selección de las variables, la recabación de los datos y la interpretación de algunos factores, permitieron realizar un análisis estadístico que mostró las relaciones entre dichas variables. Estas relaciones son información relevante para la determinación de un criterio óptimo de rectificado que elimine prácticas

indeseadas, que aumente la vida útil de los rodillos y que en consecuencia reduzca los gastos de operación y consumo de rodillos de trabajo en laminación en frío.

Finalmente se presentan los resultados con las correlaciones más fuertes entre variables y se explica desde un punto de vista científico su causa raíz. También se propone un modelo que describe el desgaste de los rodillos de trabajo durante su respectiva campaña de laminación y se presenta el resultado de su implementación en la planta de Ternium México en Pesquería N.L, donde se desarrolló esta investigación.

Es importante mencionar que previo a este trabajo se realizó una investigación referente al tema de desgaste de rodillos de trabajo en laminación en frío de aceros, esta investigación fue desarrollada y registrada en un reporte académico que representó un gran aporte para la presente tesis. Dicho reporte está disponible para su consulta en la dirección web mencionada en la sección de referencias (15). [43]

2.LAMINACIÓN

2.1 Introducción

En este capítulo se describirán algunas características del proceso de laminación de aceros, pero antes de entrar de lleno este amplio tema es necesario definirlo como tal. La laminación forma parte de una de una cadena de procesos para la producción de acero que van desde la extracción de minerales de hierro de las minas hasta la fabricación de coches, electrodomésticos, etc. Cuando se busca moldear un producto semielaborado de acero para reducir su espesor, se hace pasar entre dos rodillos que giran en dirección opuesta entre sí. Estos rodillos tienen la función de comprimir el material para deformarlo y reducirlo de un espesor inicial hasta un espesor final predeterminado. Al proceso de reducción de espesor por medio de un par de rodillos se le llama laminación.

2.2 Antecedentes históricos de la laminación.

En la actualidad no se tiene la certeza de cuándo fue la primera vez que se laminó un metal, pero casi podemos asegurar que los primeros metales laminados debieron tener la suficiente ductilidad para trabajarse a temperatura ambiente ya que no se tiene registro de hornos o muflas en la época en que las primeras joyas u obras de arte fueron laminadas. Sin embargo, la primera vez que alguien documentó la idea de pasar un metal entre un par de rodillos para reducir su espesor fue en el año 1480 cuando el gran científico y artista Leonardo Da Vinci diseñó el boceto de un pequeño molino laminador en frío que producía láminas de plomo. No hay evidencia de que este molino se haya construido alguna vez, pero podemos asegurar que el laminado de metales no tenía ninguna importancia antes de mediados del siglo dieciséis. Los bocetos dibujados por da Vinci actualmente se encuentran en el museo de museo Leonardo, ubicado en el medieval Castello Guidi, construido en el siglo XI en la ciudad de Vinci, a unos 30 km de Firenze. [1,2]



Figura 2.1 Primer boceto de molino laminador en frío, autor: Leonardo Da Vinci

A mediados del siglo XVI en Europa hubo indicios de usar molinos laminadores en frío para conseguir ciertos espesores sobre todo en chapas de oro, por ejemplo, en 1553 francés llamado Brulier laminó oro y plata para obtener un grosor uniforme para fabricar monedas, aunque todos estos procesos hasta ese entonces modernos se limitaban a deformar materiales blandos y a temperatura ambiente. Fue hasta finales del siglo XVII cuando aparecen los primeros molinos laminadores en caliente, no se puede asegurar el país donde se empezaron a usar, pero sin duda el país que tomó más importancia a la laminación de metales fue Inglaterra. [2]

El proceso de laminación moderno apareció hasta 1783, fue en este año cuando se le da la patente en Inglaterra a Henry Cort por utilizar rodillos acanalados para barras de hierro laminadas. Un molino con rollos de este diseño podría producir al menos 15 veces la producción por día obtenible con un martillo de inclinación. Este solo hecho justifica llamar a Cort "padre de la laminación moderna". [1]

El aporte de Cort es considerado un parteaguas en la historia de la laminación ya que ocurrió justo antes de la revolución industrial, justo cuando la industria exigía cada vez más acero para la construcción de máquinas y el desarrollo de la industria en general. Durante la revolución industrial hubo incontables mejoras a los molinos de laminación que este documento no pretende abarcar, pero gracias a estos avances hoy en el mundo hay una gran gama de láminas de diferentes espesores gracias a la variedad de molinos instalados en las plantas siderúrgicas.

2.3 Laminación en Frío

La laminación en frío recibe ese nombre cuando la pieza que pasa entre los dos rodillos para ser deformada está a una temperatura por debajo de su punto de recristalización. Como es sabido, cuando un metal es deformado a estas temperaturas se generan dislocaciones en su estructura atómica y se reduce el tamaño de grano lo que se traduce en más dureza y mayor límite elástico de la pieza.

Este tipo de laminación resulta ser costosa y laboriosa ya que se necesita mucha energía para lograr deformar un material a bajas temperaturas, aunque es mucho menos riesgoso y se trabaja mucho más rápido además uno de los principales beneficios de laminar el acero por este procedimiento es que se tiene un control más preciso del espesor final de la lámina y una calidad superficial considerablemente mejor que en otro tipo de procesos de formado.

2.4 Diferencias entre laminación en frío y caliente

A pesar de que se tiene la idea la laminación en frío y caliente como dos procesos completamente diferentes, la realidad es que la mayoría de las veces la laminación en frío suele complementar a la laminación en caliente como un proceso posterior.

La primer gran diferencia entre la laminación en frío y caliente es la temperatura del material que se va a laminar, en el caso de la laminación en frío la pieza se trabaja a temperaturas menores a la de recristalización del material que es aproximadamente $0.6T_m$ donde T_m es igual a la temperatura de fusión, mientras que en la laminación en caliente la pieza se trabaja por encima de la temperatura de recristalización. [3]

Cuando se lamina en caliente generalmente se busca transformar lingotes o planchones en formas con menor espesor como barras, hojas o cintas. En este proceso el lingote o planchón de acero se calienta en hornos hasta superar la temperatura de recristalización y posteriormente se somete a velocidades de deformación cercanos a $500s^{-1}$. Esta velocidad de deformación combinada con la temperatura de trabajo ocasiona que la recristalización del metal se dé simultáneamente con su deformación. [5]

El proceso de laminación en frío a diferencia del caliente busca reducir el espesor de cintas o láminas a dimensiones específicas y tolerancias muy estrechas, en la mayoría de los casos en las plantas acereras del mundo, este proceso viene precedido de un laminado en caliente. Además de reducir el grosor de la lámina por más del 90% en algunos casos, el laminado en frío aumenta la dureza del material final ya que reduce su tamaño de grano y atómicamente se generan dislocaciones por trabajado.

Es importante mencionar que al trabajar con aceros a temperaturas mayores a $0.6T_m$, como es el caso de la laminación en caliente, es inevitable encontrarnos con el problema de la generación de capas de óxidos superficiales en las piezas de trabajo por lo que cuando se va a pasar de un laminado en caliente a frío es necesario realizar un decapado con ácido clorhídrico antes de que la pieza entre al molino laminador en frío. [6]

2.5 Molino de laminación

Hemos mencionado en este documento que el proceso de laminación consiste en hacer pasar una pieza de trabajo entre dos rodillos. Para que la laminación exista es necesario que los rodillos estén en movimiento para ocasionar la deformación en la pieza. Estos rodillos están accionados por motores que se acoplan en uno de sus extremos y en el extremo opuesto debe haber un rodamiento que le permita girar libremente. El motor, los rodamientos y los rodillos deben estar montados sobre una base sólida que los mantenga fijos y alineados entre sí, a esta base se le llama comúnmente castillo o stand de laminación. Si se tiene un motor girando los rodillos será necesario también un controlador para variar la velocidad del sistema. Al conjunto de controlador, motor, rodillos y rodamientos instalados sobre un castillo se le conoce como molino de laminación. [8]

Para la producción en masa es común colocar un molino enseguida de otro en forma de tándem como el que se muestra en la figura 2.2 donde a cada set de rodillos se le llama stand o castillo: [7]

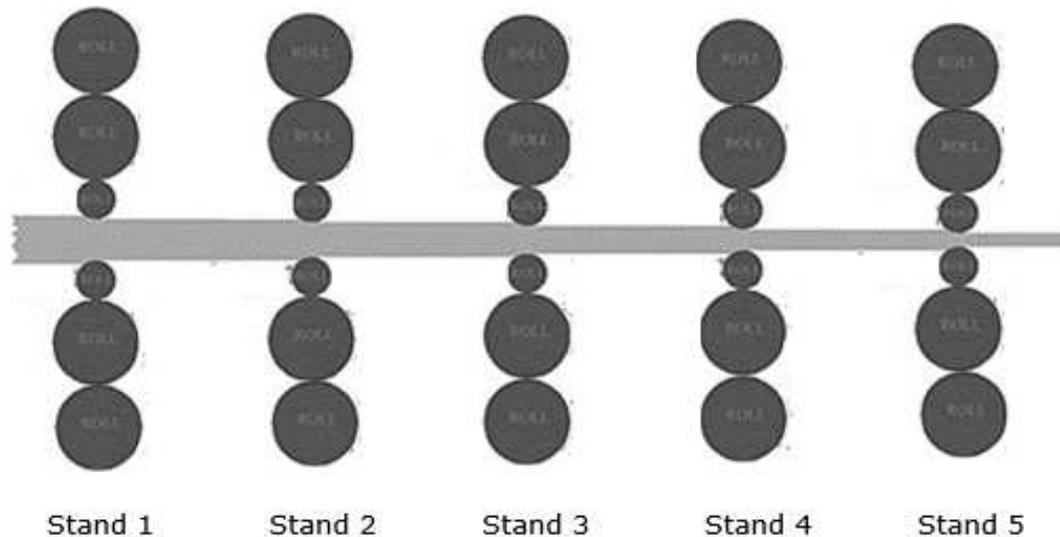


Figura 2.2 Molino tipo tándem con 5 stands [7]

En una instalación tipo tándem se vuelve de crucial importancia la sincronización de cada stand tomando en cuenta que el grosor de la lámina va disminuyendo de stand en stand y por lo tanto también su velocidad. Al inicio y final del tándem comúnmente se colocan enrolladoras que tienen la función de enrollar la lámina antes y después del proceso con el fin de ahorrar espacio y en algunas ocasiones ejercer tensión en la lámina durante la campaña de laminación.

2.5.1 Clasificación de molinos de laminación

Existe una gran variedad de molinos de laminación diseñados y fabricados en el mundo, tanto que si tratamos de enumerar todos los existentes en este documento sería una tarea casi imposible, ya que las configuraciones en su diseño son casi infinitas. A continuación, se presenta una clasificación muy general de algunas de las más comunes, aunque siempre se debe tomar en cuenta que no son ni cerca las únicas existentes.

Podemos empezar clasificando los molinos de la siguiente manera:

-Por el diámetro de rodillos: Por ejemplo: molino de 14", molino de 22", molino de 130".

-Por los productos laminados: Según el producto que sale del molino después de ser laminado como molino de tira, molino de barras, molino de alambrón, molino de placa, etc.

-Por diseño: Cuando los clasificamos por diseños prácticamente nos referimos a la configuración o acomodo de sus rodillos. [8] Esta última clasificación suele ser la más común y tiene una enorme cantidad de variantes. Algunos ejemplos de típicas configuraciones son: [7]

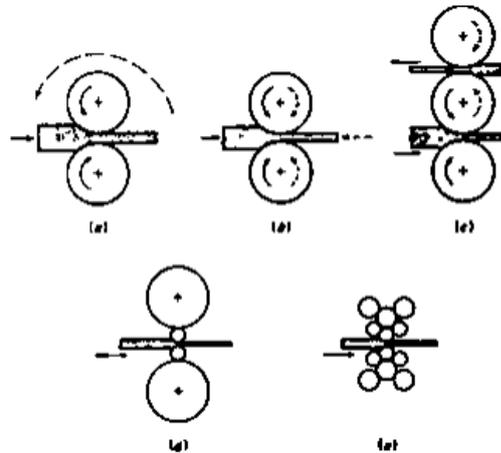


Figura 2.3 Clasificación de molinos de laminación según su configuración. [7]

- a) Molino 2-high pull-over: Consta de 2 rodillos motorizados que giran en direcciones opuestas entre sí y todo el proceso se mantiene en este sentido, por lo general la lámina después de pasar entre ellos suele ser llevada de nuevo a la entrada para reiniciar el proceso.
- b) Molino 2-high reversible: Es la misma configuración que un molino 2-high pull-over con la diferencia que los rodillos pueden cambiar de dirección durante el proceso y, por ende, la lámina también.
- c) Molino 3-high: Está conformado por 2 rodillos motorizados (superior e inferior) y uno intermedio que gira gracias a la fricción con el material laminado. Con esta configuración es posible laminar en ambas direcciones 2 piezas simultáneamente con rodillos unidireccionados.
- d) Molino 4-high: Esta configuración es muy interesante y surge debido a la necesidad de reducir el área de contacto entre rodillo de trabajo-lámina para aumentar la presión sobre la lámina y conseguir espesores notablemente más pequeños, lo que llevó a usar rodillos cada vez con menor diámetro. Para contrarrestar la inminente flexión de los delgados rodillos se optó por colocar en los extremos superior e inferior del molino rodillos que la evitaran. A estos rodillos se les conoce como rodillos de apoyo.
- e) Molino clúster: Como se muestra en la imagen en molino clúster es un arreglo complejo de rodillos donde el rodillo de trabajo está soportado por más de un rodillo de apoyo. En comparación a otro tipo de configuración, es posible tener rodillos de trabajo muy pequeños y, por ende, se consiguen espesores de lámina diminutos. [7]
- f)

2.5.2 Molino 6-High

El molino en el que se basará esta investigación es el molino 6-High y por eso se dedicará esta sección exclusivamente a describir su funcionamiento, sus componentes y su utilidad.

Un molino 6-High como su nombre lo indica es un arreglo de 6 rodillos acomodados en forma vertical, sus principales componentes son un par de

rodillos de trabajo, un par de rodillos intermedios y un par más de rodillos de apoyo. Los componentes mencionados serán descritos a continuación:

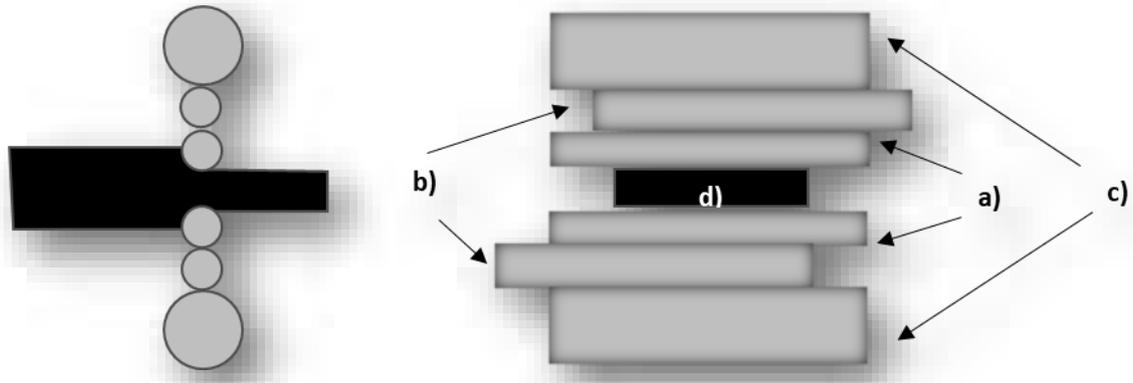


Figura 2.4 Componentes de molino 6-High

- a) Rodillos de trabajo: Son los rodillos que tienen contacto directo con la lámina, por lo tanto, son los responsables directos de su deformación, hay un rodillo de trabajo inferior y uno superior y ambos están acoplados a un motor que los hace girar a una misma velocidad controlada y en sentido opuesto entre ellos. La lámina se hace pasar entre los dos rodillos de trabajo que le ejercen una fuerza de compresión deformándola plásticamente. Los rodillos de trabajo también tienen contacto con los rodillos intermedios y por medio de fricción los obligan a girar a su misma velocidad.
- b) Rodillos intermedios: Están colocados entre los rodillos de trabajo y los rodillos de apoyo. No están motorizados, giran gracias a la fricción que existe en su contacto con los rodillos de trabajo. También tienen contacto con los rodillos de apoyo y por fricción los hacen girar. La función principal de los rodillos intermedios en un molino 6-High es, por medio de su desplazamiento horizontal o shifting, asegurar un espesor uniforme a lo ancho de la lámina, además de asegurar la rectitud del rodillo de trabajo evitando su flexión. El shifting será explicado a detalle en secciones posteriores.
- c) Rodillos de apoyo: Suelen tener un diámetro mayor al de los rodillos intermedios y desde luego, a los de trabajo. Su función es asegurar la rectitud de los demás rodillos. Giran gracias a la fricción que se genera en el contacto con los rodillos intermedios ya que no están motorizados. En un molino 6-High están colocados en los extremos superior e inferior del arreglo de rodillos.
- d) Pieza de trabajo: Es la pieza que se está laminando, es deformada plásticamente por su contacto con los rodillos de trabajo por lo que su espesor es reducido cuando pasa por entre ellos, además su longitud aumenta y por lo tanto, su velocidad de salida del molino con respecto a la de entrada.

2.5.3 Dimensiones y relaciones de un molino laminador

La primera consideración que se debe de tener al diseñar un molino de laminación es sin duda su ancho, esta dimensión se establece por el máximo ancho de la lámina que se va a producir, por lo general el molino se diseña más ancho que este valor. En cuanto a los diámetros de los rodillos de trabajo y de apoyo, se seleccionan a partir primeramente del material que se tiene planeado laminar, la reducción de espesor máxima que se busca conseguir en la lámina y las condiciones de enfriamiento de los rodillos. Cuando necesitamos conseguir espesores de lámina demasiado delgados buscamos reducir el diámetro de los rodillos de trabajo con el fin de reducir su área de contacto con la lámina, y teniendo rodillos de menor diámetro con más facilidad se pueden flexionar y deformar plásticamente, esto lo contrarrestamos con rodillos intermedios y de apoyo de gran diámetro capaces de resistir los esfuerzos cortantes, de flexión y de tensión sin deformarse y que aseguren la rigidez de los rodillos de trabajo.

Las dimensiones de un molino laminador están directamente relacionadas con la fuerza de laminación y el espesor de la lámina. Polukhin y sus colaboradores estudiaron algunas relaciones de dimensiones en los rodillos que generaran una uniformidad de la fuerza de laminación a lo ancho del molino a la que denominaron (F_l). Un par de ejemplos son el ancho del molino (L) y la relación de diámetros del rodillo de trabajo y rodillo de apoyo (D / D_B). Es importante mencionar que estos estudios se hicieron para un molino 4-High, aunque se considera un gran aporte ya que es fácil extrapolarlos a un molino con otra configuración. Los resultados arrojaron que hay un ancho de lámina óptimo para cada relación de diámetros en un molino de este tipo, donde la fuerza de laminación es distribuida uniformemente en todo lo ancho de la misma. [2]

Polukhin nos describe también que el gap entre rodillos de trabajo puede distribuirse de 3 maneras, uniformemente como sugiere su relación, con más presión en el centro de los rodillos y con máximos en los bordes de la lámina. En la figura 2.5 se muestra la gráfica que sugiere Polukhin para saber en cuál de las 3 maneras se está distribuyendo la presión en gap de los rodillos de trabajo en un molino 4-high en base a las relaciones de sus dimensiones. Se observa una superficie tridimensional, si la relación de las dimensiones forma dicha superficie se dice que la distribución de presión en el gap es uniforme, si se está por debajo de la superficie se dice que tenemos concentración de esfuerzos justo en el centro del gap y si se está por encima hay más presión en los bordes de la lámina. [2]

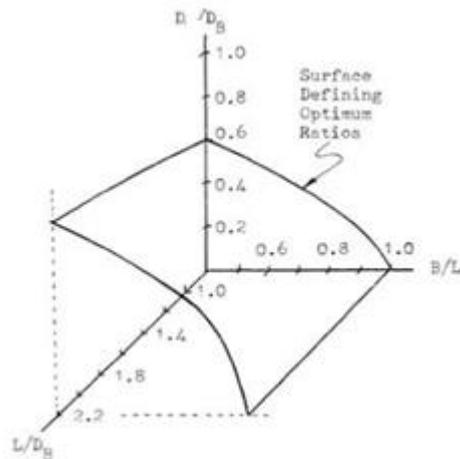


Figura 2.5 Gráfica de Polukhin para relación de dimensiones [2]

La relación óptima que sugiere Polukhin entre el diámetro de rodillos de trabajo y de apoyo se pueden observar en la figura 2.6, dicha figura grafica las relaciones dimensionales en los molinos instalados en EUA a mediados del siglo pasado y se observa que para rodillos de apoyo con diámetro de entre 1250-1420 mm se usan comúnmente rodillos de trabajo con diámetros en el rango de 450-610 mm por lo que Polukhin considera que relación B / L debe variar de 0.23 a 0.95.

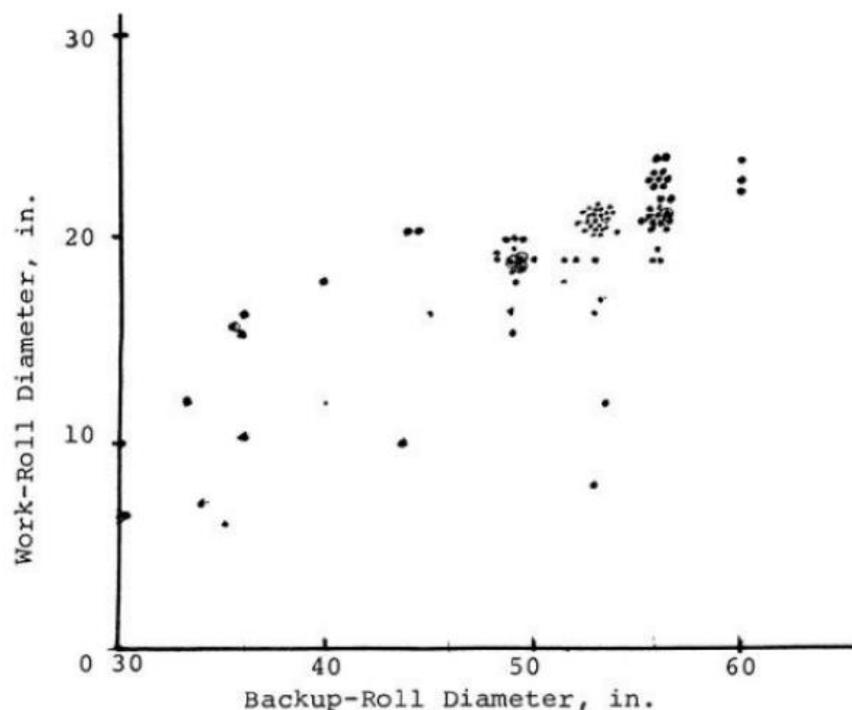


Figura 2.6 Gráfica de relaciones de diámetro de rodillos de apoyo y WR. [2]

2.5.4 Proceso de fabricación de rollos de acero laminados en frío.

Como ya se mencionó en la sección 2.4, los procesos de laminación en frío y caliente típicamente se complementan para transformar una barra de acero o

planchón en un rollo laminado en frío, en la figura 2.7 se observa el proceso típico en la industria siderúrgica para esta transformación y después se describe detalladamente. [23]

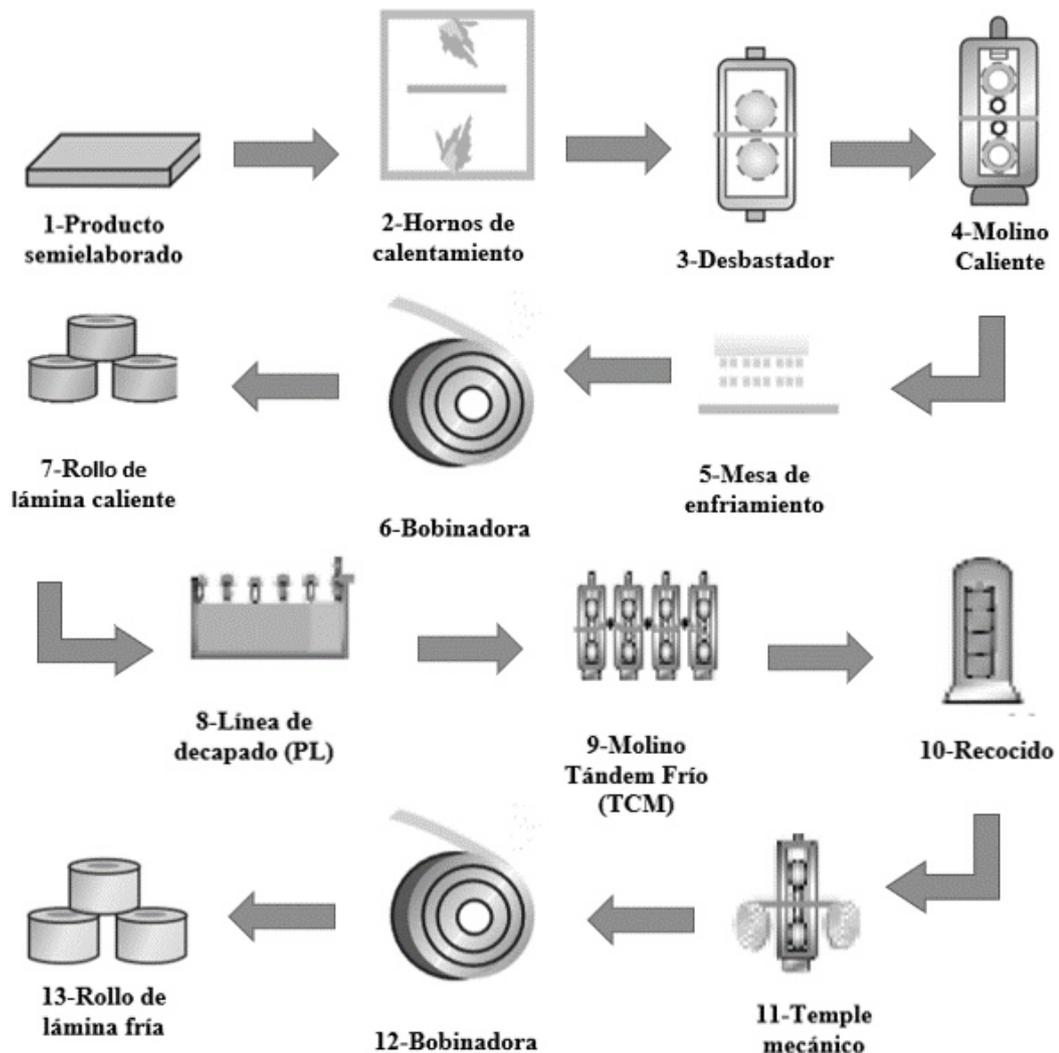


Figura 2.7 Proceso de fabricación de rollos de acero laminados en frío.[23]

1. Producto semielaborado:

La barra de acero antes de ser deformada por algún proceso de laminación, en la industria siderúrgica se le llama producto semielaborado. Para el caso de la laminación plana, se le llama planchón. Los planchones tienen un área transversal rectangular de aproximadamente 200mm de espesor (dependiendo del proceso) y generalmente es formado por medio de colada continua.

2. Hornos de calentamiento:

Los planchones entran a un horno de capacidad de calentamiento de entre 300 y 500 ton/hora hasta alcanzar una temperatura superior a los 1200°C. El tiempo de calentamiento de un planchón varía entre 120 y 140 minutos, según el material y sus dimensiones.

3. Desbastador:
El proceso previo al molino caliente es el desbaste. Consiste en reducir el espesor del planchón de 200 a aproximadamente 30 mm haciéndolo pasar entre rodillos que ejercen fuerzas de compresión para conseguir dichos espesores. Otra función del desbastador es asegurar un ancho de planchón constante, esto se controla gracias a rodillos horizontales cantadores. Cuando el planchón sale del desbastador se encuentra a una temperatura que ronda los 1080°C.
4. Molino caliente:
Se hace pasar el planchón desbastado por el molino caliente que típicamente consta de 5 o 6 stands, en cada stand se reduce su espesor hasta que en el stand final el planchón alcanza dimensiones de 1.5 a 12mm. La temperatura del planchón laminado a la salida del stand final del molino generalmente está por encima de los 850°C. Después de ser laminado en caliente en el molino, al planchón deformado se le llama lámina caliente.
5. Mesa de enfriamiento:
Una vez obtenido el espesor deseado, se procede a enfriar la lámina por medio de agua en forma de flujo laminar a baja presión, con un caudal controlado automáticamente en función de parámetros de laminación, por ejemplo, temperatura de acabado y de enrollado, velocidad de laminación, etc.
6. Bobinadora:
Consiste en enrollar la lámina caliente de forma compacta, para posteriormente ser colocada en patios de enfriamiento por un periodo un poco mayor a las 48hrs, hasta llegar a temperatura ambiente.
7. Rollo de lámina caliente:
El resultado final del proceso de laminación en caliente son los rollos de lámina caliente, los cuales pueden ser usados de manera directa según la aplicación o ser sometidos a otros procesos de deformación, en este caso, la laminación en frío.
8. Línea de decapado (PL):
Durante el enfriamiento del material laminado en caliente, se produce una oxidación sobre su superficie. Para asegurar calidad y planeza de la lámina fría para algunos usos es necesario remover este óxido a la lámina caliente antes de que entre al TCM, esta remoción se hace por medio del decapado. La lámina caliente pasa por tanques sellados que contienen soluciones de ácido clorhídrico en agua, en concentraciones variables, a una temperatura de aproximadamente 90°C. Estas soluciones atacan a los óxidos de la lámina, produciendo una reacción química que los desprende.
9. Molino Tándem Frío (TCM)
El objetivo del TCM (Tándem Cold Mill) es disminuir los espesores de la lámina caliente entre un 40% y un 90% obteniendo también mayor uniformidad de espesor y mejor planicidad. El proceso se efectúa a temperatura ambiente, por lo tanto, la estructura del material luego del laminado queda deformada y el material es duro y frágil. (Este proceso

es explicado detalladamente en las secciones 2.3 y 2.5). La lámina caliente, después de ser deformada en frío en el TCM se le llama lámina fría.

10. Recocido

El objetivo del proceso de Recocido es regenerar en la lámina fría el grano deformado en el TCM, otorgándole al material las propiedades mecánicas requeridas para su uso final. La lámina fría se calienta a una temperatura cercana a la temperatura de recristalización ocasionando una regeneración de la estructura atómica de la lámina. La temperatura y el tiempo aplicados en este proceso están definidos por un ciclo que responde a una curva de temperatura-tiempo representada en la figura 2.8.

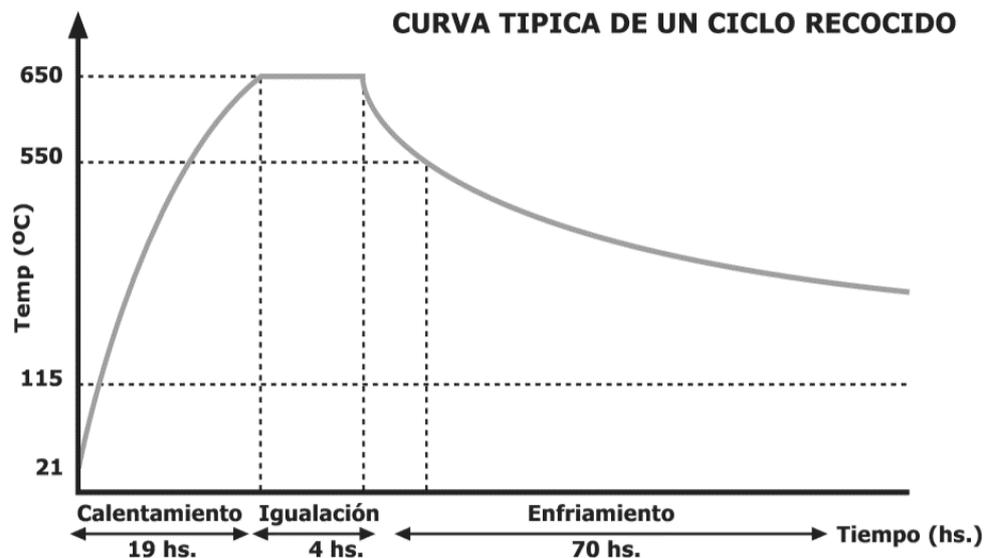


Figura 2.8 Curva típica temperatura- tiempo del ciclo de recocido. [23]

11. Temple mecánico

El objetivo principal del proceso de temple es eliminar de la lámina recocida la zona de fluencia discontinua característica de la mayoría de los aceros de medio y bajo carbono sin la formación de Bandas de Lüder. La lámina fría pasa por un molino templador y mediante esfuerzos combinados de compresión y tracción, se logra la eliminación de la zona de fluencia discontinua. El molino de templado es un conjunto de rodillos motorizados por donde pasa la lámina (produciendo una reducción mínima del aproximadamente un 1%).

12. Bobinadora

Una vez tratada térmica y mecánicamente, la lámina se enrolla por medio de una mandril.

13. Rollo de lámina fría

El producto final y listo para ser comercializado son los rollos de la lámina fría que finalmente se usan en aplicaciones automotrices principalmente. En algunos casos la lámina continua su proceso, a una línea de tencionado, esta ayuda a mejorar su forma, también algunos de estos productos pueden pasar a líneas de pintado. [23]

3. RODILLOS DE TRABAJO

3.1 Introducción

Los rodillos de trabajo son probablemente el elemento más importante y crítico en un molino laminador. Un rodillo de trabajo debe soportar grandes esfuerzos de tensión, compresión y cortantes sin sufrir deformación plástica, además debe de tener en algunos casos diámetros de fracciones de pulgada para tener la menor área de contacto con la lámina. Por lo mismo sus especificaciones suelen manejarse de forma muy precisa y se seleccionan según el material que se pretende deformar y al espesor final que se busca. Este capítulo hablará de las características, clasificación y elementos presentes de los rodillos de trabajo.

3.2 Composición química de los rodillos de trabajo

La mayoría de los rodillos están hechos de acero con contenido de carbono que oscila entre 0.8 y 1.0% y un contenido de cromo de 4.0 a 5.0% dependiendo del fabricante y el tipo de aplicación. Usualmente se usa una composición con un máximo de carbono y la menor cantidad de cromo para los rodillos de pequeño diámetro, mientras que el menor contenido de carbono y el alto contenido de cromo se usan para los rodillos de gran diámetro. Sin embargo, es posible modificar las características del acero al cromo mediante el control de la concentración en su interior de elementos secundarios de aleación, como el manganeso, o mediante pequeñas adiciones de elementos como molibdeno o níquel. [2]

Elemento	Efecto en el material
Carbón	Aumenta la dureza, la fragilidad y la resistencia al desgaste, pero disminuye la resistencia al impacto.
Silicio	En el rango de 0.20 a 0.35 % aumenta la limpieza del acero. Aumenta la dureza, se usa como desoxidante.
Fósforo	Aumenta la dureza y la fragilidad, pero disminuye la ductilidad.
Azufre	Similar al fósforo y debe usarse con cuidado.
Manganeso	Aumenta la dureza, la fragilidad, la resistencia a la tracción y la resistencia al desgaste.
Níquel	Aumenta la dureza.
Molibdeno	Aumenta la dureza.
Vanadio	Incrementa la dureza y la susceptibilidad al tratamiento térmico.
Cromo	Usado en combinación con níquel y / o molibdeno, aumenta la dureza.
Cobre	Efectos similares a los del níquel.
Boro	Aumenta la dureza

Tabla 3.1 Efectos de elementos de aleación en WR. [2]

En el caso de algunos rodillos, sobre todo en los que se requieren para usos especiales como los usados en los molinos Sendzimir o clúster, la relación longitud-diámetro es mayor que la normal, esto complica el tratamiento térmico y se vuelve casi imposible usar aceros al cromo como se usa normalmente. Por esta razón estos rodillos se fabrican con aceros high-speed con 12-18% de tungsteno, 5-8% de molibdeno, aproximadamente 1% de carbono y las adiciones habituales de cromo y vanadio. [2]

Todavía a principios del siglo XIX había una composición casi general para rodillos convencionales, este acero producía fallas prematuras y su vida útil no era la que se esperaba, sin embargo, a mediados del siglo XX se implementó una nueva composición química para rodillos convencionales que redujo estos inconvenientes, esta composición sigue siendo aceptada a pesar de los avances que se han tenido en estos años. [2]

Composición química de WR	Elementos de aleación (%)					
	C	Mn	Si	Cr	Mo	V
Típica	0.9	0.37	0.27	1.75	0.25	0.09
Nueva composición	0.7	0.25	0.27	0.77	0.65	0.09

Tabla 3.2 Composición química de WR en molino de laminación en frío [2]

3.3 Proceso de fabricación de rodillos de trabajo

Aunque este trabajo no pretende explicar o investigar a detalle el proceso de fabricación de rodillos de trabajo, es importante considerarlo y conocer al menos sus puntos clave ya que precisamente de este proceso se derivan algunas características o comportamientos finales del WR. Una característica que sin duda está ligada a la fabricación es la dureza final del rodillo y esta variable es de especial interés para esta investigación.

Existen 2 métodos para fabricar rodillos de laminación, el método por acero fundido, y por acero forjado. Los rodillos que se estudian en este trabajo son fabricados por el método de forjado el cual parte de la formación de un lingote de acero, este lingote se calienta de manera uniforme a la temperatura de forja mediante hornos revestidos con refractario. La temperatura de forjado se selecciona para proporcionar las mejores condiciones para el trabajo en caliente de un acero determinado. [2]

Una vez calentado el lingote se procede a forjarlo mediante prensas hidráulicas comprimiendo su sección transversal y haciéndolo más largo, esta prensa golpea también el lingote. Los golpes deben de ser lo suficientemente fuertes para penetrar y amasarlo profundamente de manera uniforme y por completo, los golpes ligeros afectan únicamente las zonas cercano a la superficie. Con este proceso se forma el rodillo hasta alcanzar una geometría deseada. [8]

Después de la forja se le aplica al rodillo un tratamiento térmico conocido como temple para mejorar sus propiedades, sobre todo de dureza. El temple consiste en elevar la temperatura del rodillo mediante un horno a un valor por encima de su punto de recristalización ($0.6T_m$) para después enfriarlo repentinamente. El resultado de este cambio abrupto de la temperatura es un cambio en la microestructura cambiándola de una fase estable como la austenítica a una no estable como la martensita. Las fases no estables generalmente son más duras, que es lo que se busca con esta clase de tratamientos.

El enfriado abrupto del rodillo generalmente se aplica apagando obviamente el horno y rociando con agua la superficie del rodillo con inyectores de alta presión como se muestra en la figura 3.1:

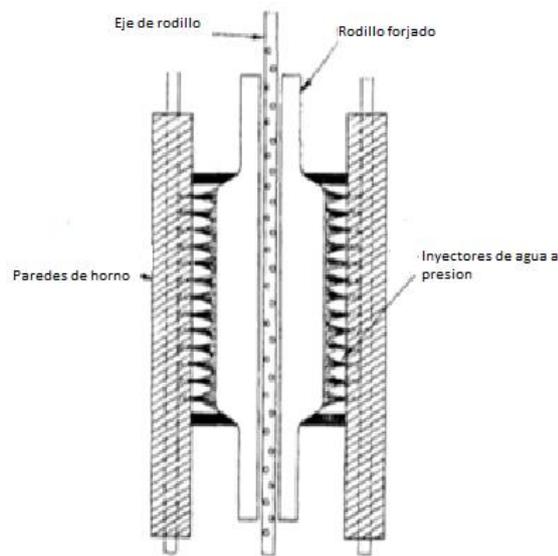


Figura 3.1 Temple de rodillos forjados. [2]

El rodillo transforma su fase de austenita a martensita en su superficie, aunque es evidente que el enfriamiento no se hace de manera uniforme en todo el cuerpo del rodillo. Esto genera que las zonas más cercanas al núcleo del rodillo sean más suaves debido a que ahí hay otro tipo de fases microestructurales más estables como lo son la bainita y la perlita. La figura 3.2 muestra algunas fases típicamente presentes en cuerpo de un rodillo forjado después de su proceso de templado a diferentes distancias con respecto a su superficie.

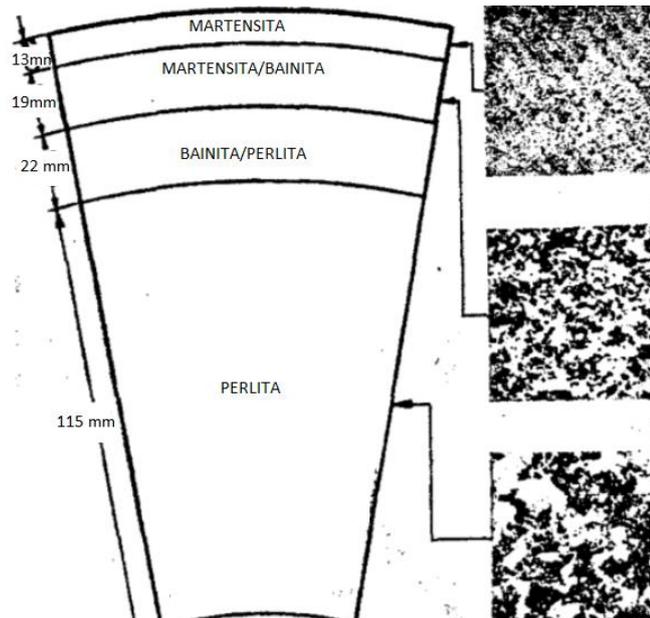


Figura 3.2 Fases presentes en rodillos forjados después del temple a diferentes profundidades [2]

Después de someterse a un enfriamiento tan drástico, el rollo se coloca inmediatamente en un horno para el relevado de los esfuerzos.

3.4 Contacto Rodillo de trabajo-Lamina

Si hay una que elegir una zona crítica en el molino de laminación esa sin duda sería la zona de contacto entre el WR y la lámina ya que en esta zona es donde se produce la deformación deseada de la pieza de trabajo y por eso en esta sección se abordará la geometría, fuerzas y velocidades que resultan de dicho contacto, acompañando el desarrollo teórico con fundamentos matemáticos y figuras que ayuden a la comprensión de este tema.

Sabemos que al entrar la lámina al proceso de laminación tiene ciertas dimensiones y al pasar por el gap de los rodillos de trabajo cambia su forma y propiedades debido a la deformación plástica que sufre. Sin embargo, debemos siempre de tener en mente que, según la ley de la conservación de la materia, la masa no puede desaparecer. Si hay una reducción del espesor de la lámina y el incremento del ancho de la lámina (por condiciones del molino) es despreciable, solo queda una opción, la lámina finalmente se elonga. Este elongamiento se da en la misma dirección de la laminación.

La misma ley de la conservación de la materia nos sentencia que por unidad de tiempo, deben pasar iguales volúmenes de metal a través de cualquier plano normal a la lámina, lo que nos dice que la velocidad de la lámina tendrá que incrementarse después de ser deformada. Estas afirmaciones se plasman en la siguiente fórmula:

$$h_0 b v_0 = h_f b v_f \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

Donde h_0 y h_f son los espesores de la lámina antes y después de la laminación respectivamente, v_0 y v_f son las velocidades inicial y final también

respectivamente y b es el ancho de la lámina que en teoría es constante en todo momento. [9]

Si el ancho de la lámina permanece constante entonces decimos que

$$h_0 v_0 = h_f b v_f \quad (\text{Ecuación 3.2})$$

Lo que nos hace deducir fácilmente el inminente incremento de velocidad de la lámina en su salida del gap con respecto a su entrada.

$$v_f > v_r > v_0 \quad (\text{Ecuación 3.3})$$

Aunque casi todo el tiempo en el que la lámina está en el gap tiene una velocidad diferente a la de los rodillos de trabajo (ya sea mayor o menor según su posición), existe un pequeño instante en donde la velocidad de ambos es la misma. Justo este punto es llamado punto neutro (N), es ahí donde la lámina y el rodillo se mueven juntos y su velocidad relativa desaparece. Sabiendo que antes y después de que la lámina llegue a ese punto sufre deslizamientos por fricción, dicho punto es también llamado punto de no deslizamiento. [9]

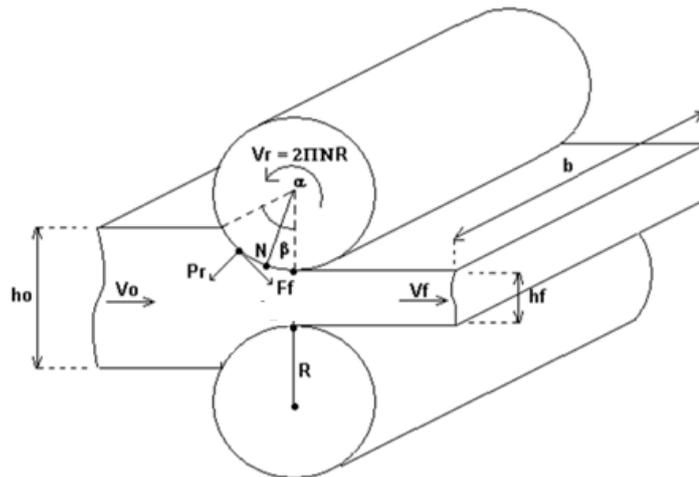


Figura 3.3 Velocidades y dimensiones en un molino de laminación. [9]

A la región entre el punto en el que la lámina entra al gap y el punto neutro N se le conoce como “backward slip”, en esta región los rodillos de trabajo van a mayor velocidad que la lámina y la fuerza de fricción “apoya” a la lámina a entrar al gap teniendo la misma dirección que los rodillos de trabajo. En la región entre el punto neutro y la salida, la fuerza de fricción en la lámina cambia de dirección y ahora está se ejerce en sentido opuesto al movimiento de los rodillos de trabajo y la lámina “oponiéndose” a su salida del gap y retardando su deslizamiento, a esta zona en específico se le conoce como “forward slip”. [1,9]

La presión que ejercen los rodillos de trabajo es posible calcularla. Sabemos que la presión es igual a la fuerza ejercida sobre un área determinada, entonces para conocerla se debe determinar el área de contacto. Se define entonces el área de contacto (rodillo de trabajo-lámina) como el producto del ancho de la lámina (b) y la longitud del arco de contacto (a_c). [9]

a_c se puede calcular fácilmente de la siguiente manera:

$$a_c = R\alpha \quad (\text{Ecuación 3.4})$$

Donde R es igual al radio del rodillo de trabajo.

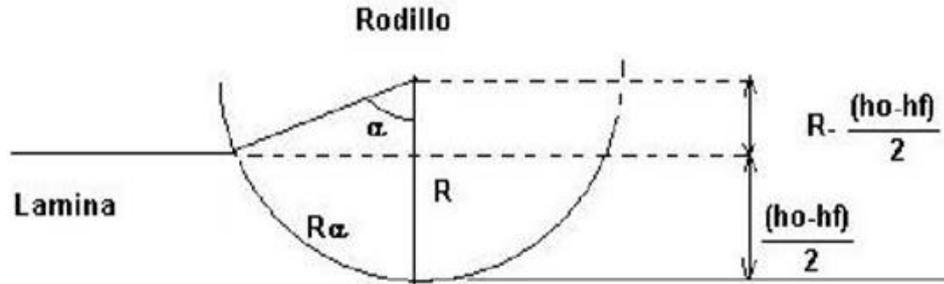


Figura 3.4 Arco de contacto lámina-WR [9]

A la presión que se ejerce en el área de contacto la llamaremos σ y a la fuerza de separación del gap ocasionada por la lámina a los rodillos de trabajo la llamaremos F_l . Entonces decimos que:

$$\sigma = \frac{F_l}{ba_c} \quad (\text{Ecuación 3.5})$$

Si nos posicionamos justo en la entrada del gap y a ese punto lo llamamos A, podríamos usar el ángulo α para formular un equilibrio de fuerzas en dicho punto de la siguiente manera:

$$A * F_f * \text{Cos } \alpha = A * \sigma * \text{Sen } \alpha \quad (\text{Ecuación 3.6})$$

Donde F_f es igual a la fuerza de fricción. Por identidades trigonométricas decimos que:

$$\frac{F_f}{\sigma} = \frac{\text{Sen } \alpha}{\text{Cos } \alpha} = \text{Tan } \alpha \quad (\text{Ecuación 3.7})$$

Según el modelo fricción de Coulomb ($\mu * \sigma = F_f$):

$$\mu = \text{Tan } \alpha \quad (\text{Ecuación 3.8})$$

Gracias a este resultado algebraico deducimos que la lámina no podría entrar al gap si $\text{Tan } \alpha$ es mayor al coeficiente de fricción μ que existe entre ella y los rodillos de trabajo. Aseguramos entonces que el coeficiente de fricción tiene influencia directa con el ángulo del arco de contacto y el tamaño de gap máximos posibles para que pueda existir laminación. [9]

3.5 Shifting

El shifting es una estrategia que se usa de diferentes maneras y con diferentes objetivos según el tipo de molino de laminación, su configuración, el espesor deseado en la lámina y el tipo de material que se está trabajando. El shifting empezó a ser usado como una estrategia para obtener un desgaste uniforme en los rodillos de trabajo, pero se le ha dado un uso diferente a lo largo del tiempo, llegando a ser una variable muy importante y casi indispensable en el control del proceso de laminación. [10, 11]

El shifting es el cambio deliberado de posición de uno o más rodillos en el molino de laminación, este cambio de posición se hace deslizando horizontalmente los rodillos con el fin de modificar el proceso. Como se ha mencionado, el primer shifting usado fue el cambio de posición de los rodillos de trabajo cuando estaban lo suficientemente desgastados, lo que se buscaba era cambiar la zona de contacto con la lámina por otra zona en la que el rodillo estuviera en mejores condiciones. Sin embargo, se ha implementado una gran variedad de shifting en los molinos modernos, deslizando rodillos de trabajo, intermedios o de apoyo en una o varias posiciones.

A continuación, se muestran algunos tipos de shifting según su deslizamiento.

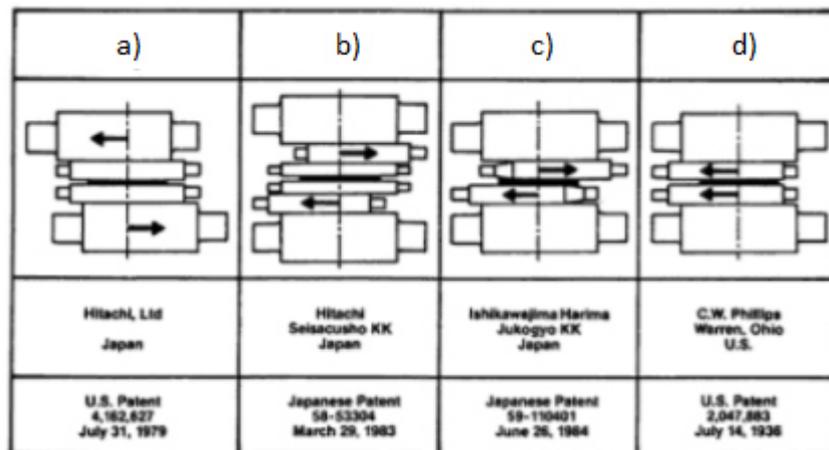


Figura 3.5 a) Shifting bidireccional de rodillos de apoyo b) Shifting bidireccional de rodillos intermedios c) Shifting bidireccional de rodillos de trabajo d) Shifting unidireccional de rodillos de trabajo [12]

Actualmente la estrategia de shifting se usa para 2 principales propósitos:

- a) Incrementar el control de la corona de la lámina
- b) Redistribución del desgaste de los rodillos

a) Incrementar el control de la corona de la lámina: Los esfuerzos de laminación tienden a concentrarse justo en el centro del contacto WR-lámina, estos esfuerzos combinados con la fuerza de fricción generan más calor en esta zona que en el resto del área de contacto, es por esto que el rodillo de trabajo tiende a expandirse elásticamente en la zona con más calor, es decir, en el centro del área de contacto. Esto se traduce a un menor espesor en el centro de la lámina que en sus extremos, a dicha diferencia de espesores se le conoce como la corona de la lámina. Otro fenómeno inevitable generado

por esta concentración de esfuerzos es la flexión de los rodillos de trabajo que a su vez origina un perfil irregular en la lámina en turno. La corona y las irregularidades originadas por flexión del WR se tratan de contrarrestar con el shifting en molinos HC (High control Crown) deslizando los rodillos de intermedios (en el caso de un molino 6-High) para redistribuyan presión en el área de contacto WR-lámina y se consiga una mayor planeza del producto final.[14]

b) Redistribución del desgaste de los rodillos: Después de algunos kilómetros laminados y debido a la concentración de esfuerzos centrales antes mencionada, los rodillos de trabajo suelen desgastarse mucho más en esa zona. Dicho desgaste afecta la planeza de la lámina, por eso es indispensable que después de un cierto tiempo o kilómetros laminados se cambie el rodillo o se rectifique para eliminar la discontinuidad de perfil ocasionada por el desgaste. El proceso de rectificado, además representar la pérdida de material y de vida útil de un rodillo de trabajo, representa una pérdida de tiempo en un proceso de laminación. Por esta razón se trata de evitar con el shifting de rodillos de trabajo, trasladando la zona de contacto a una región menos desgastada del rodillo, esta estrategia, aunque no evita el rectificado eventual del rodillo, si alarga el tiempo de la campaña aprovechando todas las zonas del rodillo antes de rectificarlo.

4.TRIBOLOGÍA

4.1 Introducción

La palabra tribología fue reportada por primera vez por Jost en 1966. El término se deriva de la palabra griega tribos que significa frotar, su traducción literal sería "la ciencia del frotamiento". Su equivalente en el idioma español es la ciencia de la fricción, desgaste y lubricación. Los diccionarios definen la tribología como la ciencia y la tecnología de superficies que interactúan en movimiento relativo y temas o prácticas relacionadas. Tribología es el arte de aplicar el análisis operativo a problemas de gran importancia económica para saber la fiabilidad, el mantenimiento y el desgaste de los equipos técnicos, que van desde electrodomésticos hasta naves espaciales. Las interacciones superficiales en una interfaz tribológica son altamente complejas, y su comprensión requiere el conocimiento de varias disciplinas, incluyendo física, química, matemáticas aplicadas, mecánica sólida, mecánica de fluidos, termodinámica, transferencia de calor, ciencia de materiales, reología, lubricación, diseño de máquinas, rendimiento, y confiabilidad. El término tribología como ciencia es relativamente nuevo, aunque sus estudios datan de épocas mucho más antiguas. Es sabido que los taladros hechos durante el período paleolítico para perforar agujeros o producir fuego estaban equipados con rodamientos hechos de astas o huesos, y ruedas de alfarero o piedras para moler cereales, etc. Un cojinete de empuje de bolas datado alrededor del año 40 D.C. fue encontrado en el lago Nimi cerca de Roma, por mencionar solo algunos ejemplos de aplicaciones tribológicas que revolucionaron a la humanidad. [15]

En este capítulo titulado "Tribología" se explicarán algunos temas que se engloban en esta ciencia, específicamente el desgaste, fricción y lubricación, cómo actúan en un rodillo de trabajo montado y accionado en un molino de laminación en frío y qué repercusiones puede tener en su funcionamiento.

4.2 Desgaste

El desgaste de una pieza es el daño o remoción de material de la misma debido a que su superficie está en un movimiento deslizante, rodante o de impacto con respecto a otra. El desgaste suele producirse, al menos en materiales metálicos, por interacciones superficiales entre asperezas. Para que exista desgaste, durante el movimiento relativo de superficies, la pieza desgastada puede perder material o presentar un deslizamiento superficial del material (deformación plástica) ocasionando un cambio en las propiedades en su superficie o cerca de ella. En este caso, no hay pérdida del material sino marcas o rayaduras en la superficie desgastada. [15]

Cuando el material es removido de la superficie de la pieza desgastada puede transferirse a la superficie de contacto o puede desprenderse como una partícula de desgaste o viruta. En el caso de transferencia de una superficie a otra, el volumen neto o la pérdida de masa del sistema es cero, aunque una

de las superficies está desgastada (con un volumen neto o pérdida de masa). La definición de desgaste generalmente se basa en la pérdida de material, pero debe enfatizarse que el daño debido al desplazamiento del material en la superficie de una pieza, sin cambio neto en el peso o volumen, también se acepta como desgaste. [15,16]

El desgaste no es una propiedad intrínseca de un material sino una respuesta del material a determinado sistema. Erróneamente, a veces se supone que las superficies de alta fricción presentan altas tasas de desgaste y esto no es necesariamente cierto. Por ejemplo, las interfaces con lubricantes sólidos y polímeros exhiben una fricción relativamente baja y un desgaste alto, mientras que las cerámicas presentan una fricción moderada pero un desgaste extremadamente bajo. [15]

El desgaste puede ser deseado o no en un sistema, por ejemplo, existe desgaste productivo al escribir con un lápiz, mecanizar y pulir. El desgaste no es deseable en casi todas las aplicaciones en una máquina, como rodamientos, sellos, engranajes y levas. Los componentes pueden necesitar reemplazo después de que se haya eliminado una cantidad relativamente alta de material o si la superficie está excesivamente áspera. En sistemas tribológicos bien diseñados, la eliminación de material es un proceso muy lento, pero es muy constante y continuo. [15,16]

4.2.1 Principales mecanismos de desgaste

El desgaste se produce por medios mecánicos y/o químicos y generalmente se acelera por calentamiento por fricción (o medios térmicos). El desgaste se subdivide en seis fenómenos principales, bastante distintos entre ellos, que tienen una sola cosa en común: la eliminación o deformación de material sólido de las superficies en frotamiento. [15] Estos son:

- Adhesivo
- Abrasivo
- Desgaste por fatiga
- Impacto por erosión y percusión;
- Químico (o corrosivo)
- Desgaste inducido por arco eléctrico.

Otros tipos de desgaste comúnmente encontrados son el desgaste y la corrosión por fricción. Estos no son mecanismos distintos, sino combinaciones de las formas de desgaste adhesivo, corrosivo y abrasivo. De acuerdo con algunas estimaciones, dos tercios de todo el desgaste encontrado en situaciones industriales ocurre debido a los mecanismos de desgaste adhesivo y abrasivo. El desgaste en todos los mecanismos (excepto por el mecanismo de fatiga) ocurre por la eliminación gradual del material. Uno o más pueden estar operando en una pieza particular de maquinaria. En muchos casos, el desgaste se inicia por un mecanismo y puede proceder por

otros mecanismos de desgaste, lo que complica un análisis de falla. Los componentes con falla generalmente se examinan para determinar el tipo de mecanismo o mecanismos de desgaste responsables de la fractura. La microscopía y una variedad de técnicas analíticas de superficie se usan generalmente en análisis de fallas. [15,16]

4.2.2 Desgaste abrasivo

En términos simples, el desgaste abrasivo se presenta cuando material es desplazado o removido de una superficie debido a su contacto deslizante con otra u otras de mayor dureza. Ejemplos de desgaste abrasivo son un lápiz escribiendo sobre un papel, una pulidora, o inclusive el proceso de laminación en frío.

Hay dos clasificaciones básicas de desgaste abrasivo, el desgaste por abrasión de dos cuerpos y por abrasión de tres cuerpos. El desgaste por abrasión de dos cuerpos consiste en el deslizamiento de dos superficies de diferente dureza, donde la más dura ocasiona un cambio en la topología de la de menor dureza ya sea removiendo su material o simplemente deslizándolo. Un ejemplo del desgaste por abrasión de dos cuerpos es el proceso de rectificado de los rodillos de trabajo o lijar una muestra para una metalografía. El desgaste por abrasión de tres cuerpos se genera cuando una partícula de dureza importante tiene libertad para deslizarse o girar entre dos superficies de contacto. Un claro ejemplo de estos sistemas son pequeñas piedras en las vías del ferrocarril, sistemas con aceites lubricantes contaminados, etc.

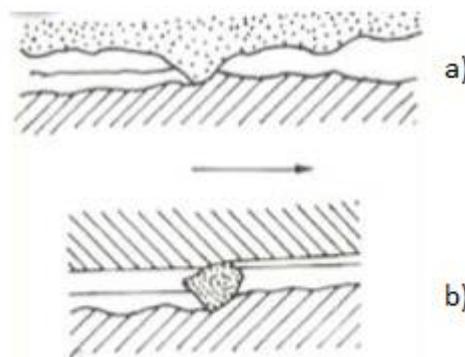


Figura 4.1 a) sistema de abrasión de 2 cuerpos, b) sistema de abrasión de 3 cuerpos [29]

4.2.3 Desgaste adhesivo.

El desgaste adhesivo ocurre cuando dos superficies que están en contacto se adhieren fuertemente formando uniones entre ellas, si agregamos que ambas superficies están en movimiento deslizante relativo, dicha unión resultará en el desprendimiento de material de la superficie con menor dureza para pasar a ser parte de la superficie más dura. Si el material de la superficie menos dura tiene una ductilidad importante, habrá una mayor deformación antes de la separación de la partícula.

Se debe hacer una distinción entre adhesión y cohesión. La cohesión representa las fuerzas de enlace atómicas asociadas dentro de un material. Así, por ejemplo, si una parte de un material cristalino genera dos superficies nuevas, los enlaces que se fracturan son los enlaces cohesivos. Sin embargo, cuando dos materiales diferentes (o incluso idénticos) se ponen en contacto de estado sólido con una interfaz, la unión de la superficie de un sólido con la de otro da como resultado la formación de uniones adhesivas. De nuevo, la adhesión es el fenómeno que ocurre cuando dos superficies se presionan juntas, ya sea bajo una fuerza normal pura (carga) o bajo fuerzas combinadas normales y de corte.

Se debe ejercer una fuerza de tracción normal para separar las superficies. La relación de la fuerza de tracción normal W' requerida para la separación (normalmente referida como fuerza adhesiva) y la fuerza de compresión normal W inicialmente aplicada, se denomina coeficiente de adherencia, μ' .

$$\mu' = \frac{W'}{W} \quad (\text{Ecuación 4.1})$$

W' aumenta linealmente con un aumento de W y μ' generalmente aumenta con la duración del contacto estático y la tasa de separación. La adhesión se produce tanto en los contactos sólido-sólido como en los dos sólidos lubricados con líquidos o sólidos pegajosos. Si dos superficies sólidas están limpias y se eliminan todas las películas químicas y lubricantes, generalmente se produce una fuerte adhesión o unión de un sólido a otro. Los contaminantes superficiales o las películas delgadas en muchos casos reducen la adhesión; sin embargo, en algunos casos, puede pasar lo contrario con superficies bien lubricadas, generalmente se observa una adhesión débil. La adhesión puede ser deseable o indeseable. Se requiere una fuerte adhesión para unir las dos superficies. En muchas aplicaciones de ingeniería, como maquinaria deslizante y giratoria, la adhesión no es deseable, aunque algunas aplicaciones, requieren una adhesión controlada.

4.2.4 Desgaste por fatiga

El desgaste por fatiga ocurre cuando hay dos superficies en contacto con cargas o esfuerzos cíclicos entre ellas, es decir, cuando los esfuerzos no son constantes, sino que se aplican en un determinado tiempo y después se retiran (carga y descarga). Esto sucede en mecanismos sobre todo rodantes por ejemplo en el contacto entre rodillos de un molino de laminación. En este tipo de mecanismos el coeficiente de fricción juega un papel muy importante, ya que para que un material sea desgastado es necesario que exista una deformación plástica y cuando las superficies están perfectamente lubricadas la fricción y deformación son mínimos, caso contrario a los sistemas con altos coeficientes de fricción donde al haber una gran deformación cerca de la superficie de contacto, se generan microgrietas superficiales y subsuperficiales. Dichas grietas, una vez generándose es muy fácil propagarse entre la estructura del material y resulta muy difícil detectarlas hasta que provocan, después de un número crítico de ciclos, el desprendimiento de material o fractura. [29]

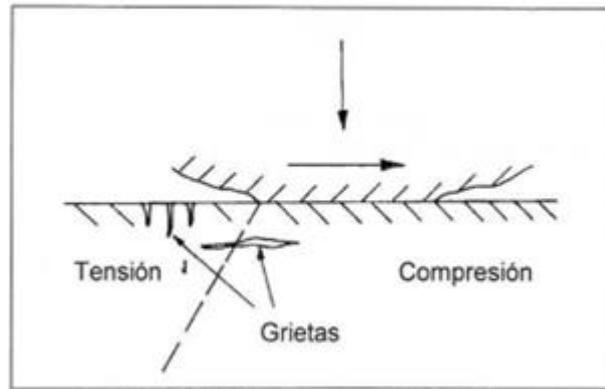


Figura 4.2 Mecanismo de desgaste por fatiga y formación de grietas [29]

4.2.5 Ecuación de Archard

Si bien es cierto que el desgaste es un problema que, durante la historia de la humanidad, la ciencia y las prácticas empíricas se han tratado de solucionar, en la literatura no se cuenta con información suficiente para combatirla en la mayoría de los sistemas de desgaste existentes. El motivo principal es la presencia de factores microscópicos y estrictamente específicos para cada sistema, entre los cuales puede mencionarse la calidad superficial, las heterogeneidades del material y la temperatura localmente desarrollada que son elementos normalmente dejados de lado por la mecánica clásica.

Por esta razón la mayoría de los modelos reportados en la literatura han sido desarrollados para sistemas tribológicos específicos sometidos a condiciones de operación también definidas. El desarrollo de nuevas tecnologías aeroespaciales e industriales en las décadas del 50 y 60 impulsó los estudios de adhesión y desgaste apoyados en ecuaciones basadas en la mecánica del contacto que utilizan propiedades del material, tales como su módulo de elasticidad E y dureza H . En esa época se produjeron grandes avances en la identificación y el entendimiento de los mecanismos asociados a los diferentes procesos de desgaste: deslizamiento, abrasión, erosión. [17]

Los años posteriores, los avances en cuanto a instrumentos de medición abrieron la puerta para que hubiera un desarrollo importante del análisis de los mecanismos de desgaste de la época y predecir fallas de las que en décadas anteriores no se tenían registro. Las técnicas computacionales, por otro lado, permitieron el análisis de los esfuerzos de contacto y de la temperatura en la superficie impulsando el modelado numérico de problemas relacionados con la interacción de superficies. [17]

Archard en su interés por formular el desgaste y ponerlo en función de variables intrínsecas del material desarrolló una fórmula donde el desgaste (w) está en función de la relación entre la carga aplicada (P), y la distancia de deslizamiento en la superficie (s), y la dureza del material (H), todo multiplicado por una constante K que es el coeficiente de desgaste y es adimensional. La ecuación es la siguiente:

$$w = K \frac{Ps}{H} \quad (\text{Ecuación 4.2})$$

La ecuación de Archard actualmente es muy utilizada para cálculos aproximados de desgaste gracias a su sencillez y relativa precisión, aunque es necesario comentar que resulta insuficiente para modelos muy desarrollados ya que para calcular un desgaste real se tienen que tomar en cuenta todas variables que participen en el mecanismo de desgaste correspondiente, usualmente la ecuación de Archard es usada como base para este tipo de modelos.

Es importante mencionar que la ecuación de Archard es usada para superficies consideradas idealmente planas, para calcular contactos reales entre asperezas, es necesario tomar en cuenta variables como la morfología de la aspereza, su radio, etc.

4.3 Lubricación

Otra de las 3 ramas principales que constituyen la tribología es la lubricación, la mayoría de los procesos en la industria que involucran el contacto entre superficies sólidas son acompañados por un buen sistema de lubricación. Los lubricantes generalmente son líquidos viscosos que tienen una función específica en el sistema, generalmente la función principal es reducir la fricción en un contacto entre superficies, aunque no siempre es la única. En el caso de la laminación en frío, los lubricantes reducen en forma importante las fuerzas de laminación necesarias para la reducción de la lámina, además facilitan el control de planeza, reducen el desgaste de los rodillos, reducen considerablemente las temperaturas generadas en el contacto WR-lámina y fungen como escudo protector del fenómeno de oxidación. [2]

4.3.1 El efecto del lubricante en el acabado superficial de la lámina

Existe una correlación entre el aspecto general de la lámina terminada y diversos parámetros de laminación, incluido el coeficiente de fricción efectivo en el gap. Esto se debe al hecho de que el acabado superficial en parte depende de la cantidad de pulido que la lámina recibe de las superficies del rodillo antes de su salida del molino. Si el proceso cuenta con un buen lubricante, el punto neutro (punto donde la velocidad del rodillo y la lámina son iguales) está cerca de la salida del gap, por lo tanto, hay poco deslizamiento de la lámina con respecto a la superficie del rodillo después de que se ha pasado el punto neutro y en consecuencia hay muy poco pulido de la superficie de la lámina. Por otro lado, cuando se usa un lubricante pobre, se mueve el neutro hacia el plano de entrada y se aumenta el deslizamiento entre la lámina y cada superficie del rodillo, con el resultado de que se produce más pulido para producir una lámina más brillante. [2]

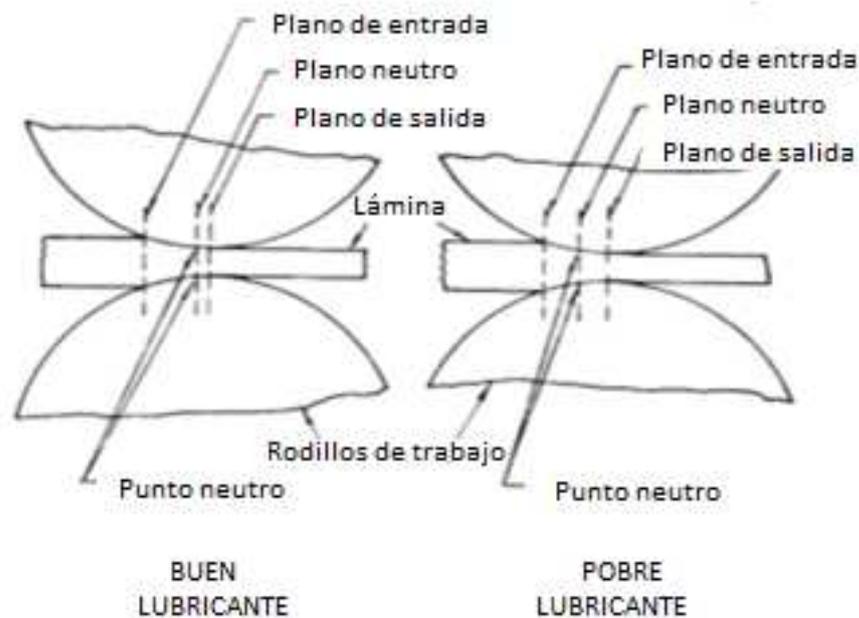


Figura 4.3 Movimiento del punto neutro según la calidad del lubricante. [2]

4.4 Fricción

La fricción es un elemento importante en cualquier máquina industrial ya que gracias a ella ocurren grandes procesos o inclusive grandes fallas. Se puede definir la fricción como la resistencia al movimiento en un sistema deslizante o rodante. Se produce cuando un cuerpo se mueve tangencialmente sobre otro al mismo tiempo que existe un contacto entre ellos. A la fuerza que se resiste al movimiento y que actúa en el sistema en sentido opuesto a la dirección de deslizamiento se le llama fuerza de fricción. Aunque la mayoría de las veces se relaciona la fuerza de fricción como un elemento a combatir o disminuir, la realidad es que sin ella algunos procesos importantes en la industria o incluso en la vida cotidiana no se podrían llevar a cabo, por ejemplo, caminar, la rodadura de las llantas del automóvil sobre el pavimento o la deformación de la lámina en el proceso de laminación en frío.

La fricción se puede clasificar en dos elementales tipos: la fricción seca y la fricción fluida. Como su nombre lo dice, la fricción seca se encuentra en mecanismos sin lubricante, mecanismos con áreas de contacto totalmente sólida, a esta fricción se le conoce como fricción de Coulomb. La fricción fluida existe en mecanismos lubricados y describe el componente tangencial de la fuerza de contacto que existe entre las capas adyacentes en un fluido que se mueve a diferentes velocidades entre sí como en un líquido o gas entre las superficies de apoyo. [15]

La fricción no es una propiedad propia del material, es una respuesta del sistema. Si dos superficies sólidas están limpias sin películas químicas ni

absorbentes, se produce una alta fricción. Los contaminantes superficiales o las películas delgadas afectan la fricción. Con superficies bien lubricadas, generalmente se observa una adhesión y fricción débiles. Sin embargo, una pequeña cantidad de líquido presente en la interfaz da como resultado una adhesión mediada por líquido, que puede a su vez resultar en alta fricción. [15]

Si dos cuerpos sólidos están en contacto y se aplica una fuerza tangencial (F_t) para iniciar el movimiento relativo entre ellos, el valor de dicha fuerza es la fuerza de fricción estática (F_{fe}). Puede tomar unos pocos milisegundos antes de que se inicie el movimiento relativo en la interface. La fuerza tangencial requerida para mantener el movimiento relativo se conoce como la fuerza de fricción cinética (F_{fk}). La fuerza de fricción estática es mayor o igual a la fuerza de fricción cinética. Según la ley de Amonton, la fuerza de fricción (F_f) es proporcional a la fuerza normal.

$$F_f = W\mu \quad (\text{Ecuación 4.3})$$

donde μ es una constante conocida como coeficiente de fricción. La fuerza tangencial en la superficie de contacto afecta la distribución de esfuerzos y el tamaño y la forma del área de contacto. Si los dos sólidos que se deslizan uno tras otro son homogéneos y tienen las mismas constantes elásticas, cualquier fuerza tangencial transmitida entre ellos da lugar a desplazamientos normales iguales y opuestos de cualquier punto en la interface. [15]

4.4.1 Fricción necesaria en el gap de un molino de laminación en frío.

En el proceso de laminación en frío, es necesaria la fricción a lo largo y ancho del contacto entre la lámina y los rodillos de trabajo para que exista la transmisión de energía que finalmente genera la deformación plástica. Si las fuerzas de fricción son demasiado pequeñas, la velocidad periférica del rodillo excederá la velocidad de salida de la lámina o, en otras palabras, los rodillos patinarán. Con el mínimo coeficiente de fricción en el gap de los rodillos de trabajo, las dos velocidades serán estrechamente emparejadas, mientras que los coeficientes más grandes darán como resultado un patinamiento. Despreciando los esfuerzos de tracción en la lámina en la entrada y salida del gap y si los rodillos de trabajo se consideran perfectamente rígidos (es decir que no hay deformación elástica), para condiciones de fricción mínima permisible, la fuerza de laminación específica sería aproximadamente:

$$F_l \approx \sigma_c \sqrt{\frac{Dh_0 t_r}{2}} \quad (\text{Ecuación 4.4})$$

Donde σ_c es el esfuerzo de compresión requerido para deformar la lámina, D_w es el diámetro del rodillo de trabajo, h_0 es el espesor de entrada de la lámina y t_r es la reducción de espesor. [2]

$$t_r = h_0 - h_f \quad (\text{Ecuación 4.5})$$

La fuerza de fricción total por unidad de ancho de la lámina arrastrada en el gap de rodillos es dos veces el producto del coeficiente de fricción mínimo, μ_m

y la fuerza de laminación específica, es decir $2\mu_m F_l$. Teniendo en cuenta solo las fuerzas horizontales que actúan en la lámina, y sin tener en cuenta los efectos de aceleración, se puede hacer la siguiente aproximación:

$$2\mu_m F_l \approx t_r \sigma_c \quad (\text{Ecuación 4.6})$$

Teniendo en cuenta estas suposiciones, podemos conocer el coeficiente de fricción mínimo necesario para que exista la laminación:

$$\mu_m = \sqrt{\frac{t_r}{2D}} \quad (\text{Ecuación 4.7})$$

Es importante mencionar que estos cálculos son aproximados, pero son relaciones que comúnmente son usadas en modelos matemáticos de laminación ya que estas fórmulas se acercan mucho a los valores necesarios de fricción para que exista la laminación y nos permite hacer suposiciones y tomar acciones en el diseño de un molino de laminación. [2]

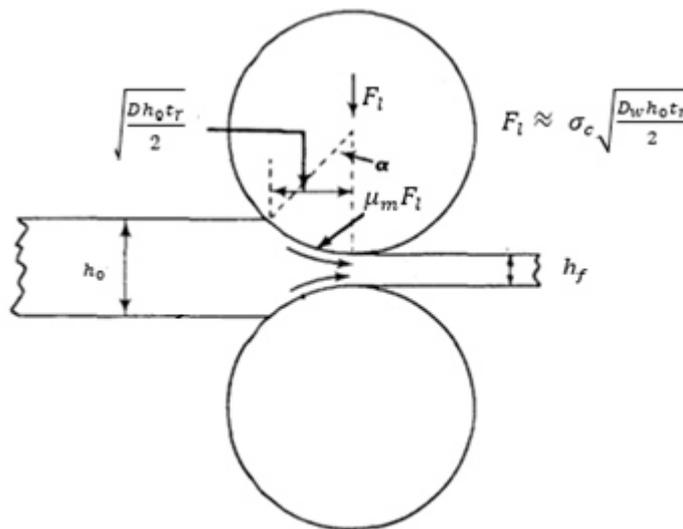


Figura 4.4 Esquema de fuerza de laminación mínima en un molino [2]

4.4.2 Efectos de la fricción excesiva en un molino de laminación.

Incluso con el uso de lubricantes, generalmente hay una generación excesiva de fricción en el gap que provoca algunos problemas como fuerzas de laminación muy altas, requerimiento de potencia de los motores de laminación elevada, y un patinamiento de la lámina a la salida del gap.

Si los valores de fricción son considerablemente superiores a los mínimos requeridos para la laminación, entonces pueden surgir dificultades para obtener un laminado satisfactorio, ya que las fuerzas de laminación pueden ser tan grandes que la flexión del rodillo daría a la lámina una "forma" pobre o nivel inadecuado de planeza. Además, la disipación de la energía de fricción excesiva puede dar como resultado temperaturas anormalmente altas.

El aumento de la fricción también produce un acabado más brillante en la lámina, debido a la mayor acción de pulido de los rodillos en su superficie. En algunos casos, el brillo que genera dicho fenómeno puede ser deseable como en el laminado de aceros inoxidables. Sin embargo, si el lubricante no es igualmente efectivo en todos los puntos en el gap, la lámina resultante puede exhibir rayas a escalas más pequeñas.

La relación entre la fricción y la fuerza de laminación se puede entender haciendo referencia a la figura 4.5. Sin tener en cuenta el endurecimiento por trabajado, la presión ejercida por cada rodillo sobre la lámina a lo largo del arco de contacto puede considerarse constante cuando tenemos un coeficiente de fricción mínimo. Sin embargo, a medida que aumenta el coeficiente, el punto neutro (donde las velocidades de la superficie del rodillo y la lámina son iguales) se mueve hacia la salida del gap del rodillo. La presión a lo largo del arco de contacto ya no es constante, sino que toma la forma de dos curvas exponenciales que forman una "colina de fricción" postulada por primera vez por Siebel. La fuerza de laminación específica se obtiene calculando el área debajo de la "colina de fricción" y como el punto neutro se desplaza hacia la salida del gap debido a la fricción creciente, la altura de la "colina de fricción" y, en consecuencia, la fuerza de laminación específica, aumentan.

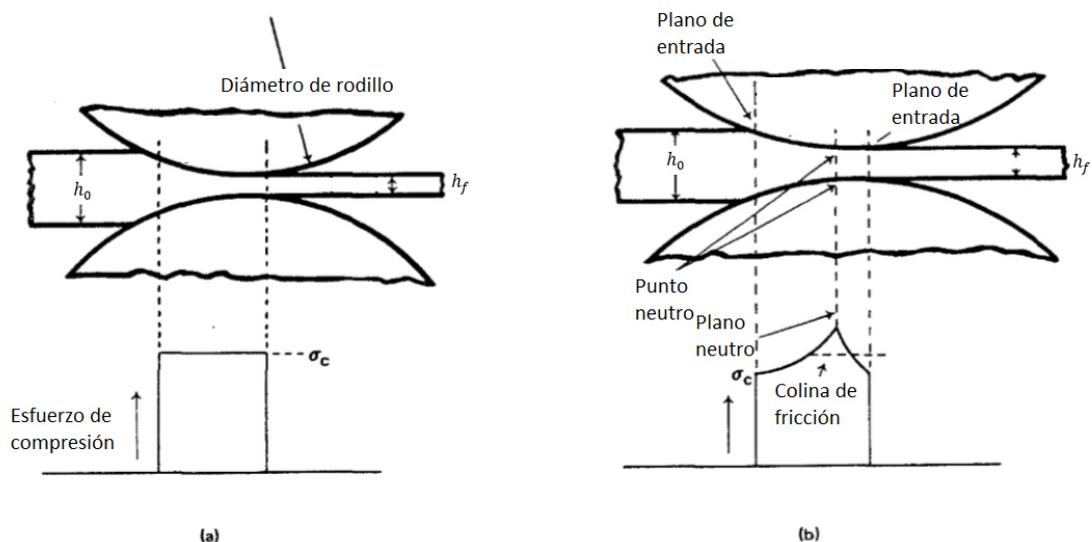


Figura 4.5 a) condiciones mínimas de laminación b) colina de fricción [2]

Según la conocida fórmula de Stones la lámina más delgada que se puede laminar en un molino tendrá un espesor t_m dado por:

$$t_m = \frac{3.58 D \mu \sigma_c}{E} \quad (\text{Ecuación 4.8})$$

Donde E es el módulo de elasticidad.

5. FATIGA DE METALES

5.1 Introducción.

En este capítulo se hablará de un fenómeno recurrente en sistemas rotatorios, como el sistema de laminación en frío, hablamos de fatiga. Aunque la detección de este fenómeno es prácticamente muy complicada, existe toda ciencia dedicada al estudio de fallas provocadas por fatiga, cerca del 90% de las fallas en materiales o piezas metálicas en servicio son provocadas por un mecanismo de fatiga. [37]

La fatiga es un proceso de cambio estructural permanente, progresivo y localizado que ocurre en un material sujeto a tensiones y deformaciones variables en algún punto o puntos y que produce grietas o fractura completa tras un número suficiente de ciclos. [37]

5.2 Mecanismo de fractura por fatiga.

El proceso de fractura por fatiga en forma general inicia con la formación de microgrietas en la estructura de una pieza metálica debido a los ciclos de carga y descarga a los que es sometido. Estas microgrietas aparecen debido a la nucleación y acumulación de dislocaciones y vacancias atómicas en un punto o zona determinada. Una vez formada la grieta, gracias a la ampliación cíclica de cargas, dicha grieta crece lentamente en la estructura del metal, este crecimiento se presenta en la llamada “zona de propagación” en donde se observan también las llamadas “marcas de playa” causadas por fatiga. Cuando la grieta o fisura es lo suficientemente grande para que la pieza metálica no resista la carga cíclica, se produce una fractura súbita. [38]

Cada uno de estos pasos del proceso se pueden identificar en la zona de fractura de la pieza. En este tipo de fracturas la pieza fisurada suele proporcionar mucha información referente al origen y propagación de la falla lo que facilita su análisis. Algunas de las zonas de mayor interés en una zona de fractura se presentan en las siguientes imágenes:

En la figura 5.1 se muestran gráficamente las ya mencionadas “marcas de playa” gracias a estas marcas y a su morfología es fácil identificar las zonas de origen y propagación de la grieta.

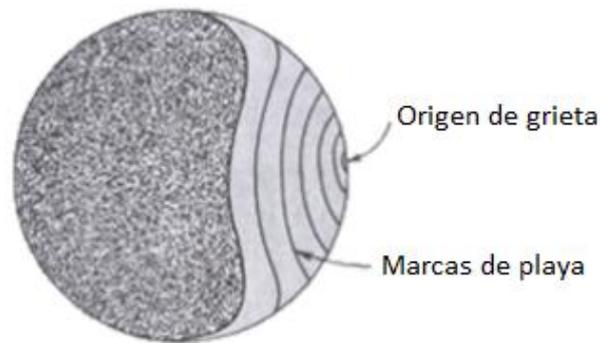


Figura 5.1 Fractura por fatiga en pieza metálica [38]

En la figura 5.2 se muestra la misma fractura que en la imagen, pero ahora identificando las 3 zonas de mayor interés en cualquier fractura por fatiga.

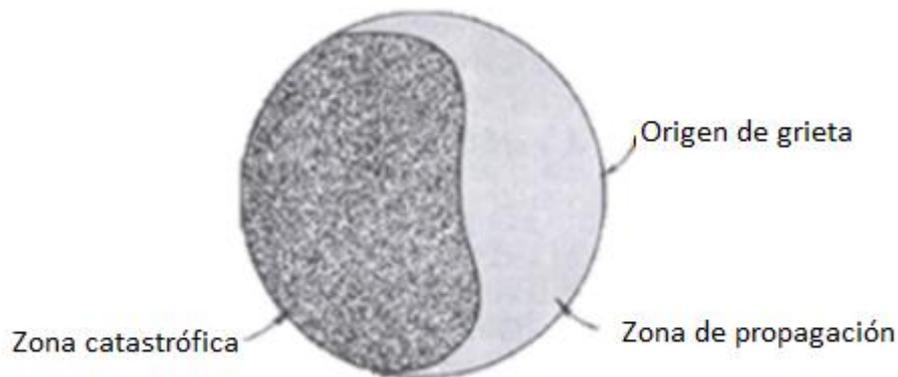


Figura 5.2 Zonas de interés en fractura por fatiga de pieza metálica [38]

- Origen de fractura: En esta zona es donde se crea la o las microgrietas que son la causa raíz de la fractura.
- Propagación de grieta: En esta zona la grieta crece y se propaga a lo largo y ancho del área transversal.
- Zona catastrófica: Es la zona en donde se produce la fractura súbitamente.

5.3 Fracturas por fatiga en rodillos de trabajo.

Existe un sinnúmero de fracturas en rodillos de trabajo en frío ocasionadas por fatiga, sin embargo, en esta ocasión se hablará de 2 de las más comunes y catastróficas, la tipo “lengua de toro” y “silla de montar”.

5.3.1 Fracturas por fatiga en tipo “lengua de toro”

Este tipo de fracturas se originan por la presencia de grietas superficiales del rodillo. Estas grietas comúnmente se forman en consecuencia a accidentes en la campaña de laminación (como lo son los reventones de lámina) o un perfil desgastado de rodillos de apoyo e intermedios, en general, por

sobresfuerzos durante la campaña. Se le llama comúnmente “lengua de toro” por la morfología de la zona catastrófica de la fractura.

La fractura típicamente inicia con una microgrieta en la superficie del rodillo de trabajo, después se propaga sobre el cuerpo del rodillo formando una “banda de fatiga” que va paulatinamente creciendo en dirección al núcleo del rodillo y en sentido contrario al de laminación. Finalmente, al hacer contacto la grieta con una zona lo suficientemente “blanda” (aproximadamente 35 mm de la superficie), empieza a propagarse de forma inestable y casi instantánea, generando así una fractura súbita. En la imagen se describe gráficamente cada uno de los pasos del origen y propagación de la grieta hasta ocasionar la fractura final.

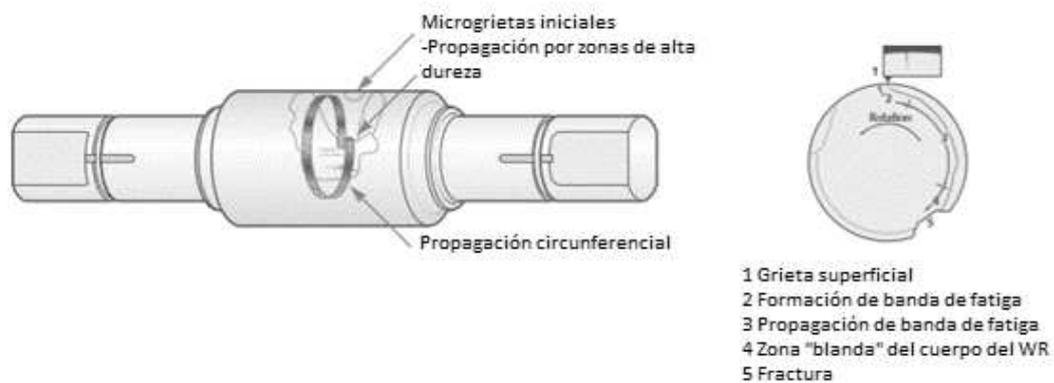


Figura 5.3 Mecanismo de propagación de fractura por fatiga tipo "lengua de toro" [44]

A continuación, se presenta una imagen de fractura tipo “lengua de toro” en un rodillo de trabajo de un molino tándem de laminación en frío.



Figura 5.4 Ejemplo de fractura tipo "lengua de toro" en PLTCM

5.3.2 Fracturas por fatiga en tipo “silla de montar”

Este tipo de fracturas, al igual que las tipo “lengua de toro”, son ocasionadas por la aparición de microgrietas, con la diferencia que estas grietas se originan en el núcleo del rodillo y no en la superficie. Ésta falla es comúnmente llamada tipo “silla de montar” por su morfología.

Como ya se mencionó, la fractura inicia en el núcleo del rodillo por debajo de la superficie con la aparición de microgrietas, estas grietas se concentran en una zona específica y se propagan sobre el cuerpo del rodillo en dirección a su superficie por las cargas cíclicas propias del proceso de laminación. Cuando las grietas llegan a la superficie, se produce el desprendimiento de material de la tabla del rodillo.

La formación de microgrietas en el núcleo del rodillo es debido a sobrecargas en la campaña de laminación, sobre todo cuando se lamina material de bajo espesor y gran reducción. [44]

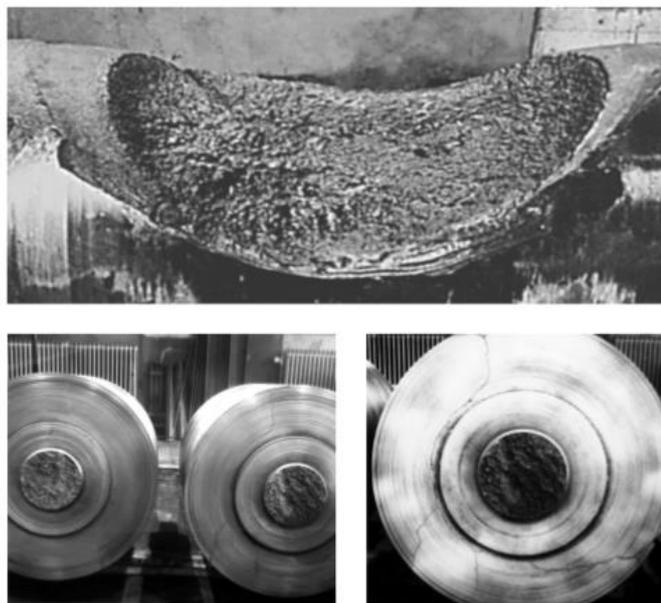


Figura 5.5 Ejemplo de fractura por fatiga tipo "silla de montar" [44]

6. DUREZA

6.1 Introducción.

El término “dureza” es y ha sido utilizado ampliamente al tratar de caracterizar y definir las propiedades de un material, sin embargo, su definición suele ser muy ambigua y en ocasiones relativa. La dureza no puede ser catalogada como una propiedad del material, más bien está relacionada con sus propiedades elásticas y plásticas. Existe más de un método para conocer la dureza de un material, y cada uno de ellos mide diferentes propiedades, por esta razón el término “dureza” es usualmente definido en función del método o ensayo de medición utilizado. Los métodos de medición de dureza más comunes son el rayado, penetración, rebote y desgaste. Algunas definiciones de dureza aceptadas son las siguientes: [33, 34]

- 1) Resistencia a la indentación permanente bajo cargas estáticas o dinámicas (dureza por penetración).
- 2) Absorción de energía bajo cargas de impacto o dinámicas (dureza por rebote).
- 3) Resistencia a la abrasión (dureza por desgaste).
- 4) Resistencia al rayado (dureza por rayado).

Si se tuviera que englobar esta información, una definición universal correcta de la dureza sería: la resistencia de la superficie de un material a la deformación plástica localizada. [34]

6.2 Ensayos de medición de dureza en metales

De acuerdo con la clasificación mencionada en la sección anterior (6.1), se presenta la tabla 6.1 donde se mencionan los ensayos de medición de dureza más comunes en metales según el mecanismo que utilizan.

Mecanismo	Ensayos de medición de dureza
Penetración	Vickers, Brinell, Rockwell, Knoop
Rebote	Shore, Equotip
Desgaste	Rosival
Rayado	Mohs, Martens

Tabla 6.1 Ejemplos de ensayos de medición de dureza en metales

Se describen a detalle algunos de los ensayos más utilizados y comerciales para determinar la dureza en metales. Los dos más comunes son sin duda los ensayos Rockwell y Equotip.

6.2.1 Ensayo de dureza Rockwell

Es un ensayo donde la dureza se determina en función del grado de penetración de la pieza a ensayar a causa de la acción de un indentador bajo una carga estática dada.

6.2.1.1 Instrumentación

- Maquinaria: La máquina de ensayo está conformada por un yunque o soporte rígido donde finalmente se coloca la muestra. Este soporte debe tener ciertas características físicas, por ejemplo, debe ser de acero templado con una dureza igual o mayor a 58 HCR. Si la cara de apoyo presenta rayas o marcas, se pueden generar errores de lectura sobre todo en muestras de espesor delgado y utilizado escala B, por esta razón dicha cara debe estar perfectamente pulida.
- Indentador: Tiene la función de penetrar la muestra gracias a las cargas que ejerce la máquina a través de él. Existen 2 tipos principales de indentadores, tipo cono y esfera.
- Sensor de posición: Mide la posición del indentador durante el ensayo.

6.2.1.3 Principio de funcionamiento

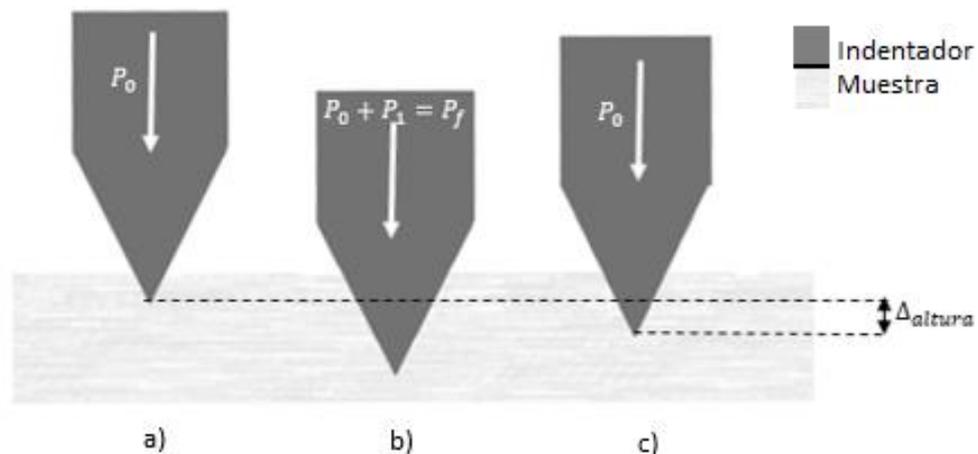


Figura 6.1 a) posición 1 del indentador b) posición 2 del indentador c) posición 3 del indentador

Iniciando el ensayo, la máquina aplica una carga inicial sobre la muestra por medio del indentador, esta carga inicial provoca una pequeña indentación en la muestra; esta posición del indentador es llamada posición 1. El propósito de esta primera carga es eliminar “ruido” en las mediciones causado por vibraciones o irregularidades en la superficie de la muestra. Después se aplica sobre la muestra una segunda carga (P_1) que, complementada con (P_0), generan una carga resultante P_f . [35]

$$P_f = P_1 + P_0 \quad (\text{Ecuación 6.1})$$

La carga P_f resultante provoca una indentación de mayor profundidad sobre la muestra; esta posición del indentador es llamada posición 2. Finalmente se retira la carga P_1 , dejando la carga P_0 como la única sobre la muestra, esto provoca una recuperación elástica en el sistema muestra-indentador. Esta recuperación a su vez causa un movimiento vertical del indentador con un diferencial de alturas respecto a la posición 1; esta posición del indentador es

llamada posición 3. Finalmente, el sensor de posición de la máquina mide este diferencial de alturas del indentador y convierte este dato a unidades de HR por medio de una sencilla fórmula. Esta fórmula será explicada a detalle en la siguiente sección.

6.2.1.4 Valor de dureza

La máquina de ensayo calcula la dureza Rockwell (HR) según el tipo de indentador que utiliza para la prueba.

Cuando se utiliza el indentador tipo cono de diamante el cálculo se realiza de la siguiente manera:

$$HR = 100 - \frac{\Delta_{altura}}{0.002} \quad (\text{Ecuación 6.2})$$

Cuando se utiliza el indentador tipo esfera de acero (o carburo de tungsteno) se realiza de la siguiente manera:

$$HR = 130 - \frac{\Delta_{altura}}{0.002} \quad (\text{Ecuación 6.3})$$

Este valor de dureza se suele reportar seguido de algunos símbolos propios de las características y parámetros del ensayo, a continuación, se muestra un ejemplo:



Figura 6.2 Nomenclatura para mediciones de dureza por ensayo Rockwell

Podemos observar en el ejemplo de la figura 6.2 una medición por ensayo Rockwell (HR) con un valor de 78 utilizando un indentador tipo cono de diamante con una carga P1 de 150Kgf. En el anexo A6 se describen las diferentes variantes de indentadores y su nomenclatura correspondiente.

Cuando el indentador es tipo esfera, usualmente se coloca después de la nomenclatura mostrada en la figura 6.2, una letra "W" si se trata de una esfera de carburo de tungsteno o una "S" si se trata de una esfera de acero, por ejemplo 78 HRBW.

6.2.2 Ensayo de dureza Equotip

Es un ensayo dinámico de dureza por rebote que mide la dureza llamada Leeb de una determinada muestra y donde la medición únicamente representa la dureza en la superficie específica donde se realiza dicho ensayo, los datos obtenidos no son representativos de ningún otro lugar de la superficie y ni de la masa de la pieza.

6.2.2.1 Instrumentación

Para realizar el ensayo de dureza Equotip es necesario utilizar un instrumento llamado durómetro Equotip (que es un acrónimo de Energy QUOtient) el cual está compuesto de:

- Un dispositivo de impacto: Este dispositivo está equipado con un cuerpo de punta de carburo de tungsteno o de diamante sintético que finalmente se proyectará por medio de un resorte a una determinada velocidad hasta impactarse con la muestra.
- Un imán permanente: Este imán se encuentra montado sobre el dispositivo de impacto.
- Una bobina inductora: Tiene la función de monitorear la posición y velocidad del dispositivo de impacto, esto lo hace gracias a la interferencia magnética que genera el imán permanente.
- Un anillo de soporte: Es la interfaz entre la muestra y el instrumento y su función es reducir o evitar el movimiento relativo entre ellos.
- Un display electrónico: Muestra el valor o los valores de dureza medidos.

6.2.2.2 Principio de funcionamiento

El ensayo consiste en lo siguiente, un resorte proyecta con una determinada fuerza un cuerpo de punta esférica de diamante o carburo de tungsteno hacia la muestra (que en todo momento se debe de mantener inmóvil) hasta finalmente producirse un impacto entre ambos. Cuando el cuerpo de impacto se encuentra a 1 mm de impactar la muestra se mide su velocidad y después del impacto, cuando se alejó 1 mm de la muestra se mide su velocidad nuevamente. Las mediciones se hacen por medio de un imán permanente que está montado en el dispositivo de impacto y durante la prueba se mueve a través de la bobina inductora e induce un voltaje eléctrico en ambos movimientos, el impacto y el rebote. Estos voltajes inducidos son proporcionales a las respectivas velocidades tanto de impacto como de rebote. Finalmente se proyecta el valor medido en el display electrónico. [18]

La huella de indentación en la muestra es pequeña (0.5 mm) comparada con la del ensayo de dureza Rockwell donde la huella es aproximadamente de 3 mm de profundidad.

6.2.2.3 Valor de dureza

El valor de dureza obtenido de este ensayo es el resultado de una fórmula que relaciona la velocidad de impacto y rebote como se muestra a continuación:

$$HL = \frac{v_{rebote}}{v_{impacto}} * 1000 \quad (\text{Ecuación 6.4})$$

Donde v_{rebote} es la velocidad de rebote $v_{impacto}$ es la velocidad de impacto y HL es conocida como el símbolo de dureza Leeb, sus unidades son HL + el tipo de dispositivo de impacto, por ejemplo, para un dispositivo tipo D (ver tabla de dispositivos en el anexo A3), sus unidades serán HLD. [18]

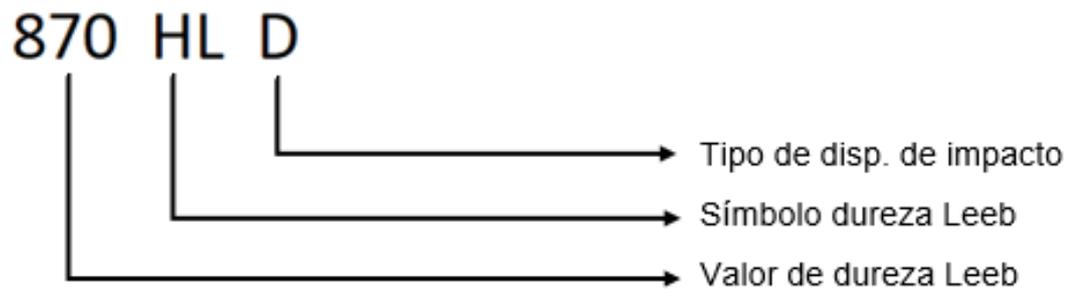


Figura 6.3 Nomenclatura para mediciones de dureza por ensayo Rockwell

En el ejemplo que se muestra en la figura 6.3 una medición de dureza Leeb (HL) con un valor de 870 y con un dispositivo de impacto tipo “D”

7. CONCEPTOS ESTADÍSTICOS

7.1 Varianza

La varianza es un término que se utiliza para medir la variación de un conjunto de datos con respecto a su media aritmética. Este concepto es muy utilizado en la mayoría de los estudios estadísticos debido a su facilidad de cálculo. Se calcula de la siguiente manera:

$$\vartheta^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (\text{Ecuación 7.1})$$

Donde x_i es un dato del conjunto, n es la cantidad de datos y \bar{x} es la media aritmética del conjunto de datos.

7.2 Desviación estándar

La varianza tiene el gran inconveniente, que sus unidades de medida están al elevadas al cuadrado (por ejemplo Km^2 , MPa^2 , HLD^2), por lo que no tiene interpretación en la realidad. Este inconveniente se subsana con la desviación estándar, que se define como la raíz cuadrada de la varianza [21].

$$\vartheta = \sqrt{\vartheta^2} \quad (\text{Ecuación 7.2})$$

Cuando se calcula la desviación estándar de un sistema se obtiene información sobre el rango de valores puede oscilar un valor (por ejemplo, de medición) con respecto al valor real.

7.3 Covarianza

La covarianza es una medida del grado de asociación entre dos variables [21]. Por ejemplo, la covarianza entre dos conjuntos de datos dados por las variables (x, y) se calcula de la siguiente manera:

$$Cov_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n} \quad (\text{Ecuación 7.3})$$

7.4 Coeficiente de correlación

El coeficiente de correlación r es un estimador de la relación que existe entre dos variables. Su valor varía entre 1 y -1 y se dice que cuando $0 < r < 1$ existe una correlación positiva entre las variables y cuando $-1 < r < 0$ existe una correlación negativa entre ellas.

El coeficiente de correlación que existe entre dos variables (x, y) se calcula de la siguiente manera:

$$r_{xy} = \frac{Cov_{xy}}{\vartheta_x \vartheta_y} \quad (\text{Ecuación 7.4})$$

7.5 Matriz de correlaciones

La matriz de correlación es una matriz cuadrada constituida por los coeficientes de correlación de cada pareja de variables; de manera que tendrá valores= 1 en su diagonal principal, y en los elementos no diagonales los correspondientes coeficientes de correlación. La matriz de correlación será, obviamente, simétrica, y conservará las propiedades de ser definida-positiva y tener un determinante no negativo, (además el determinante será siempre menor o igual que 1). [22].

7.6 Estudios R&R

Un estudio R&R es un análisis estadístico en donde se estima la variación existente entre un conjunto de datos. Este tipo de estudios suelen realizarse para procesos de medición donde los datos fueron obtenidos experimentalmente con diferentes personas u operadores y con instrumentos no muy precisos. El estudio tiene como objetivo hacer una estimación de cuánta de la variación total del proceso es causada por el sistema de medición (operador e instrumento). [19]

La variación del sistema de medición es causada por dos factores:

- Repetibilidad: Variación causada por el instrumento de medición, o la variación observada cuando el mismo operador hace sus mediciones en la misma pieza repetidamente con el mismo instrumento.
- Reproducibilidad: Variación debido al sistema de medición, o la variación observada cuando diferentes operadores hacen sus mediciones en la misma pieza utilizando el mismo instrumento.

Un estudio R&R se realiza para evaluar, monitorear o mejorar un proceso que involucre un sistema de medición y por lo regular se suele utilizar una muestra de datos obtenidos por al menos dos operadores y midiendo dos piezas al menos dos veces. [19]

7.7 Seis sigma (6 σ)

Un método típico que se suele aplicar en análisis estadísticos que pretenden medir la variación de un proceso de medición es el valor 6σ , donde σ es la desviación estándar. Este valor es usado debido a que cuando los datos de un estudio están normalmente distribuidos, aproximadamente 99.73% de los datos se ubican dentro de 6 desviaciones estándar (± 3 desviaciones estándar desde la media).

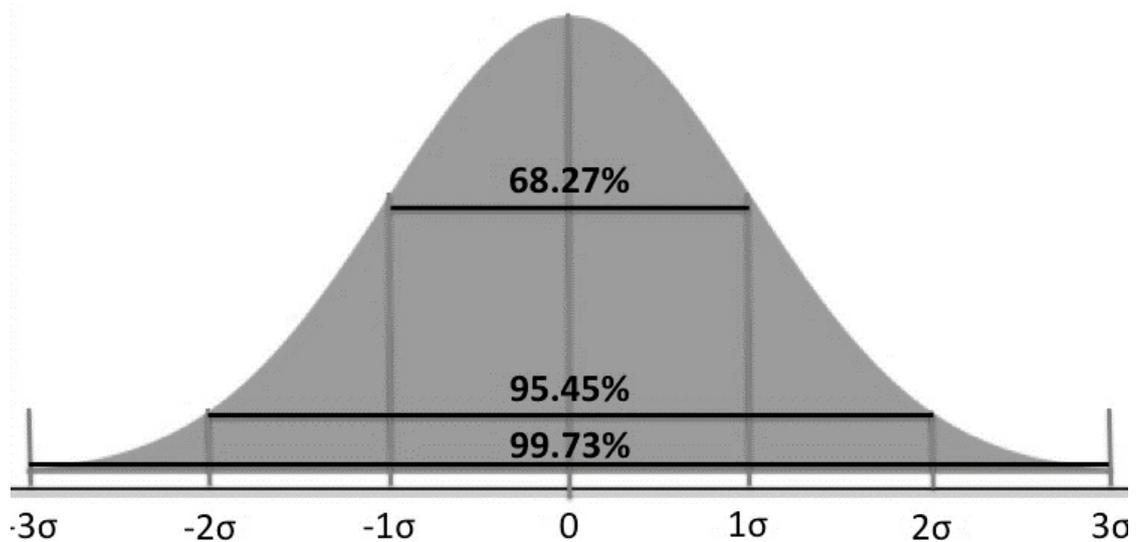


Figura 7.1 Distribución normal de los datos según la cantidad de desviaciones estándar consideradas

7.8 Coeficiente de variación

Una de las formas de medir la precisión de un estudio es determinando el coeficiente de variación. Este coeficiente se calcula dividiendo la desviación estándar entre la media del estudio, todo multiplicado por 100:

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100 \quad (\text{Ecuación 7.5})$$

El resultado de esta ecuación describirá nuestro estudio como preciso o impreciso. Una clasificación de estudios según su coeficiente de variación es propuesta por el instituto INEC [20] y se presenta a continuación:

- Hasta del 10%, es preciso
- Entre el 11 y el 15% significa que existe una precisión aceptable.
- Entre el 16% y 20% precisión regular
- Mayor del 20% indica que la estimación es poco preciso

8. LAMINACIÓN EN FRÍO TERNIUM PESQUERÍA

8.1 Conceptos básicos

8.1.1 PLTCM

Línea de decapado y molino tándem en frío (Pickling line & tándem cold mil), es la línea de producción en la que se encuentra el molino tipo tándem situado en Ternium pesquería donde se realizó esta investigación, cuenta con 5 castillos o stands 6-High por donde pasa la lámina y es deformada reduciendo su espesor. La mayor reducción de lámina se realiza en el castillo o stand 1 (aprox. 40%), seguido del 2 y el 3 (aprox. 25%), mientras que en el castillo 4 y 5 solamente se le da a la lámina el acabado final (aprox. 9 y 1% respectivamente).

8.1.2 Taller de rodillos

En Ternium Pesquería se tiene una zona específica responsable de los rodillos de laminación, esta zona es el taller de rodillos, entre las funciones de este taller está manejar, rectificar, almacenar, monitorear y abastecer los rodillos para garantizar que la PLTCM jamás se detenga por falta de rodillos o por accidentes derivados de una calidad no adecuada de los mismos.

8.1.3 Secciones de un WR

El rodillo de trabajo tiene diferentes secciones dentro de su propia geometría, sin embargo, para el interés de este estudio solo se mencionarán las 3 principales que son

-Cuello motriz: sección del rodillo que tiene contacto con el motor accionador dentro de la PLTCM

-Tabla o cuerpo del rodillo: área encargada de contactar y deformar la lámina durante la campaña

-Cuello operador: sección donde se coloca una chumacera para que el rodillo gire libremente a la misma velocidad de la flecha del motor accionador.

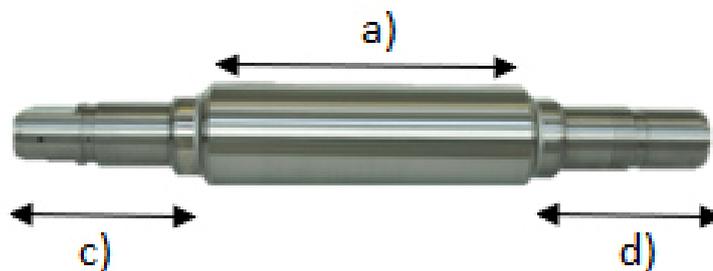


Figura 8.1 a) Tabla o cuerpo del rodillo, b) cuello operador, c) cuello motriz [24]

8.1.4 Rectificadora

Máquina equipada con muela, caliper, sensores, actuadores y un centro de control computacional, donde se monta el rodillo y es rectificado. Las 3 máquinas instaladas en el taller de rodillos de pesquería son marca Pomini.

8.1.5 Muela

Elemento cerámico con forma de disco utilizado en la rectificadora para tener el contacto directo con la superficie de los rodillos y producir el desbaste o remoción de material por medio de un desgaste abrasivo. Está compuesta por partículas de material abrasivo muy duro y gira sobre su eje dentro de la rectificadora a velocidad de corte, además de desplazarse por la superficie de la tabla del rodillo.

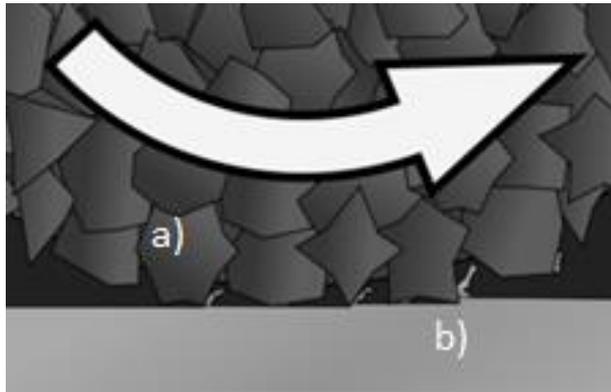


Figura 8.2 a) muela b) WR [25]

8.1.6 Caliper

Conjunto de sensores instalados en un carro móvil de la rectificadora, capaces de medir perfil, redondez, grieta, abolladura y diámetro del WR.

8.1.7 Hermanar rodillos

Es necesario que mientras los rodillos de trabajo se encuentren en servicio en un mismo castillo, ambos rodillos (tanto superior como inferior) tengan las mismas características (ver figura 2.4), tales como su rugosidad, diámetro, dureza etc., esto con el fin de evitar reventones o accidentes dentro de la PLTCM. Cuando se necesita ingresar 2 rodillos de diferentes características a laminar a un mismo castillo es necesario hacer modificaciones para lograr "hermanarlos" o eliminar estas diferencias, esto se hace tomando como referencia el rodillo con menor diámetro y rectificando el de mayor cuanto sea necesario hasta conseguir un diámetro similar entre ambos.

8.1.7 Pase

Movimiento de la piedra de un extremo de la tabla a otro con el fin de remover material continuamente.

8.1.8 Secuencia de rectificado

Conjunto de pases o instrucciones a una velocidad y características predefinidas.

8.1.9 Programa de rectificado

Conjunto de secuencias de rectificado que se complementan entre sí para lograr características requeridas de operación del rodillo de trabajo

8.1.10 Profundidad radial

La profundidad radial es una medida usada para comparar el radio actual de un rodillo respecto al que tenía cuando fue recién fabricado. Esta variable es muy práctica para saber cuánto material se le ha desbastado o ha perdido históricamente un rodillo, cuánta vida útil le resta y para qué aplicaciones es adecuado usarlo.

Se calcula restando el radio actual del rodillo al radio de fabricación para obtener un diferencial. Este diferencial se llama profundidad radial (ver figura 8.3)

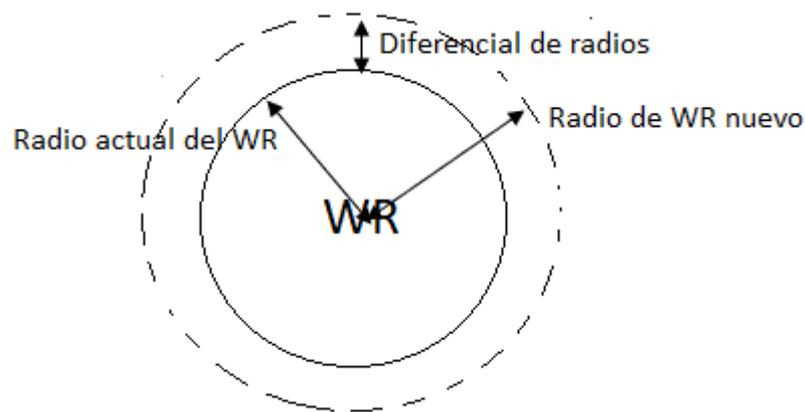


Figura 8.3 Profundidad radial

8.2 Ruta de rodillo de trabajo PLTCM-Taller de rodillos

Uno de los procesos de mayor interés en este trabajo es sin duda la ruta que sigue un WR de la PLTCM al taller de rodillos. Durante este proceso el WR se puede encontrar físicamente en 7 principales zonas o áreas de la planta que son: PL-TCM, carros móviles, piso, zona de armado y desarmado, stock automático y rectificadora siguiendo el proceso que se observa en la figura 8.4 y se explica a detalle a continuación:

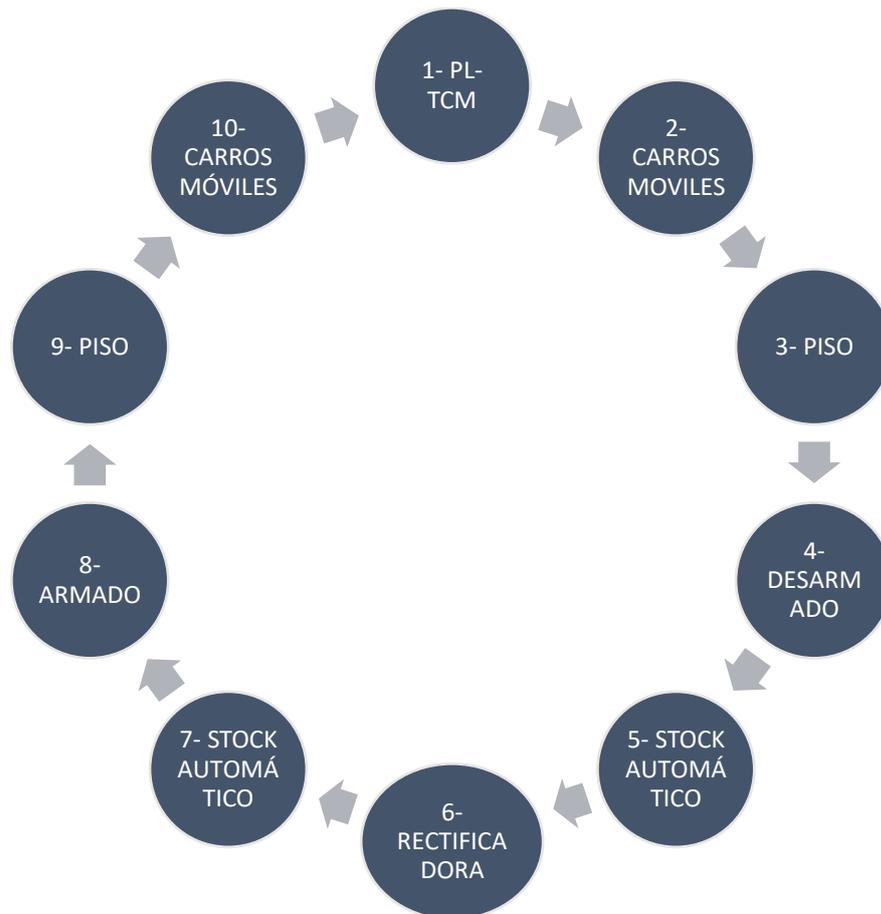


Figura 8.4 Diagrama de flujo de ruta de WR

- 1- PL-TCM: El rodillo se encuentra en la Pickling Line Tándem Cold Mill mientras está en servicio (deformando en frío la lámina), hasta que sea necesario realizar cambio de rodillos. Mientras el rodillo de trabajo está en la PLTCM se encuentra montado por medio de chumaceras o soportes que están instaladas en sus cuellos. Su cuello motriz está acoplado a un motor y en su extremo opuesto se le adecúa una chumacera con un rodamiento, el objetivo de este rodamiento o balero es darle la libertad al rodillo de girar a la misma velocidad del eje del motor y mantenerlo lo más alineado posible. Cuando es necesario realizar el cambio de rodillos, la PLTCM se detiene por algunos minutos.
- 2- Carros móviles: Una vez detenida la PLTCM, por medio de carros móviles se realiza el cambio de rodillos, estos carros contienen dos pares de estantes, en uno de ellos se colocan los rodillos sustitutos y en el otro se colocarán los desgastados. Durante el cambio de rodillos los carros móviles se acercan a la PLTCM, extraen los rodillos desgastados y los montan en los estantes libres, posteriormente insertar los sustitutos.
- 3- Piso: Una vez extraídos los rodillos desgastados de la PLTCM, por medio de una grúa operada de forma manual, se pasan a la zona de piso, esta zona contiene estantes y es una zona segura donde pueden almacenarse los rodillos, ahí permanecen algunas horas con el fin de

descender su temperatura y que recuperen sus propiedades a temperatura ambiente.

- 4- Desarmado: Ya que el rodillo se encuentra a temperatura ambiente, nuevamente por medio de una grúa operada manualmente, se traslada a la zona de armado y desarmado, en esta zona hay operadores que con la herramienta adecuada y siguiendo estrictas normativas de seguridad, desarman o desacoplan las chumaceras de los cuellos del rodillo.
- 5- Stock automático: Cuando el rodillo se encuentra desarmado, por medio de grúas automáticas, se traslada a la zona de stock automático, esta zona contiene estantes donde se colocan los rodillos, estos estantes están equipados con sensores que permiten conocer la posición exacta del rodillo lo cual permite tener un control preciso del inventario de rodillos en espera de ser rectificadas, además de conocer su condición y la cantidad de material que es necesario remover para recuperar su planeza. Es en esta zona donde los operadores deciden qué rodillos y bajo qué condiciones se van a rectificar.
- 6- Rectificadora: Una vez que el operador decide cual rodillo se rectificará y cómo se hará, envía la señal de forma remota a la grúa automática para enviarlo a la rectificadora. En la rectificadora, otro operador programa la secuencia de rectificado y gracias a la muela se remueve el material necesario al rodillo para recuperar sus condiciones de operación.
- 7- Stock automático: Cuando el rodillo está rectificado y listo para entrar nuevamente a laminar, se traslada nuevamente a la zona de stock automático.
- 8- Armado: Con la grúa automática, el operador mueve el rodillo a la zona de armado y desarmado donde se le acoplan nuevamente las chumaceras.
- 9- Piso: Ya con las chumaceras acoplada, el rodillo se encuentra listo para entrar a la PL-TCM, entonces se traslada a la zona de piso donde espera el cambio de rodillos próximo.
- 10-Carros móviles: El rodillo regresa a los carros móviles y ahora se coloca en un estante de rodillos sustitutos, y reemplaza a los rodillos ahora desgastados en la PLTCM.

8.3 Proceso de rectificado

El proceso de rectificado es el proceso de principal interés en este proyecto, es el que se busca optimizar y por lo tanto conviene explicarlo a detalle en esta sección.

El proceso, como ya se explicó, consiste en remover o desbastar al rodillo de trabajo las capas desgastadas durante la campaña, esto se logra por medio de un mecanismo de desgaste abrasivo entre la muela y el rodillo. En el proceso, el rodillo se encuentra asentado en un estante que lo hace girar sobre su propio eje como se muestra en la figura 8.5.



Figura 8.5 Rectificadora en operación

La muela, por su parte, gira de igual forma sobre su eje en el mismo sentido del rodillo de trabajo, la rectificadora por medio de un sistema de control acerca la muela al rodillo hasta que entran en contacto, de tal forma que por diferencia de rugosidad y dureza termina por desgastarlo abrasivamente. La muela se encuentra montada sobre un carro móvil que se desliza de forma lineal a lo largo del rodillo, con esto se logra rectificar de manera uniforme la tabla del rodillo de trabajo.

El proceso de rectificado consiste en los siguientes pasos:

- 1- **Medición de dureza:**
Para efectos de control de calidad, cada que se rectifica un rodillo de trabajo en Ternium Pesquería, se toma el dato de la dureza inicial, esto se hace utilizando un durómetro Equotip, siguiendo la norma ASTM A 956 – 06 y el procedimiento explicado en la sección 9.4.
- 2- **Carga de programa de rectificado:**
Dependiendo del tipo de rodillo y la cantidad de material a remover, se selecciona un programa y se carga en el software de control de la rectificadora para iniciar su ejecución.
- 3- **Inspección del proceso:**
A cada momento el operador inspecciona el proceso de forma remota y toma decisiones en base a las mediciones que la rectificadora (por medio del caliper) hace en tiempo real.
- 4- **Finalización del programa:**
Después de lograr los parámetros requeridos, el operador acepta la finalización del programa. En caso de no ser logrados, el proceso puede reiniciarse en cualquier punto.
- 5- **Medición de dureza:**
Nuevamente se mide la dureza con el durómetro Equotip para comprarla con a dureza inicial.
- 6- **Inspección visual:**

El operador revisa y se asegura que no haya grietas o marcas indeseadas en la superficie del rodillo y en caso de existirlas, con una pequeña lija se corrigen manualmente o de ser necesario, se reinicia el proceso de rectificado. Finalmente, se le coloca un líquido anticorrosivo para evitar la corrosión del rodillo.

8.3.1 Secciones de programa de rectificado de WR.

El programa de rectificado que se carga al software de control de la rectificadora, como ya se explicó, se conforma en una serie de pases y secuencias.

Cada tipo de rodillo tiene su programa preestablecido, a continuación, se describen los bloques o secciones de un programa típico para rodillos de trabajo de la PLTCM.

1. Desbaste: Esta sección es la más agresiva con el WR ya que aquí se realiza aproximadamente el 40% del desbaste total.
2. Semi-desbaste: En esta sección se realiza aproximadamente el 35% del desbaste total en aproximadamente 10 pases, donde la piedra avanza un poco más lento con respecto a la sección de desbaste.
3. Acabado: Aquí se realiza el 20% del desbaste total en aproximadamente 6 pases.
4. Semi-acabado: El resto del desbaste se hace durante el semi-acabado (aproximadamente 1% del total), esta sección es crítica ya que en gran medida de ella depende la rugosidad y textura final del WR. Por esta razón la piedra avanza notablemente más lento que en las demás secciones.

8.4 Aceros producidos en Ternium Pesquería

8.4.1 Aceros suaves

En esta clasificación de aceros entran los que se usan para ser estampados, tienen un esfuerzo de cedencia de 250MPa y se subclasifican con dos nomenclaturas distintas según sus características:

- DDQ: (Deep Drawing Quality): Aceros de calidad de estampado profundo.
- EDDQ: (Extra-Deep Drawing Quality): Aceros de calidad de estampado extra profundo.

8.4.2 Calidad comercial

Son aceros relativamente suaves que se suelen utilizar en aplicaciones que no demanden gran resistencia mecánica, su esfuerzo de cedencia es de aproximadamente 250MPa y se subclasifican también con dos nomenclaturas distintas según sus características:

- CQ (Commercial Quality): Calidad comercial.
- DQ (Drawing Quality): Calidad de estampado.

8.4.3 Aceros BH

Los aceros endurecidos al horno (Bake Hardening) tienen esfuerzos de cedencia mayores a los suaves y comerciales (270-340 MPa) gracias su proceso de endurecimiento. Su nomenclatura está compuesta en sus primeros 3 dígitos por el esfuerzo de cedencia en mega pascales seguido de las siglas BH.

- 270BH
- 340BH

8.4.4 Aceros IF

Los aceros libres de intersticios (Interstitial Free) son aceros completamente desoxidados y con un contenido de carbono muy bajo. La descripción sin intersticios se refiere a la fijación de nitrógeno disuelto y átomos de carbono en la estructura del metal mediante microaleación durante su producción, usando titanio y niobio. La eliminación de estos solutos mejora la conformabilidad del acero. El esfuerzo de cedencia de estos aceros ronda entre los 340 y los 440 MPa y su nomenclatura se compone de el valor de dicho esfuerzo en los primeros 3 dígitos seguido de las siglas IF

- 340IF
- 390IF
- 440IF

8.4.5 Aceros HSLA

Los aceros de la gama HSLA (High Strength Low Alloy) se caracterizan por ser endurecidos por precipitación y disminución de tamaño de grano. Las excelentes propiedades de dureza, resistencia al impacto y a la fatiga que se alcanzan gracias a dichos mecanismos de endurecimiento permite que esta gama de aceros sea aplicada por lo general en piezas de estructura como elementos de suspensión, refuerzos, travesaños, largueros, piezas de bastidor, entre muchas otras [26]. Su nomenclatura consiste en el esfuerzo de cedencia seguido de las siglas HSLA.

- 390HSLA
- 440HSLA
- 590HSLA
- 690HSLA

8.4.6 Aceros DP

Son aceros de alta resistencia y están conformados por dos fases (ferrita y martensita), por esta razón su nomenclatura es DP (Dual Phase). Esta estructura permite lograr muy alta resistencia a la fatiga y resiliencia y por eso estos aceros son utilizados en la industria automotriz especialmente en el chasis de los automóviles. Su esfuerzo de cedencia oscila entre los 590 y 980 MPa según el tipo de acero y su nomenclatura se conforma de las siglas DP seguido de este valor.

- DP590

- DP780
- DP980

8.4.7 Acero eléctrico

Es un acero al silicio con excelente propiedades magnéticas, este acero generalmente se usa para formar los núcleos de transformadores y rotores de motores eléctricos.

8.5 Características físicas de rodillos de trabajo

Un rodillo de trabajo nuevo, antes de ser utilizado para laminar en frío, tiene las siguientes características:

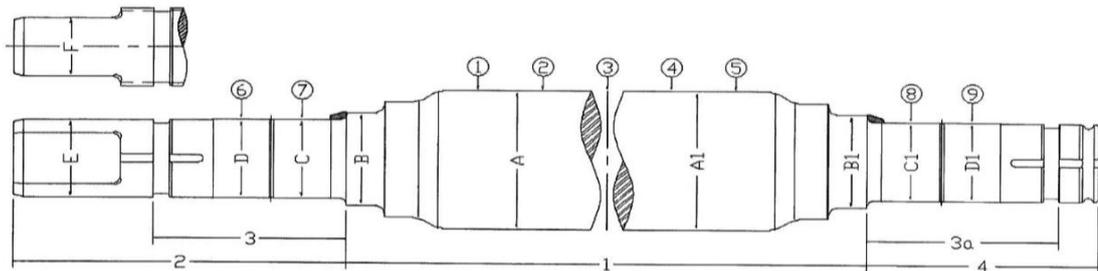


Figura 8.6 Dimensiones de un rodillo de trabajo [27]

8.5.1 Dureza

Usando como referencia la figura 8.6, la dureza de los rodillos en los diferentes puntos se observa en la siguiente tabla:

Punto	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Valor de dureza (HLD)	867-885	867-885	867-885	867-885	867-885	615-667	615-667	615-667	615-667

Tabla 8.1 Dureza de rodillo recién fabricado en los puntos indicados en la figura 8.6. [27]

8.5.2 Dimensiones

Basándonos nuevamente en la figura 8.6, las dimensiones de WR se pueden observar en la tabla 8.2.

Zona	Dimensión (mm)	Tolerancia
A	495	+0.5/0
B	330	-0/-0.089
C	280	-0.210/-0.250
D	280	-0.210/-0.250
E	278	-0.100/-0.152
F	209	0.100/-0.152
1	2690	+0.5/0
2	1035	+0.5/0
3	601	+0.5/0
4	725	+0.5/0
A	495	+0.5/0
B	330	-0/-0.089
C	280	-0.210/-0.250
D	280	-0.210/-0.250
3 ^a	601	+0.5/0

Tabla 8.2 Dimensiones de rodillo recién fabricado en las zonas indicadas en la figura 8.6. [27]

Peso aproximado: 4560 Kg

8.5.3 Composición química

Estos rodillos están fabricados de acero grado 5CRDH y la composición química típica es la siguiente

Elemento químico	% Composición
C	0.81
Mn	0.37
P	0.015 max
S	0.012 max
Si	0.40
Cr	5.12
Mo	0.48
V	0.06

Tabla 8.3 Composición química típica de rodillos (según fabricante). [41]

9. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

9.1 Introducción

El procedimiento que se ha utilizado para desarrollar el modelo se describe a continuación:

1. Extracción de datos de PLTCM.
2. Extracción de datos del taller de rodillos.
3. Mediciones físicas de dureza de los rodillos de trabajo.
4. Conformación de base de datos.
5. Análisis de base de datos.
6. Desarrollo de modelo matemático.



Figura 9.1 Metodología seguida en el proyecto.

A continuación, se explicarán a detalle cada uno de los pasos de la metodología planteada.

9.2 Extracción de datos de PLTCM.

La línea PLTCM con la que se estuvo trabajando cuenta con un sistema de adquisición y almacenamiento de datos en tiempo real, medidos con diferentes sensores. Entre los sensores se encuentran sensores de velocidad, de presión, de posición, entre otros. La información que contiene la base de datos cuenta con un gran número de variables y los datos se encuentran almacenados con respecto a rollo de lámina terminado, es decir, cada que el molino produce un rollo, el sistema registra sus características finales y las condiciones en las que fue fabricado.

Algunos de los datos de rollo disponibles en esta base de datos son, su código único, la hora exacta de entrada de lámina al molino, su hora de salida, su esfuerzo de cedencia, espesor, ancho, largo, velocidad de laminación, grado de acero, fuerza de laminación, longitud de arco de contacto, velocidad del motor de los rodillos de trabajo, código de los rodillos de trabajo, intermedios y de apoyo involucrados en su fabricación, su diámetro y posición, entre

muchos otros. Sin embargo, fue necesario reorientar y filtrar la información para obtener solamente la necesaria sobre los rodillos de trabajo.

El manejo de esta información se hizo programando en lenguaje Visual Basic diferentes macros en el software Microsoft Excel. Estas macros permitieron limpiar, organizar y desde luego optimizar la extracción e interpretación de datos.

Algunas de las variables o datos de los rodillos de trabajo que se consideraron para su análisis y eventual inclusión al modelo final fueron las siguientes:

No Rodillo: Código único del rodillo de trabajo.

Castillo: Castillo o stand donde estuvo trabajando el rodillo de trabajo durante la campaña.

Posición: Posición en la que estuvo el rodillo de trabajo (inferior o superior) con respecto a la lámina durante la campaña.

Fecha Salida PLTCM: Fecha en la que terminó el rodillo de trabajo la campaña.

Tonelaje: Peso del material que laminó el rodillo de trabajo durante la campaña.

Ángulo de arco de contacto (α): Valor en radianes del ángulo de contacto.

Kilómetros laminados (K mL)

Grado de acero laminado.

Ancho del rollo (b)

Largo de rollo (l)

Fuerza de gap (F_g)

9.3 Extracción de datos del taller de rodillos.

El taller de rodillos donde se desarrolló esta investigación tiene la función principal de mantener en óptimas condiciones los rodillos de trabajo, apoyo e intermedios de la PLTCM. Esto incluye como tarea principal, el rectificado de rodillos.

Cada que se rectifica un rodillo, se miden en tiempo real por medio del caliper algunos datos de operación y se almacenan en una base de datos. Por medio nuevamente de macros programadas en Visual Basic, esta información fue filtrada y se seleccionaron estratégicamente las variables o datos de mayor correlación con el desgaste de los rodillos de trabajo durante su campaña. Las variables finalmente seleccionadas fueron las siguientes:

No Rodillo: Código único del rodillo de trabajo.

Número de máquina rectificadora: Código único de la máquina rectificadora.

Fecha de inicio del proceso de rectificación.

Fin del proceso de rectificación.

Diámetro inicial del rodillo de trabajo.

Diámetro final del rodillo de trabajo.

9.4 Mediciones físicas de dureza de los rodillos de trabajo

Se realizaron mediciones físicas de dureza a los WR durante más de 2 meses para incluir los datos obtenidos en la base de datos general. La cantidad de datos obtenidos sobrepasó los 1000 datos y la metodología seguida para las mediciones se explica a continuación.

9.4.1 Metodología

La obtención de la información sobre la dureza de los rodillos de trabajo se realizó utilizando un durómetro Equotip modelo piccolo bambino 2 [40] y siguiendo la norma ASTM A 956 – 06. [18]



Figura 9.2 Equotip modelo piccolo bambino 2 [40]

Se seleccionaron 3 áreas de interés del rodillo para medir su dureza, las tres ubicadas sobre la tabla del rodillo. La primera se determinó como “área motriz” la cual lleva ese nombre ya que es la más cercana a la zona donde el rodillo se acopla con el motor dentro de la PLTCM, el área motriz se situó a 12 pulgadas del borde la tabla del WR como se muestra en la figura 9.3, la segunda es la “área centro” que se situó justo en el centro del rodillo y la tercera zona se denominó como “área operador” que se situó a 12 pulgadas del borde de la tabla opuesto al lado motriz como se muestra en la figura 9.3.

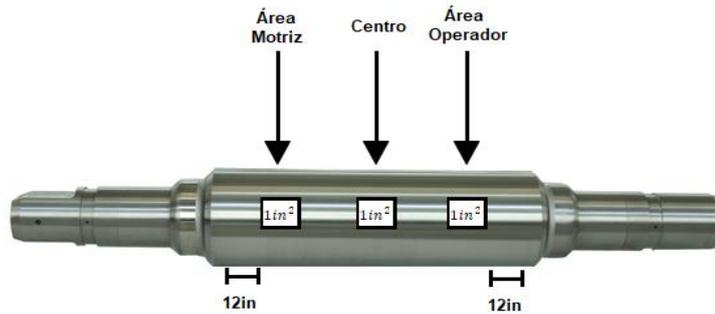


Figura 9.3 Áreas de medición de dureza en WR. [24]

Según la norma ASTM A 956 – 06, para tener un dato de dureza representativo de cualquier zona del rodillo, es necesario hacer 5 mediciones en un área de 1 pulgada cuadrada, teniendo un espacio de al menos 2cm en entre cada punto de medición o zona de impacto y calcular el promedio aritmético de las 5 mediciones. Se definieron esos parámetros en un procedimiento el cual fue utilizado para obtener los datos de dureza. Se estandarizaron las zonas de impacto para realizar las mediciones en cada área como se muestra en la figura 9.4. Antes de realizar dichas pruebas, las áreas de medición se limpiaron con líquido desengrasante para evitar cualquier interferencia en la medición.

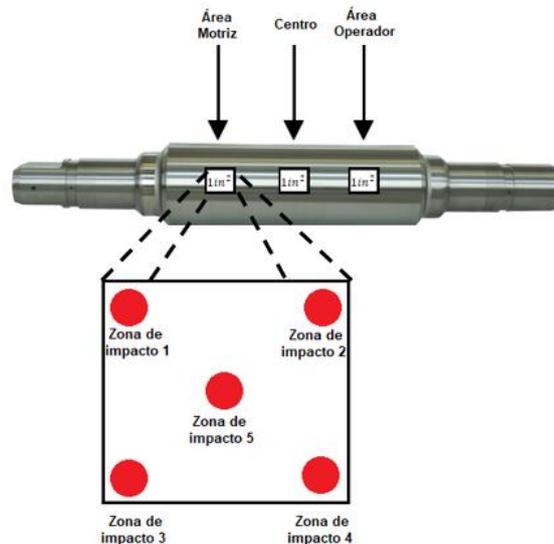


Figura 9.4 Zonas de impacto estandarizadas. [24]

9.4.2 Etapas de medición de dureza

Cuando un rodillo de trabajo termina una campaña de laminación, antes de ser rectificado cuenta con una capa desgastada en su superficie ocasionada por el trabajo durante dicha campaña y tiene un aspecto color oscuro y pareciera que su superficie estuviera “quemada”, por esta razón, al rodillo de trabajo desgastado se le llama rodillo quemado. Cuando el rodillo sale de la rectificadora tiene un aspecto muy diferente, independientemente de su perfil recto, su color es metálico y su superficie cuenta con mayor brillo, por esta razón a estos rodillos se les llama rodillos brillantes.

Las mediciones de dureza se fueron realizadas por los operadores del taller de rodillos en cada campaña de rectificación, cuando el WR estaba en su estado quemado (H_q) y cuando estaba en su estado brillante (H_b) como se muestra en el diagrama de la figura 9.5. Los datos se registraron en un reporte para posteriormente incluirlos a la base de datos general.

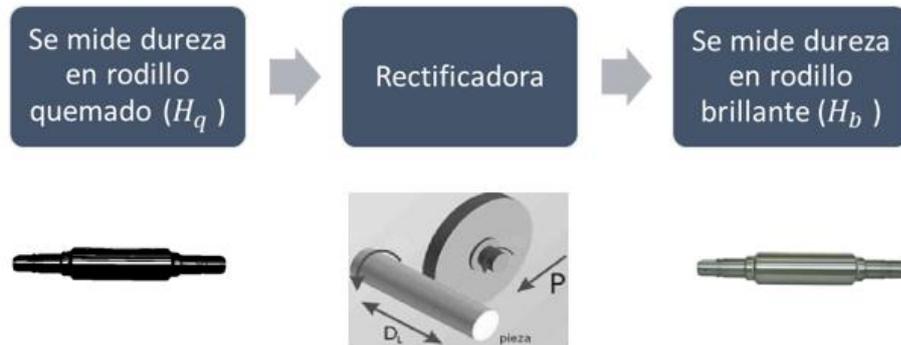


Figura 9.5 Etapas de medición de dureza. [24, 25]

9.4.3 Estudio R&R

Para validar el sistema de medición de dureza y conocer con certidumbre la veracidad de los datos medidos se hizo un estudio de R&R utilizando la herramienta de software Minitab y siguiendo la metodología que se describe a continuación.

1. Toma de muestra
2. Análisis estadístico un Minitab
3. Coeficiente de variación del estudio

9.4.3.1 Toma de muestra

Los datos que se utilizaron para el estudio R&R fueron medidos por 2 operadores seleccionados al azar. Cada uno midió la dureza en las áreas operador, centro y motriz 10 veces en un mismo par de rodillos. Finalmente se calculó el promedio aritmético de la dureza en las 3 zonas de cada WR para obtener su dureza representativa (cada dato utilizado en la muestra es el promedio aritmético de la dureza en las 3 zonas del rodillo). De esta manera, la muestra se compuso de 40 datos distribuidos de la siguiente manera:

Operador	Rodillo	Número de datos
Operador 1	Rodillo 1	10
	Rodillo 2	10
Operador 2	Rodillo 1	10
	Rodillo 2	10
Total:		40

Tabla 9.1 Distribución de datos (muestra) utilizados para estudio R&R.

9.4.3.2 Análisis estadístico en Minitab

Una vez obtenida la muestra se procedió a calcular los componentes de varianza y desviación estándar. Esto se logró con la herramienta Minitab la cual hace un análisis basado en la comparación de la variación de las mediciones entre partes (rodillos) y operadores y básicamente calcula 6 datos de interés

COMPONENTES DE LA VARIANZA

- Varianza por repetibilidad ($\vartheta^2_{repetibilidad}$): Variación entre datos obtenidos por un mismo operador con el mismo instrumento.
- Varianza por reproducibilidad ($\vartheta^2_{reproducibilidad}$): Variación entre datos obtenidos por diferentes operadores con el mismo instrumento.
- Varianza R&R: Variación total del sistema

$$\vartheta^2_{R\&R} = \vartheta^2_{repetibilidad} + \vartheta^2_{reproducibilidad} \quad (\text{Ecuación 9.1})$$

COMPONENTES DE DESVIACIÓN ESTANDAR

Desviación estándar por repetibilidad

$$\vartheta_{repetibilidad} = \sqrt{\vartheta^2_{repetibilidad}} \quad (\text{Ecuación 9.2})$$

Desviación estándar por reproducibilidad

$$\vartheta_{reproducibilidad} = \sqrt{\vartheta^2_{reproducibilidad}} \quad (\text{Ecuación 9.3})$$

Desviación estándar R&R

$$\vartheta_{R\&R} = \sqrt{\vartheta^2_{Gage\ R\&R}} \quad (\text{Ecuación 9.4})$$

9.4.3.3 Coeficiente de variación del estudio

Para calcular la variación de datos del estudio se optó por hacer la corrección a la ecuación 7.5, para tener un panorama mayor de la varianza de los datos, en lugar de utilizar simplemente la varianza como lo sugiere la fórmula, se utilizó 6ϑ (explicado en la sección 7.7), de esta forma se tendrá una idea de la variación máxima del sistema de medición ya que se contempla más de 99% de los datos de la muestra. La fórmula corregida y finalmente utilizada es la siguiente:

$$C_v = \frac{6\vartheta}{\bar{x}} \times 100 \quad (\text{Ecuación 9.5})$$

9.4.4 Medición de dureza “por pase”

Como mecanismo de caracterización alterno, se realizaron pruebas con algunas muestras seleccionadas al azar para medir su dureza “por pase”. Estas mediciones se realizaron a 5 diferentes profundidades del rodillo durante el proceso de rectificado.

Las mediciones se hicieron en 5 momentos o etapas del programa de rectificado siguiendo estrictamente la metodología planteada en la sección 9.4.1. Los momentos mencionados se presentan en el siguiente diagrama:



Figura 9.6 Etapas de mediciones de dureza "por pase"

En el diagrama de la figura 9.6 se representan las etapas del programa de rectificado en las que se midió la dureza de los rodillos "por pase". Se realizaron mediciones al inicio del programa, después de la sección de desbaste, después del semi-desbaste, después del acabado y al final del programa. Cada que se necesitaba hacer una medición en alguno de estos instantes, se detuvo la máquina rectificadora para seguir la metodología descrita en la sección 9.4.1. Es importante mencionar que el dato final de dureza representativo de cada medición fue el promedio aritmético de la dureza de cada área de medición, es decir, la suma de la dureza en el área operador, motriz y centro, dividida entre 3 (ver ecuación 9.11).

9.5 Conformación de base de datos general

Después de realizar el trabajo de extracción de datos de manera computacional y con mediciones físicas de dureza, se procedió a conformar una base de datos general. Esta base de datos general se conformó de 4 bases de datos secundarias que se muestran a continuación:

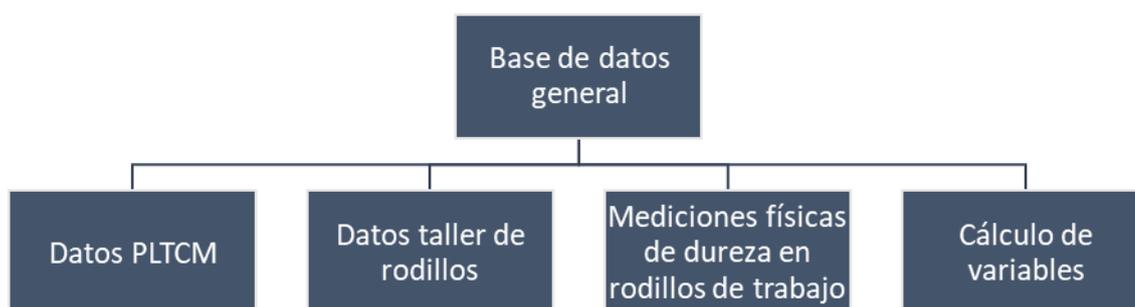


Figura 9.7 Diagrama de composición de base de datos general.

La sección de "cálculo de variables" son variables que no estaban en ninguna de las bases de datos secundarias y se calcularon de forma independiente. Estas variables son:

Radio del rodillo:

$$R = \frac{D}{2} \quad (\text{Ecuación 9.6})$$

Kilómetros laminados por rodillo de trabajo: Es la longitud de todos los rollos que se laminaron con un determinado rodillo en una campaña seleccionada dividiendo el resultado entre 1000

$$KmL = \frac{1}{1000} \sum_{i=1}^n l_i \quad (\text{Ecuación 9.7})$$

Donde n es el número de rollos laminados.

Esfuerzo en contacto WR-lámina por cada rollo:

$$\sigma = \frac{F_g}{(\alpha R)b} \quad (\text{Ecuación 9.8})$$

Esfuerzo acumulado en la campaña:

$$\sigma_{acum} = \sum_{i=1}^n \sigma_i \quad (\text{Ecuación 9.9})$$

Esfuerzo promedio en campaña:

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_i \quad (\text{Ecuación 9.10})$$

Dureza promedio de rodillo quemado:

$$\frac{H_{q_{motriz}} + H_{q_{centro}} + H_{q_{operador}}}{3} = H_{q_{ave}} \quad (\text{Ecuación 9.11})$$

Dureza promedio de rodillo brillante:

$$\frac{H_{b_{motriz}} + H_{b_{centro}} + H_{b_{operador}}}{3} = H_{b_{ave}} \quad (\text{Ecuación 9.12})$$

Diferencial de dureza por rectificado: Cuando el rodillo de trabajo se rectifica, se mide antes de entrar a la rectificadora y cuando el rodillo ya está rectificado (como se explica en la sección 9.4.2), para medir el diferencial de dureza que sufre el rodillo por este proceso, se utiliza la siguiente fórmula:

$$H_{b_{ave}} - H_{q_{ave}} = \Delta H_{rectificadora} \quad (\text{Ecuación 9.13})$$

Diferencial de dureza en PLTCM: Cuando el rodillo se encuentra recién rectificado tiene el valor de dureza obtenido por el proceso de rectificado, cuando sale de la PLTCM después de una campaña el rodillo tiene otro valor de dureza debido al trabajo al que fue sometido durante la campaña. Ambos valores de dureza se miden (ver figura 9.8) y para medir su diferencial se aplica la siguiente fórmula:

$$H_{b_{ave}} - H_{q_{ave}} = \Delta H_{PLTCM} \quad (\text{Ecuación 9.13})$$

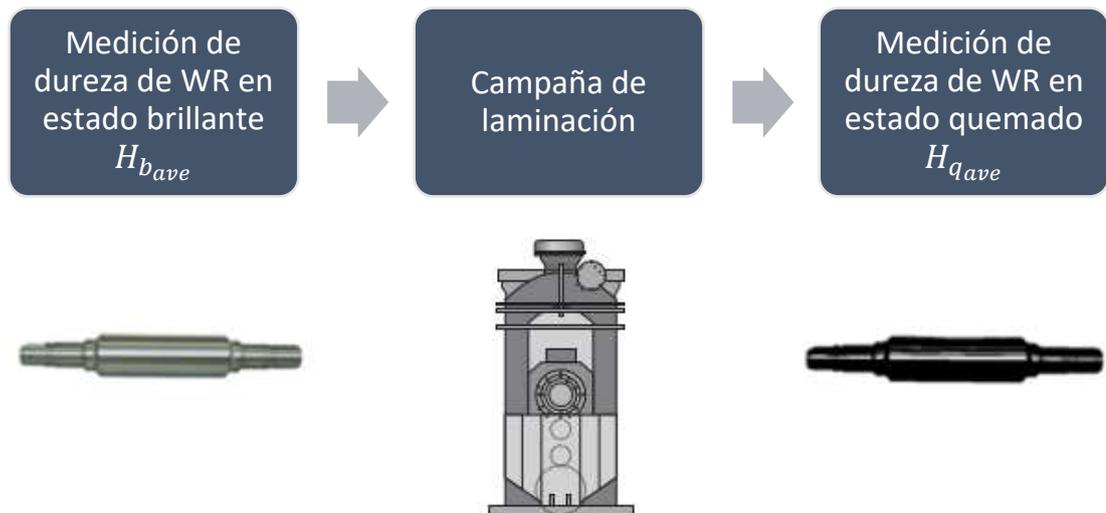


Figura 9.8 Medición de diferencial de durezas debido a la campaña. [23,24]

Relación micras por tonelada:

Este parámetro se utiliza para medir la eficiencia de los rodillos de trabajo de la PLTCM, calculando las micras de diámetro perdidas (por desgaste) en relación con las toneladas de acero producidas por la línea en un determinado intervalo de tiempo. Se calcula con la ecuación 10.14 donde $D_{inicial}$ es el diámetro inicial del WR al inicio del intervalo de tiempo mencionado, D_{final} es el diámetro a su final y Ton_{PLTCM} las toneladas que se produjeron en ese lapso.

$$M_t = \frac{D_{inicial} - D_{final}}{Ton_{PLTCM}} \quad (\text{Ecuación 9.15})$$

9.6 Caracterización microestructural de rodillo de trabajo.

Se realizó una caracterización exhaustiva de la microestructura de un WR utilizando microscopía óptica y electrónica de barrido. En las siguientes secciones se describirá la metodología y los equipos utilizados. Esta caracterización fue realizada por personal de la empresa Ternium en el laboratorio de su planta de Pesquería N.L.

9.6.1 Extracción de muestras

Para realizar el análisis metalográfico del material que compone al rodillo de trabajo se extrajo un fragmento de WR de la zona que se indica (encerrada) en la figura 9.9.



Figura 9.9 Zona de WR de donde se extrajo la muestra [24]



Figura 9.10 Fragmento de rodillo enviada a laboratorio

Una vez extraído el fragmento de WR se envió al laboratorio de Ternium planta Pesquería México para su preparación y análisis metalográfico. Ahí se hicieron 2 cortes con las dimensiones mostradas en la figura 9.11 identificados como muestra 1 y 2. La muestra 1 es una sección de la superficie o área longitudinal del WR, mientras que la muestra 2 es una sección del área transversal del fragmento. Con el análisis metalográfico de la muestra 2 se busca ver el contraste de fases respecto a la profundidad radial. Ambas muestras fueron montadas en baquelita y atacadas con el reactivo Nital al 2% el cual consiste en una solución compuesta por 98% de alcohol etílico ($\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$) y 2% de ácido nítrico (HNO_3).



Figura 9.11 Identificación de muestras preparadas y sus dimensiones.

9.6.2 Análisis por microscopía óptica

Este análisis fue realizado utilizando el equipo Zeiss Axio Observer, se capturó una imagen por cada muestra, ambas a 500x, además se hizo un análisis de porcentaje de fases presentes en las microestructuras y su tamaño de grano siguiendo la norma ASTM E112.



Figura 9.12 Microscopio óptico Zeiss Axio Observer [31]

9.6.3 Análisis por microscopía electrónica de barrido

Utilizando el equipo JEOL IT-300LV se capturó una imagen por cada muestra a 1000x además se capturaron imágenes de la muestra 1 a 3000x, 5000x y 10000x. Se utilizó un voltaje de haz de 10000kV, detectando la señal de electrones retro dispersados. Además, se realizó un análisis químico en la muestra 1 con la detección de la señal de espectrometría de difracción de rayos-X (EDX), obteniendo el porcentaje de peso atómico de los elementos presentes en 3 puntos de interés de microestructura atómica de la muestra.



Figura 9.13 SEM modelo JEOL IT-300LV [32]

9.7 Modificación de proceso de rectificado.

Después de analizar a detalle los resultados globales de este proyecto se tomó la determinación de modificar la práctica de rectificado de los rodillos participantes en campañas de laminación en los castillos 1, 2 y 3 de la línea

PL-TCM de Ternium Pesquería. Esta modificación consistió en bajar el promedio de desbaste un 20% en los rodillos provenientes del castillo 1 y un 12% a los provenientes de los castillos 2 y 3 (con respecto al desbaste promedio convencional). Esta modificación se implementó el 1 de julio del 2018 y se monitoreó durante aproximadamente 5 meses (de julio a noviembre del 2018), suspendiéndola en el mes de septiembre por cuestiones de seguridad del proceso, los resultados se presentan en la sección 10.6.

Práctica convencional		Práctica modificada	
Procedencia de rodillo	% de desbaste*	Procedencia de rodillo	% de desbaste*
Castillo 1	100%	Castillo 1	80%
Castillo 2	100%	Castillo 2	88%
Castillo 3	100%	Castillo 3	88%
Castillo 4	100%	Castillo 4	100%
Castillo 5	100%	Castillo 5	100%

Tabla 9.2 Tabla comparativa de % de desbaste entre práctica convencional y modificada *% calculados con respecto al desbaste promedio convencional.

9.8 Desarrollo de modelo matemático

Para desarrollar un modelo matemático que englobó cada una de las correlaciones entre las variables más importantes del proceso de laminación en frío de la PLTCM Ternium Pesquería se utilizó el software estadístico XLSTAT. Se realizó un análisis estadístico de regresión múltiple entre variables siguiendo la forma de ecuación siguiente:

$$\bar{y} = cte + \bar{m}\bar{b} \quad (\text{Ecuación 9.16})$$

Donde \bar{y} es la variable dependiente \bar{m} es el coeficiente de correlación, \bar{b} es la variable independiente del proceso y cte representa un valor constante.

La variable dependiente que se asignó fue ΔH_{PLTCM} ya que de este diferencial depende el desgaste y la cantidad de material que es necesario remover a un WR después de una campaña de laminación, mientras que como variables independientes se tomaron las presentes en la base de datos, algunas de las principales son KmL , σ_{acum} , t_r , entre otras.

10. RESULTADOS

10.1 Estudio R&R

Los resultados del estudio R&R que ayudaron a validar la precisión del sistema de medición se muestran a continuación.

10.1.1 Toma de muestra de datos

La muestra de datos que se utilizó y se recabó según la metodología expuesta en la sección 9.4.1 se presenta en la tabla 10.1, es importante mencionar que ambos rodillos cuentan con un diámetro similar.

	No. de dato	Dureza HLD	
		Operador 1	Operador 2
Rodillo 1	1	823	819
	2	825	813
	3	823	809
	4	819	819
	5	819	817
	6	822	823
	7	816	816
	8	821	816
	9	812	819
	10	824	818
Rodillo2	1	828	827
	2	829	829
	3	827	830
	4	828	828
	5	829	829
	6	826	831
	7	825	829
	8	827	828
	9	824	827
	10	832	828

Tabla 10.1 Datos utilizados en estudio R&R

10.1.2 Componentes de varianza y desviación estándar del sistema

Con la ayuda del software Minitab, y con la muestra obtenida previamente, se obtienen los componentes de varianza y desviación estándar del sistema de medición que se utilizó para medir la dureza de los WR que se estudian en este trabajo.

COMPONENTES DE LA VARIANZA	COMPONENTES ESTANDAR	DESVIACIÓN
$\vartheta^2_{repetibilidad} : 9.7036 \text{ HLD}^2$ $\vartheta^2_{reproducibilidad} : 0.3170 \text{ HLD}^2$ $\vartheta^2_{Gage R\&R} : 10.0206 \text{ HLD}^2$	$\vartheta_{repetibilidad} : 3.115 \text{ HLD}$ $\vartheta_{reproducibilidad} : 0.563 \text{ HLD}$ $\vartheta_{Gage R\&R} : 3.1655 \text{ HLD}$	

Tabla 10.2 Datos obtenidos de Minitab resultado de estudio R&R.

Como podemos observar, el sistema cuenta con una desviación estándar total de ± 3.16 HLD, es decir, que su valor real de dureza del WR puede oscilar en ese rango con respecto a la medición (véase sección 7.2). Este valor puede ser de gran utilidad para evaluar la precisión del sistema de medición, sin embargo, (como se explicó en la sección 7.7) es conveniente calcular el valor de 6ϑ y coeficiente de varianza del sistema para tener mayor certidumbre de la variación de los datos obtenidos.

10.1.3 Cálculo de 6ϑ y coeficiente de varianza del sistema

$$6\sigma \text{ Gage R\&R} = 6(3.115) = 18.99 \text{ HLD} = \pm 9.495 \text{ HLD}$$

La media aritmética de la muestra resultó: $\bar{x} = 824 \text{ HLD}$

$$\text{Coeficiente de variación del estudio} = \frac{6\sigma}{\bar{x}} = \frac{\pm 9.495}{824} \times 100 = \pm 1.15\%$$

Se obtiene un coeficiente de variación del sistema de ± 1.15 . Como se plantea en la sección 7.8 y según la clasificación propuesta por el INEC [20], el sistema de medición utilizado para medir la dureza de WR se clasifica como un sistema preciso, lo que lo valida y le da credibilidad a las apreciaciones y conclusiones que se deriven de este análisis.

10.2 Mediciones de dureza “por pase”

Según la metodología definida en la sección 9.4.4, se realizaron las mediciones de dureza “por pase” a 25 rodillos seleccionados al azar, una vez obtenidos los resultados de las mediciones de dureza, se graficaron comparándolas con la profundidad de desbaste, a continuación, se presentan 7 conjuntos de datos representativos del comportamiento de los WR según el castillo donde trabajaron durante su campaña, las gráficas restantes pueden consultarse en la sección de anexos.

Castillo 1		
UEHF0271		
	% profundidad de desbaste	Dureza (HLD)
Punto 1	0%	831
Punto 2	18%	828
Punto 3	63%	829
Punto 4	95%	832
Punto 5	100%	836

Tabla 10.3 Datos de mediciones "por pase" muestra UEHF0271 del castillo 1

Castillo 2		
UEHF0207		
	% profundidad de desbaste	Dureza (HLD)
Punto 1	0%	836
Punto 2	44%	835
Punto 3	84%	835
Punto 4	95%	835
Punto 5	100%	834

Tabla 10.4 Datos de mediciones "por pase" muestra UEHF0207 del castillo 2

Castillo 3		
UEHF0152		
	% profundidad de desbaste	Dureza (HLD)
Punto 1	0%	827
Punto 2	56%	823
Punto 3	83%	822
Punto 4	97%	824
Punto 5	100%	825

Tabla 10.5 Datos de mediciones "por pase" muestra UEHF0152 del castillo 3

Castillo 4				
UEHF0286		AEHF0054		
	% profundidad de desbaste	Dureza (HLD)	% profundidad de desbaste	Dureza (HLD)
Punto 1	0%	840	0%	837
Punto 2	57%	838	24%	834
Punto 3	88%	838	44%	832
Punto 4	96%	840	81%	848
Punto 5	100%	839	100%	854

Tabla 10.6 Datos de mediciones "por pase" muestras UEHF0286 y AEHF0054 del castillo 4

Castillo 5				
UEHF0270		UEHF0210		
	% profundidad de desbaste	Dureza (HLD)	% profundidad de desbaste	Dureza (HLD)
Punto 1	0%	816	0%	827
Punto 2	16%	822	26%	824
Punto 3	47%	834	59%	821
Punto 4	61%	837	95%	823
Punto 5	100%	842	100%	823

Tabla 10.7 Datos de mediciones "por pase" muestras UEHF0270 y UEHF0210 del castillo 5

10.3 Base de datos general

Se realizaron más de 1000 mediciones de dureza y se conformó la base de datos general mencionada en la sección 9.5, relacionando los datos obtenidos vía medición física con los del taller de rodillos, la PLTCM y variables calculadas aritméticamente. Por cuestiones de espacio, se presentan a continuación solo 3 muestras seleccionadas al azar (de las 1000 totales) de datos extraídas de la base de datos general. La base de datos completa se podrá consultar en la dirección electrónica descrita en el capítulo de referencias (16) de este documento. [30]

MUESTRA 1:

No Rodillo	AEHF0023
Proveedor	AKERS

Tabla 10.8 Datos generales muestra 1

Condición	Quemado	Brillante
Mes	29/06/2018 23:27	30/06/2018 00:30
Área Motriz	810	848
Centro	807	843
Área Operador	816	842
Promedio	811	844

Tabla 10.9 Datos de medición física de dureza de muestra 1

Medición	Quemado	Brillante
Mes	29/06/2018 23:27	30/06/2018 00:30
Diámetro	427.723	-

Tabla 10.10 Datos de taller de rodillos de muestra 1

Castillo	5
Posición	B
Fecha	27/06/2018 19:51
Tonelaje	646
Kilometraje	72
Esfuerzo	5245
Esfuerzo Acumulado	157359
Kilometraje acumulado por tipo de acero	
EDDQ1	20
DDQ1	12
DQIF1	25
340BH1	15

Tabla 10.11 Datos de PLTCM de muestra 1

MUESTRA 2:

No Rodillo	AEHF0099
Proveedor	AKERS

Tabla 10.12 Datos generales muestra 2

Condición	Quemado	Brillante
Mes	29/06/2018 23:27	30/06/2018 00:30
Área Motriz	830	831
Centro	825	836
Área Operador	835	826
Promedio	830	831

Tabla 10.13 Datos de medición física de dureza de muestra 2

Medición	Quemado	Brillante
Mes	02/06/2018 15:27	02/06/2018 16:40
Diámetro	427.785	-

Tabla 10.14 Datos de taller de rodillos de muestra 1

Castillo	1
Posición	B
Fecha	01/06/2018 19:51
Tonelaje	2001
Kilometraje	205
Esfuerzo	1500
Esfuerzo Acumulado	37258
Kilometraje DQ	190
acumulado CQ	15
por tipo de acero	

Tabla 10.15 Datos de PLTCM de muestra 2

MUESTRA 3:

No Rodillo	UEHF00286
Proveedor	AKERS

Tabla 10.16 Datos generales muestra 3

Condición	Quemado	Brillante
Mes	20/05/2018 02:00	20/05/2018 03:30
Área Motriz	808	810
Centro	806	808
Área Operador	810	810
Promedio	808	809

Tabla 10.17 Datos de medición física de dureza de muestra 3

Medición	Quemado	Brillante
Mes	29/06/2018 23:27	30/06/2018 00:30
Diámetro	480.2	-

Tabla 10.18 Datos de taller de rodillos de muestra 3

Castillo	2
Posición	T
Fecha	27/06/2018 19:51
Tonelaje	646
Kilometraje	150
Esfuerzo	1208
Esfuerzo Acumulado	58320
Esfuerzo acumulado por tipo de acero	DQ 85
	CQ 15
	DQ1 20
	CQ1 30

Tabla 10.19 Datos de PLTCM de muestra 3

10.4 Análisis de base de datos general

El análisis de la base de datos general se realizó con la herramienta XLSTAT de Microsoft Excel que es un paquete estadístico. Esta herramienta genera una matriz de correlación múltiple donde se puede observar fácilmente una variable y su coeficiente de correlación respecto a las demás. Esta matriz se presenta en la tabla 10.20.

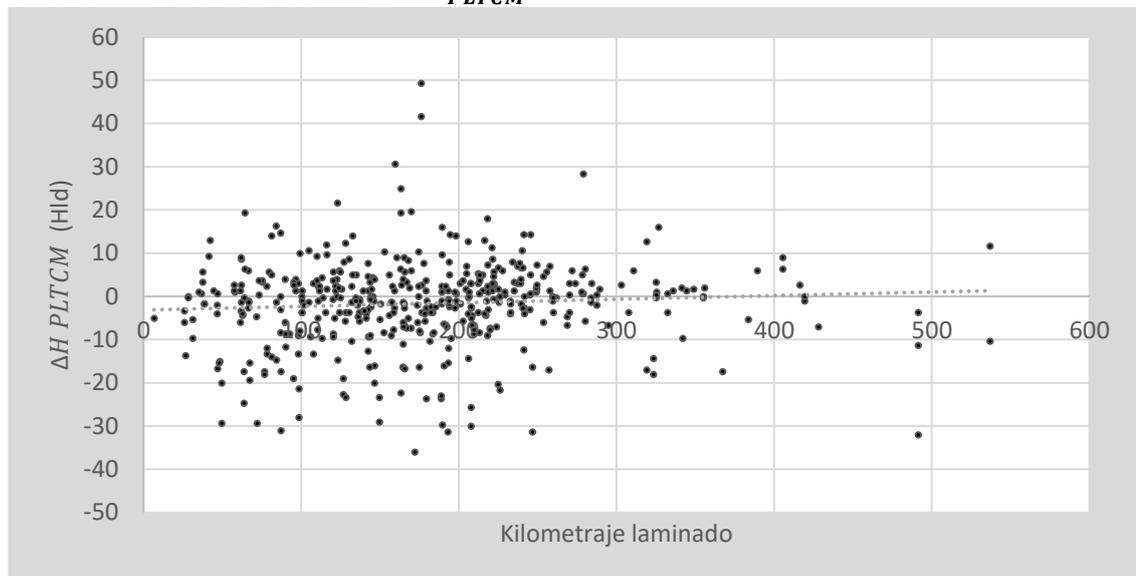
Se observaron y seleccionaron las correlaciones más fuertes dentro de la matriz (con coeficientes de correlación mayores a .3 o menores a -.3) y una vez seleccionadas se procedió a graficar sus valores para contrastar la variación de una con respecto a la otra.

											Grados de acero laminado							Reducción de espesor tr	ΔH_PLTCM
	Hb_ave	Diámetro	Profundidad Radial	Castillo o stand	Posición	Tonelaje laminado	Kilometraje Laminado	Esfuerzo promedio	Esfuerzo Acomulado	Suaves	Comercial	BH	Si (eléctrico)	P	IF	HSLA	DP		
Hb_ave	1	0.596	-0.596	-0.300	-0.009	0.047	-0.154	-0.164	-0.061	-0.071	-0.109	-0.030	-0.074	0.013	0.068	0.031	0.053	0.243	-0.157
Diámetro	0.596	1	-1.000	-0.468	0.013	0.158	-0.180	-0.354	-0.252	-0.118	-0.065	-0.048	-0.119	-0.008	0.017	-0.032	0.018	0.455	0.246
Profundidad Radial	-0.596	-1.000	1	0.468	-0.013	-0.158	0.180	0.354	0.252	0.118	0.065	0.048	0.119	0.008	-0.017	0.032	-0.018	-0.455	-0.246
Castillo o stand	-0.300	-0.468	0.468	1	0.016	-0.492	0.181	0.741	0.337	0.096	0.049	0.037	0.066	0.012	0.070	0.065	0.095	-0.944	-0.410
Posición	-0.009	0.013	-0.013	0.016	1	-0.003	0.019	0.018	-0.001	0.019	-0.001	0.034	0.037	-0.035	-0.011	0.010	-0.018	-0.018	-0.023
Tonelaje laminado	0.047	0.158	-0.158	-0.492	-0.003	1	0.544	-0.419	0.041	0.330	0.259	0.192	-0.053	0.057	-0.031	-0.004	-0.040	0.504	0.289
Kilometraje Laminado	-0.154	-0.180	0.180	0.181	0.019	0.544	1	-0.002	0.198	0.341	0.719	0.178	-0.025	-0.060	-0.055	-0.108	-0.105	-0.257	0.072
Esfuerzo promedio	-0.164	-0.354	0.354	0.741	0.018	-0.419	-0.002	1	0.509	-0.007	-0.055	0.034	0.102	0.005	0.118	0.039	0.151	-0.679	-0.473
Esfuerzo Acomulado	-0.061	-0.252	0.252	0.337	-0.001	0.041	0.198	0.509	1	0.028	0.080	-0.030	0.021	0.099	0.233	0.089	0.191	-0.305	-0.136
Suaves	-0.071	-0.118	0.118	0.096	0.019	0.330	0.341	-0.007	0.028	1	-0.216	0.524	-0.054	-0.118	-0.090	-0.272	-0.157	-0.037	0.005
Comercial	-0.109	-0.065	0.065	0.049	-0.001	0.259	0.719	-0.055	0.080	-0.216	1	-0.223	-0.053	-0.105	-0.098	-0.359	-0.234	-0.176	0.091
BH	-0.030	-0.048	0.048	0.037	0.034	0.192	0.178	0.034	-0.030	0.524	-0.223	1	-0.032	-0.110	-0.073	-0.205	-0.116	0.012	-0.002
Si (eléctrico)	-0.074	-0.119	0.119	0.066	0.037	-0.053	-0.025	0.102	0.021	-0.054	-0.053	-0.032	1	0.217	-0.015	-0.010	-0.019	-0.059	-0.045
P	0.013	-0.008	0.008	0.012	-0.035	0.057	-0.060	0.005	0.099	-0.118	-0.105	-0.110	0.217	1	-0.054	0.122	-0.066	0.011	0.018
IF	0.068	0.017	-0.017	0.070	-0.011	-0.031	-0.055	0.118	0.233	-0.090	-0.098	-0.073	-0.015	-0.054	1	0.035	0.490	-0.079	-0.043
HSLA	0.031	-0.032	0.032	0.065	0.010	-0.004	-0.108	0.039	0.089	-0.272	-0.359	-0.205	-0.010	0.122	0.035	1	0.204	-0.016	-0.048
DP	0.053	0.018	-0.018	0.095	-0.018	-0.040	-0.105	0.151	0.191	-0.157	-0.234	-0.116	-0.019	-0.066	0.490	0.204	1	-0.125	-0.048
Reducción de espesor tr	0.243	0.455	-0.455	-0.944	-0.018	0.504	-0.257	-0.679	-0.305	-0.037	-0.176	0.012	-0.059	0.011	-0.079	-0.016	-0.125	1	0.368
ΔH_PLTCM	-0.157	0.246	-0.246	-0.410	-0.023	0.289	0.072	-0.473	-0.136	0.005	0.091	-0.002	-0.045	0.018	-0.043	-0.048	-0.048	0.368	1

Tabla 10.20 Matriz de correlaciones del base de datos

A continuación, se presentan las gráficas donde se comparan las variables de mayor interés después de observar la matriz de correlación.

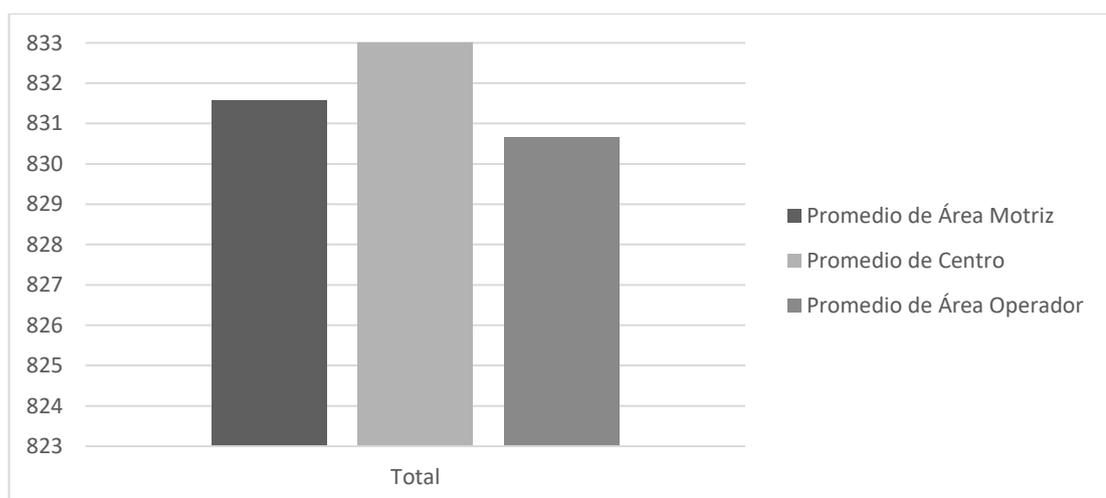
10.4.1 Correlación KmL - ΔH_{PLTCM}



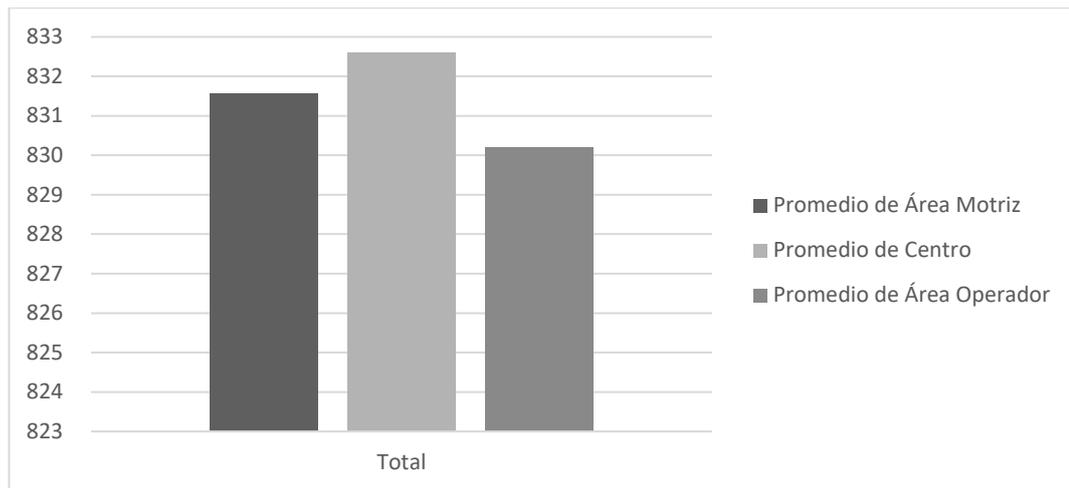
Gráfica 10. 1 Gráfico comparativo KmL vs ΔH_{PLTCM}

En la gráfica 10.1 podemos observar el contraste entre las variables KmL y ΔH_{PLTCM} , se nota una baja correlación entre ambas, manteniéndose la línea de tendencia casi constante en el valor de 0 HLD. Podemos ver también una mayor población alrededor de los 200 KmL lo que nos dice que la mayoría de las campañas de laminación rondan este valor.

10.4.2 Correlación Dureza por zona - Shifting



Gráfica 10.2 Dureza promedio en áreas motriz, centro y operador, de rodillos de trabajo superiores quemados.



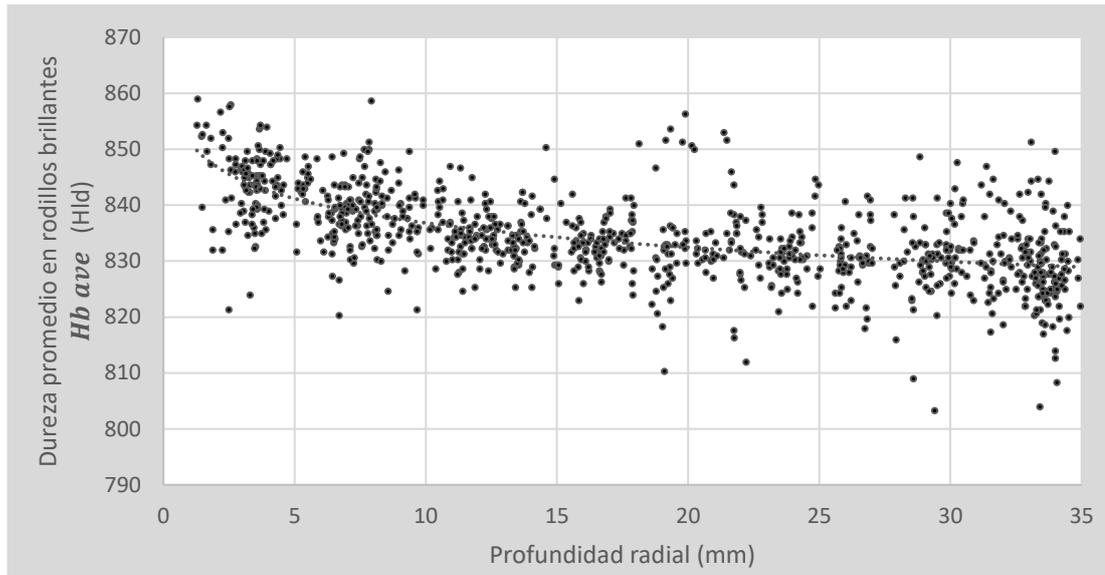
Gráfica 10.3 Dureza promedio en áreas motriz, centro y operador, de rodillos de trabajo inferiores quemados.

En las gráficas 10.2 y 10.3 se tomaron todas las mediciones de dureza realizadas a rodillos en estado quemado (recién salidos de la campaña de laminación) y se calculó el promedio aritmético de la dureza de todos los rodillos en cada área de medición. Estos datos se subdividieron según la posición (superior o inferior) que ocuparon los rodillos durante la campaña de laminación previa.

La gráfica 10.2 representa la dureza por zona de los rodillos superiores, en ella se observa un valor de dureza promedio mayor en el área centro con respecto a las áreas operador y motriz, estas últimas zonas presentan valores de dureza bastante similares entre sí.

La gráfica 10.3 representa la dureza por zona de los rodillos inferiores, en ella, igual que en los rodillos superiores, se observa un valor de dureza promedio mayor en el área centro con respecto a las áreas operador y motriz, pero en este caso el diferencial entre la dureza en las áreas motriz y operador es un poco mayor respecto a la gráfica 10.2.

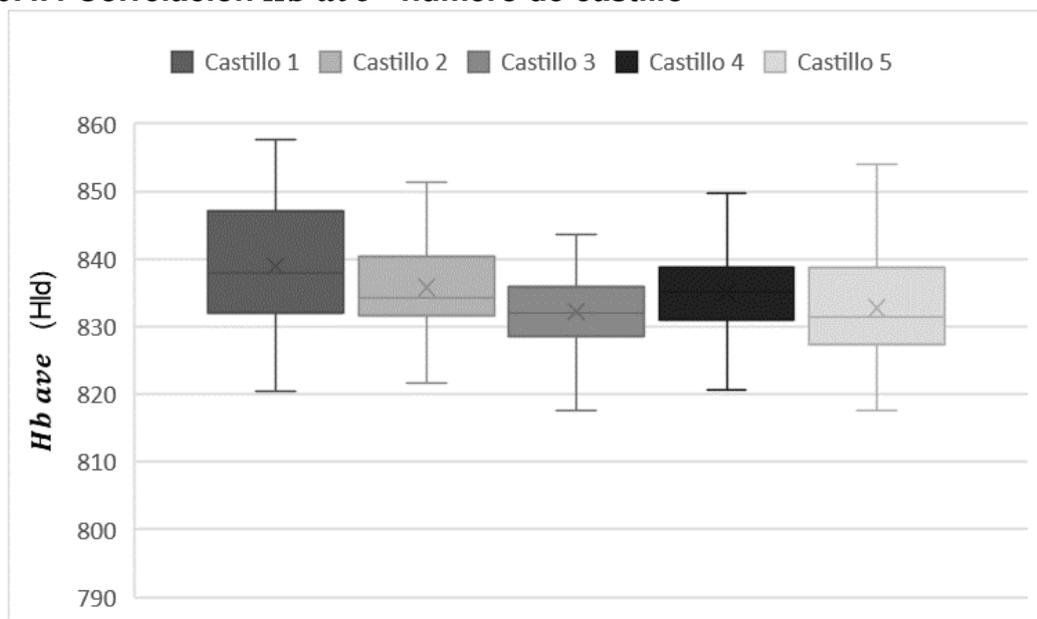
10.4.3 Profundidad radial - Hb_{ave}



Gráfica 10.4 Hb_{ave} – Profundidad radial y su línea de tendencia

En la gráfica 10.4 se presenta la relación entre las variables Hb_{ave} y la profundidad radial del rodillo (que se explicó a detalle en la sección 8.1.10), se observa una caída de dureza con respecto al aumento de radial. Mientras los rodillos con una profundidad de 2mm pueden alcanzar una dureza hasta de 860 HLD, la mayoría de los que cuentan con una de 35mm alcanzan una dureza de aproximadamente 830 HLD en promedio.

10.4.4 Correlación Hb_{ave} - número de castillo

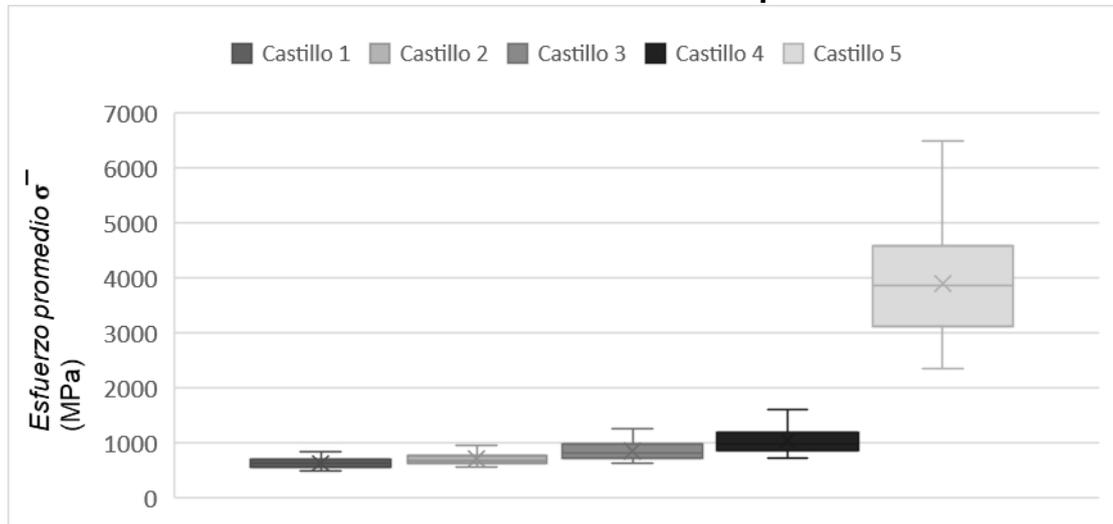


Gráfica 10.5 Gráfico comparativo Hb_{ave} vs número de castillo

Para comparar la correlación existente entre la dureza promedio del rodillo de trabajo brillante Hb_{ave} y el número de castillo al que es ingresado para su

campana de laminación se presenta una gráfica tipos “cajas y bigotes” (10.5). En este gráfico es evidente que en el castillo 1 y 2, los valores de media y mediana de $H_{b\text{ave}}$ son superiores que el resto de los castillos, lo que de entrada propone que, por práctica, los rodillos con mayor dureza y diámetro preferentemente se colocan en los primeros 2 castillos.

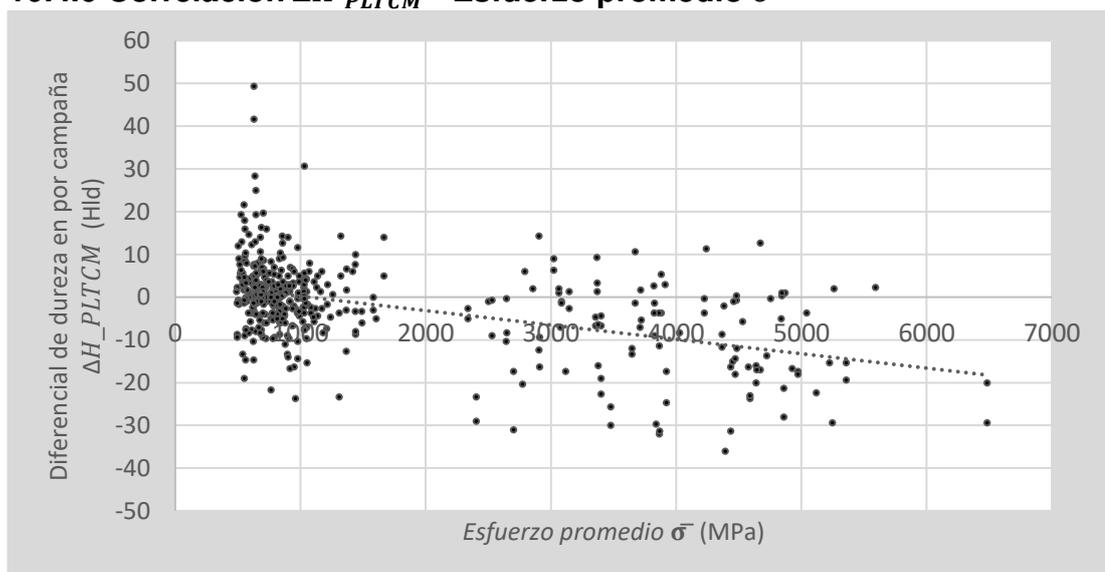
11.4.5 Correlación número de castillo – Esfuerzo promedio $\bar{\sigma}$



Gráfica 10.6 Gráfico comparativo Esfuerzo promedio $\bar{\sigma}$ vs número de castillo

Se comprobó la alta correlación entre las variables Esfuerzo promedio $\bar{\sigma}$ y número de castillo con el gráfico 10.6. En él se observa un incremento del $\bar{\sigma}$ con respecto al número de castillo, siendo el castillo 5 en el que claramente se lamina a mayores esfuerzos y el castillo 1, 2 y 3 donde menores esfuerzos son aplicados.

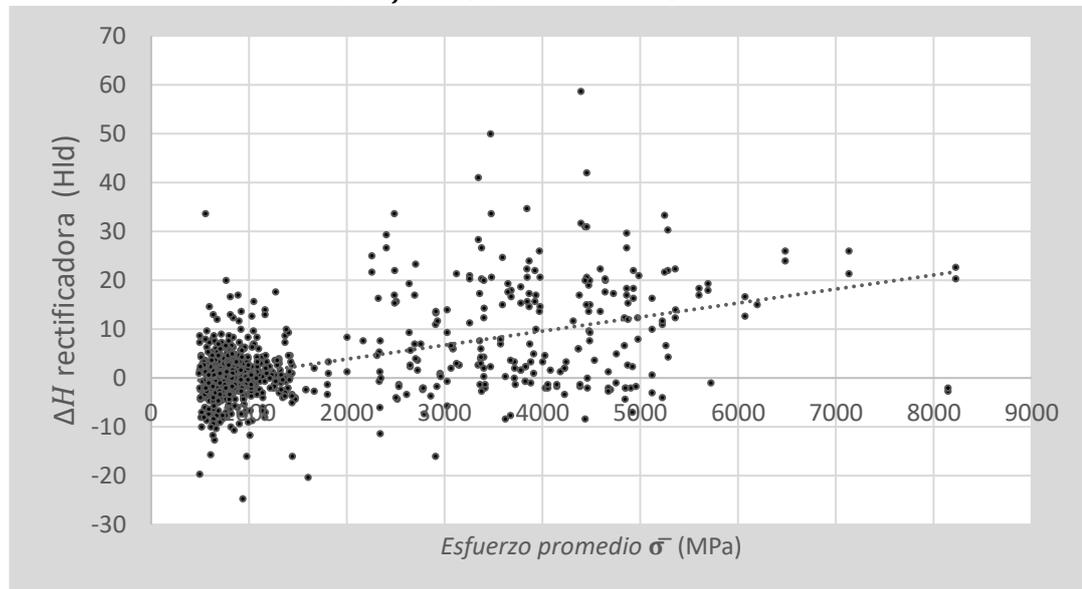
10.4.6 Correlación ΔH_{PLTCM} - Esfuerzo promedio $\bar{\sigma}$



Gráfica 10.7 Endurecimiento en PLTCM según el esfuerzo promedio aplicado en contacto WR-lámina y su línea de tendencia

En la gráfica 10.7 se comparan las variables $\bar{\sigma}$ y ΔH_{PLTCM} (que fue calculado con la ecuación 10.13) y se observa una notable disminución de ΔH_{PLTCM} con respecto al aumento del esfuerzo promedio durante la campaña. Cabe mencionar que la mayor parte de la población de datos se encuentra en el rango de 500 a 1000 MPa.

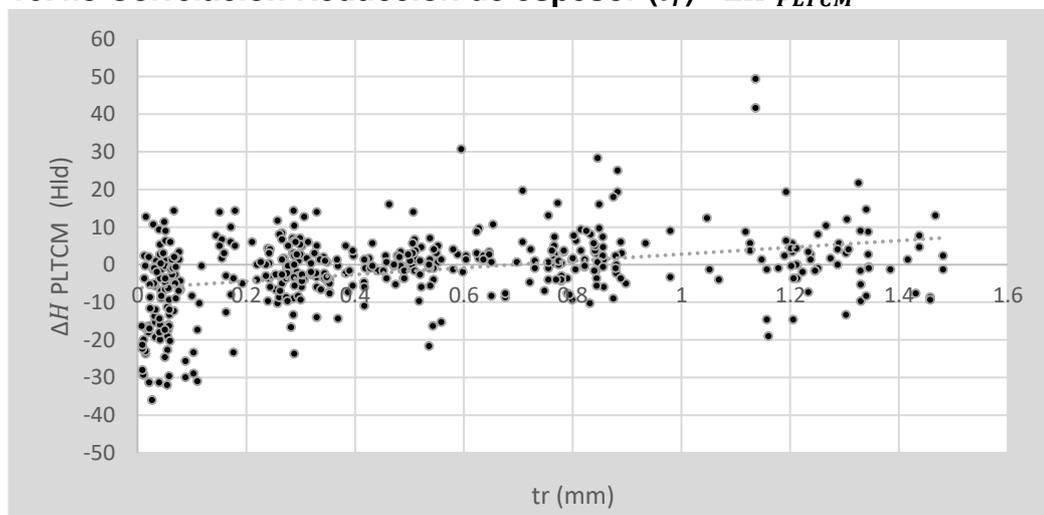
11.4.7 Correlación $\Delta H_{rectificadora}$ - Esfuerzo promedio $\bar{\sigma}$



Gráfica 10.8 Endurecimiento en rectificadora según el esfuerzo promedio aplicado en contacto WR-lámina durante su campaña y su línea de tendencia

Otra correlación de interés es la existente entre esfuerzo promedio $\bar{\sigma}$ durante la campaña de laminación y el diferencial de dureza en la rectificadora $\Delta H_{rectificadora}$, la gráfica 10.8 presenta una relación importante entre ambas, la línea de tendencia se nota ascendente casi de forma proporcional. Un comportamiento bastante similar al de la gráfica 10.7 solo que totalmente a la inversa.

10.4.8 Correlación Reducción de espesor (t_r) - ΔH_{PLTCM}



Gráfica 10.9 Endurecimiento de rodillo en rectificadora según la reducción de espesor de la lámina y su línea de tendencia

La última correlación de interés graficada es la que hay entre t_r y ΔH_{PLTCM} , se puede ver en la tabla 10.20 un coeficiente de correlación de 0.368 el cual es considerable y además positivo, confirmando es la gráfica 10.9 dicha relación entre variables.

10.5 Caracterización microestructural de rodillo de trabajo.

Se presentan las imágenes de las muestras 1 y 2 de la figura 9.11 (sección longitudinal y transversal respectivamente) obtenidas utilizando las técnicas de microscopía óptica y electrónica de barrido descritas en la sección 9.6.

10.5.1 Análisis por microscopía óptica

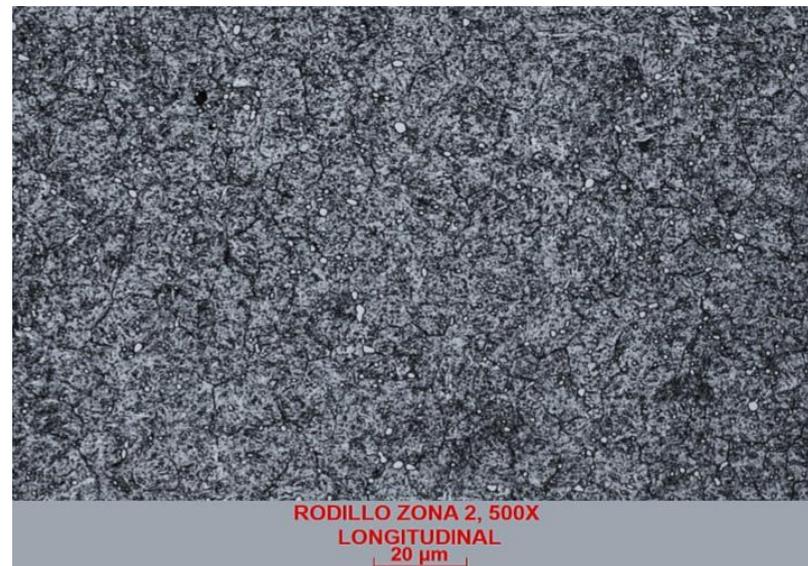


Figura 10.1 Microestructura de muestra 1 (sección longitudinal)

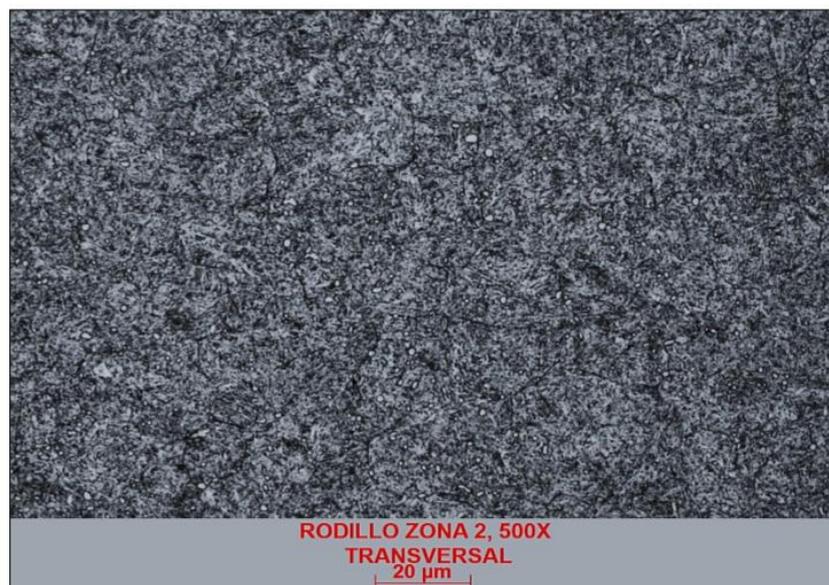


Figura 10.2 Microestructura de muestra 2 (sección transversal)

Se observa en ambas muestras una microestructura prácticamente idéntica con un 99% de fase martensítica y un 1% de carburo de cromo según el análisis de porcentaje de fases presentes. Además, según este estudio, el tamaño de grano ASTM E112 en ambas muestras es de 10.5.

10.5.2 Análisis con microscopio electrónico de barrido

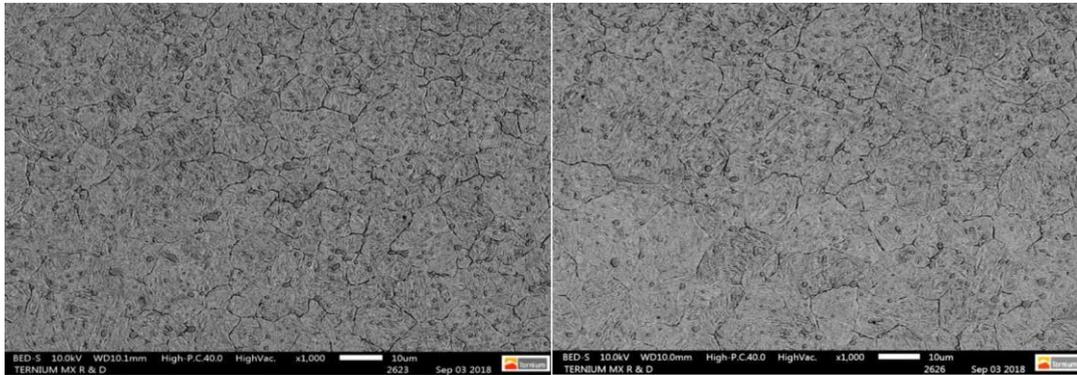


Figura 10.3 Imagen izquierda: Microestructura muestra 1 vista a 1000X, Imagen derecha: Microestructura muestra 2 vista a 500X

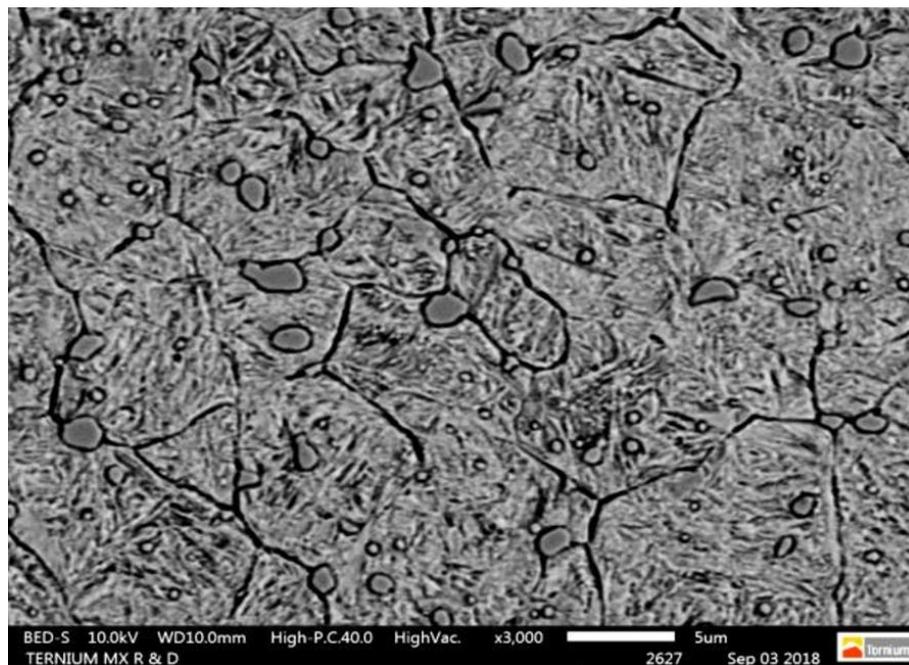


Figura 10.4 Microestructura muestra 2 vista a 3000X

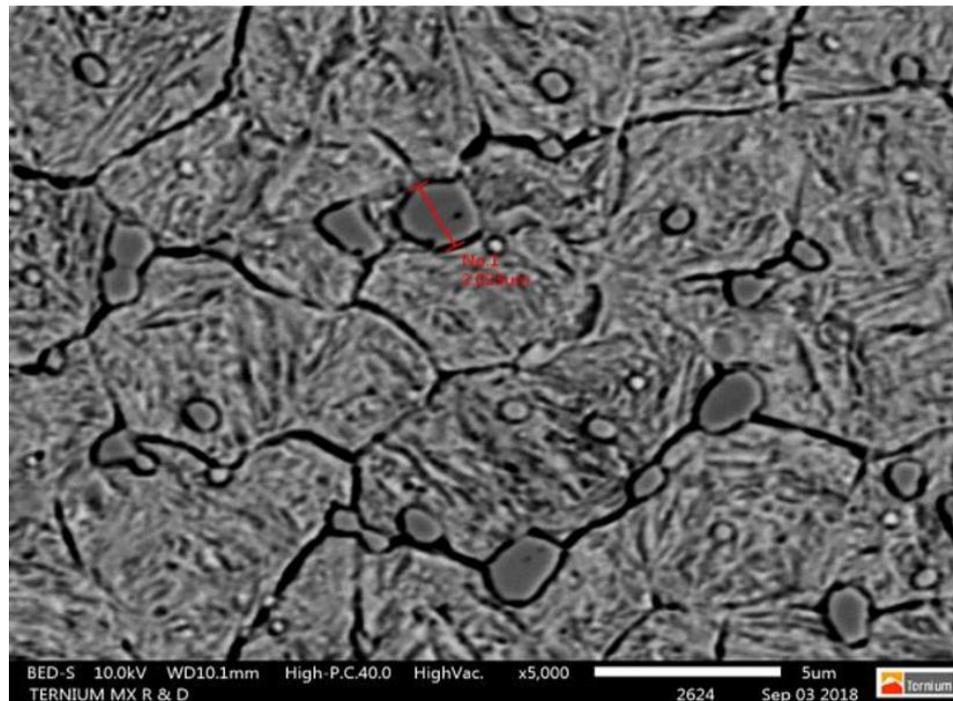


Figura 10.5 Microestructura muestra 2 vista a 5000X

En la figura 10.3 se observa una comparación microestructural de las muestras 1 y 2, y es evidente que la muestra 1 tiene una distribución más uniforme de carburos de cromo, mientras que en la 2 se observa una mayor cantidad de carburos en su parte superior de la imagen a comparación de la inferior. En las figuras 10.4 y 10.5 se puede ver la microestructura de la muestra 1 a 3000x y 5000x respectivamente confirmando la presencia de una matriz martensítica y carburos de cromo.

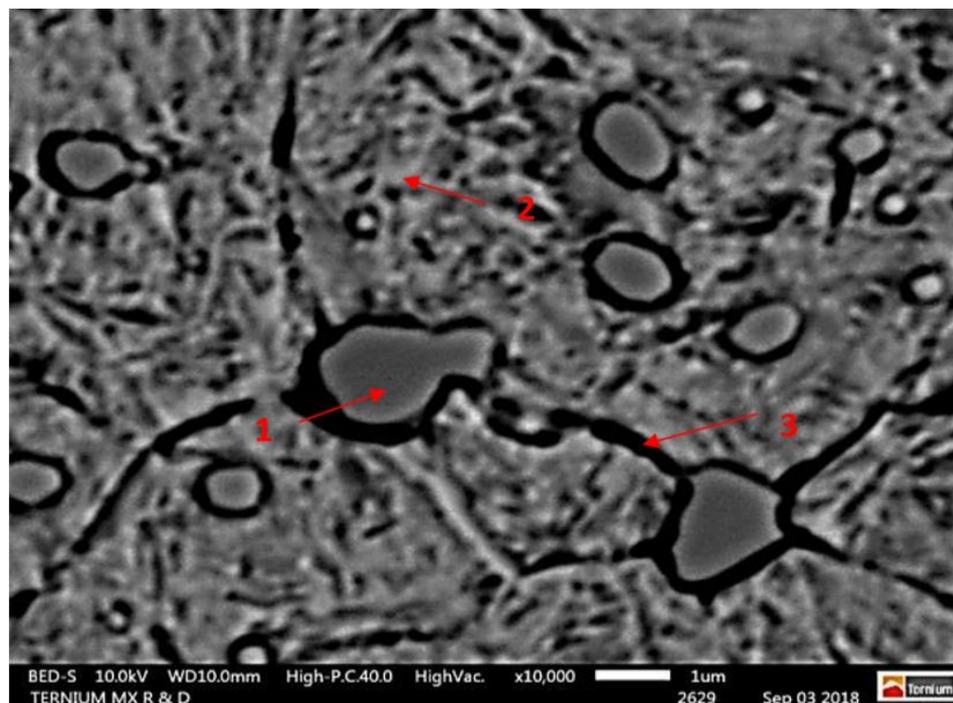


Figura 10.6 Microestructura muestra 1 vista a 10000X. Puntos 1,2y3 señalan zonas donde se realizó análisis por EDX.

Punto 1

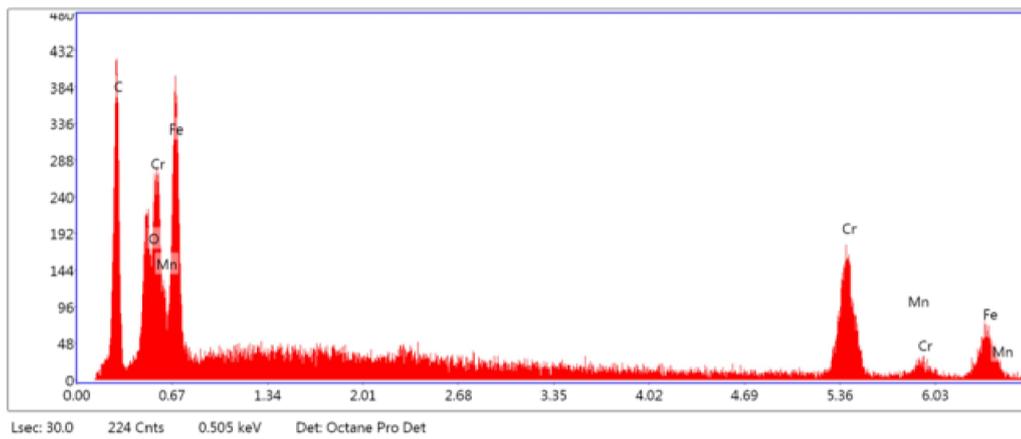


Figura 10.7 Gráfica de análisis químico de punto 1 señalado en figura 10.5

Punto 2

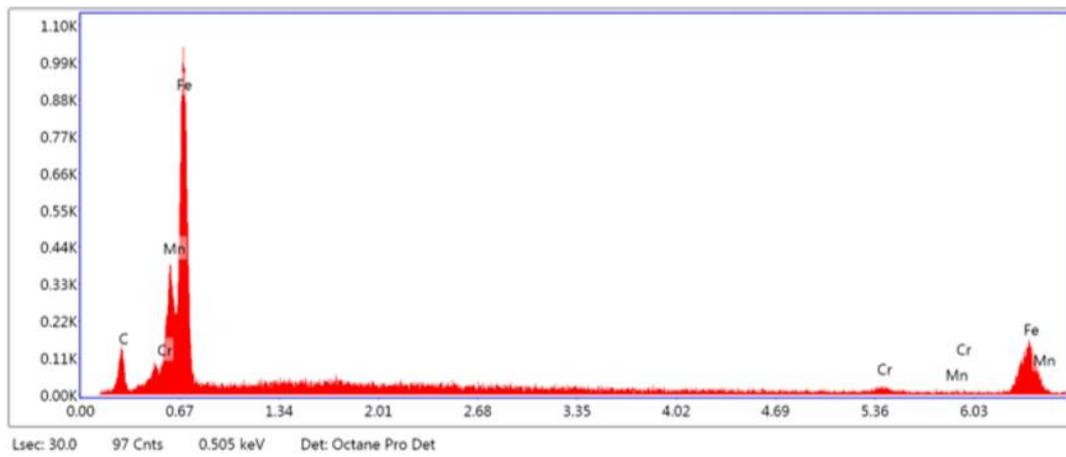


Figura 10.8 Gráfica de análisis químico de punto 2 señalado en figura 10.5

Punto 3

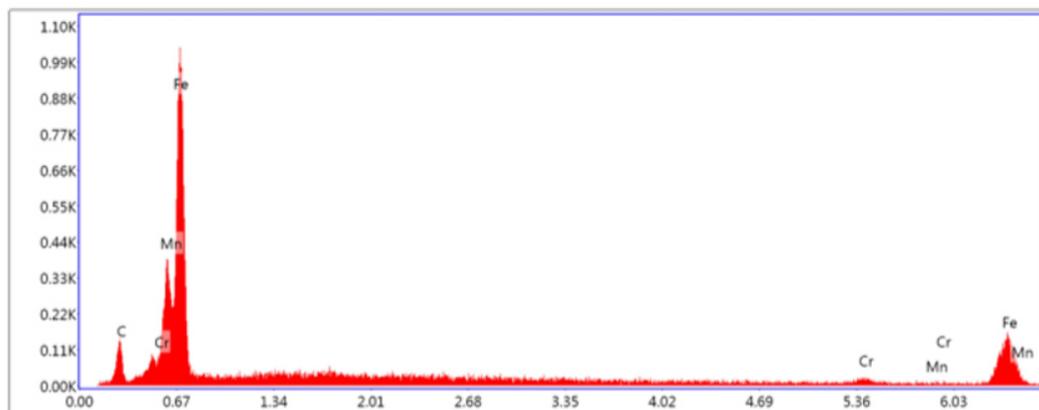


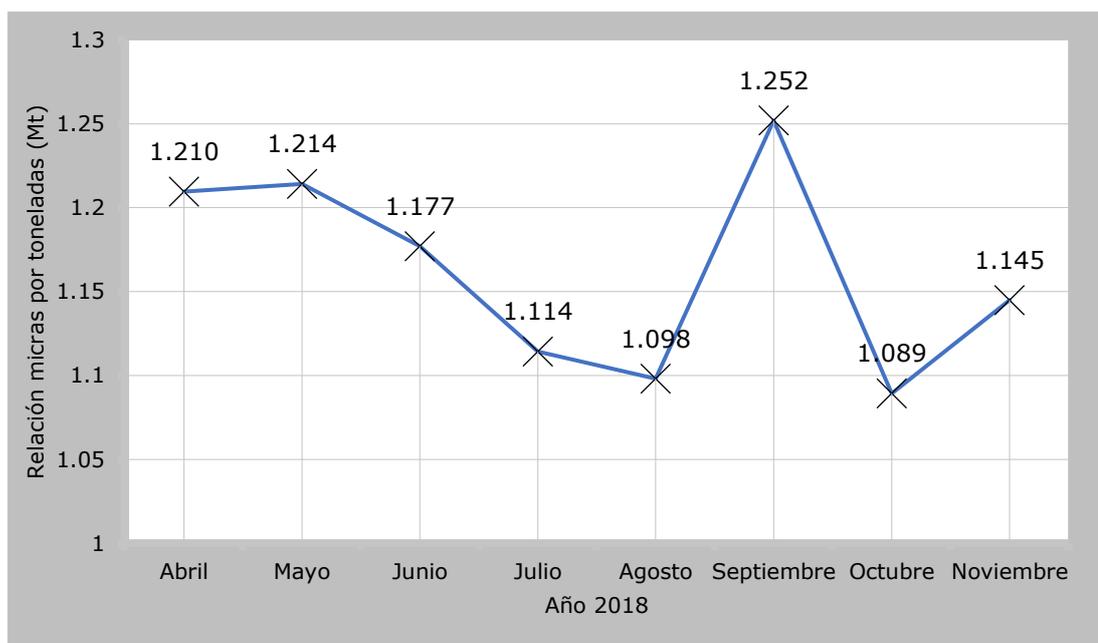
Figura 10.9 Gráfica de análisis químico de punto 3 señalado en figura 10.5

Elemento	Punto 1		Punto 2		Punto 3	
	% Peso	% Atómico	% Peso	% Atómico	% Peso	% Atómico
C	15.54	43.78	8.88	31.01	9.42	32.36
Fe	28.93	17.52	79.11	59.43	75.64	55.91
Cr	53.77	34.98	8.98	7.24	11.86	9.42
Mn	-	-	3.03	2.32	3.08	2.31
O	1.76	3.72	-	-	-	-

Tabla 10.21 Resultados de análisis químico en muestra 2, puntos 1,2 y3.

Se presenta en la figura 10.6 la microestructura de la muestra 1 a 10000x y se identifican los puntos de interés 1, 2 y 3 siendo un carburo de cromo, grano de matriz martensítica y una frontera de grano respectivamente. Se presentan también en las figuras 10.7, 10.8 y 10.9 las gráficas consecuentes del estudio de EDX en estos 3 puntos y la tabla 10.21 de resultados. Observamos en la tabla un notable incremento de presencia los elementos cromo y carbono en el punto 1 respecto a los puntos 2 y 3, mientras que el porcentaje del elemento hierro en los puntos 2 y 3 es mayor que en el punto 1.

11.6 Modificación de proceso de rectificado.



Gráfica 10.10 Micras por tonelada mensual en el intervalo de abril-noviembre 2018

Los resultados de la modificación del proceso de rectificado descrito en la sección 9.7 se muestran a en la gráfica 10.10. En ella se observa la relación “micras por tonelada” (Mt) mensual (descrita en la sección 9.5) correspondientes a los meses de abril a noviembre del 2018 en la planta Ternium Pesquería. Se observa una tendencia estable en los meses de abril a junio y descenso de esta relación a partir del mes de julio, que coincide con la fecha de la modificación del proceso. Cabe mencionar que, por cuestiones de seguridad, la nueva práctica fue suspendida en el mes de septiembre, y

justamente en este mes se observa un marcado incremento de Mt, mismo que vuelve a descender con su reanudación en los meses de octubre y noviembre.

Es importante mencionar que para calcular las micras por tonelada mensuales solo se tomó en cuenta el 91% de los datos totales, los datos restantes fueron descartados al ser identificados (gracias a su visualización en histograma) como valores atípicos o "outliers".

11.7 Desarrollo de modelo matemático

El modelo matemático desarrollado para predecir el desgaste de los rodillos de trabajo en función de su diferencial de dureza es el siguiente:

$$\Delta H_{PLTCM} = -19.34 + 4.25 \times 10^{-2}(D) + 1.04152977619737 \times 10^{-3}(Ton_{WR}) - 2.78 \times 10^{-3}(\bar{\sigma}) + 0.19(t_r)$$

Donde:

ΔH_{PLTCM} : Diferencial de dureza del rodillo (antes de la campaña vs después de la campaña)

D: Diámetro de la tabla del rodillo

Ton_{WR} : Toneladas de acero laminadas por el WR

$\bar{\sigma}$: Esfuerzo promedio en el contacto WR-Lámina durante la campaña

t_r : Reducción de espesor

Las unidades de las variables independientes son las siguientes:

$\Delta H_{PLTCM}, H_{b\text{ave}}$: HLD

D, t_r : milímetros

$\bar{\sigma}$: MegaPascuales

Cabe señalar que la R^2 de la ecuación es de 0.240 el cual representa una precisión que puede ser aceptable según el proceso de laminación al que se aplique.

11. DISCUSIÓN

11.1 Correlación KmL - ΔH_{PLTCM}

La primera interpretación importante que se hace es la evidente baja correlación entre las variables que, según la hipótesis planteada al inicio de esta investigación, deberían estar fuertemente relacionadas. Nos referimos a los kilómetros de acero laminados (KmL) y la variación de dureza en una campaña ΔH_{PLTCM} , observamos en la matriz de correlaciones (tabla 10.20) un pobre coeficiente de correlación de apenas .072 y la gráfica 10.1 no muestra un comportamiento importante de correlación entre estas variables del proceso, lo que nos permite hacer la afirmación de que los kilómetros de acero laminados no son el factor más influyente para el cambio de dureza que pueda presentar un rodillo de trabajo durante su campaña. Esto es debido a que hay otras variables con mucho más peso y relevancia determinar el diferencial de dureza ΔH_{PLTCM} , estas variables serán explicadas en secciones posteriores.

11.2 Correlación Dureza por zona - Shifting

La segunda hipótesis planteada al inicio del proyecto fue la posible relación entre la dureza del WR por zona y el shifting de los rodillos intermedios durante la campaña. Si observamos la figura 11.1 y tomando en cuenta que en tal figura el lado motriz es el derecho y el operador el izquierdo, podemos darnos cuenta que en los rodillos de trabajo inferiores existe una zona en su lado motriz donde no existe contacto con los rodillos intermedios durante la campaña, caso contrario de los rodillos superiores, donde la zona que no contacta al rodillo intermedio se encuentra en su lado operador. Las zonas mencionadas se observan encerradas en la figura 11.1.

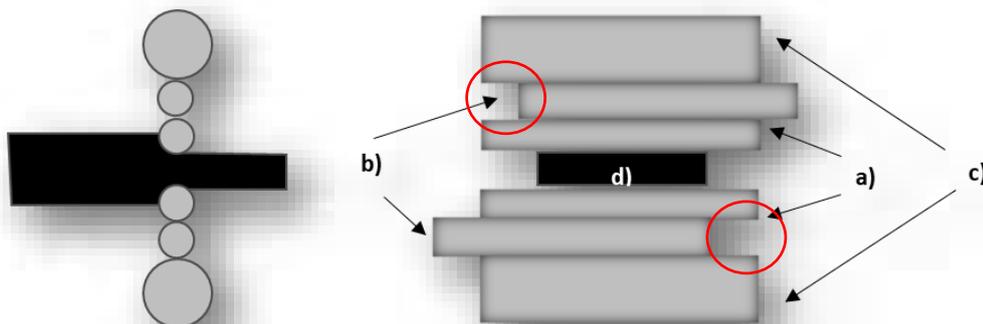


Figura 11.1 a) Rodillos de trabajo superior e inferior b) rodillos intermedios c) rodillos de apoyo d) lámina. Lado izquierdo es lado operador, lado derecho es lado motriz

Por esta razón se propuso en la hipótesis inicial un posible desgaste por fatiga Hertziana en las zonas de contacto WR-rodillo intermedio que provocaría, en el caso de los WR superiores, un mayor diferencial de dureza en su lado motriz después de una campaña, y en el caso de los rodillos inferiores, mayor diferencial en su zona operador.

Esta hipótesis se descarta con las gráficas 10.2 y 10.3

En la gráfica 10.2 lógicamente se observa una mayor dureza en el área centro del WR, que es la zona donde existe el contacto con la lámina, sin embargo, contrario a lo que se esperaba, las áreas operador y motriz tienen prácticamente la misma dureza. En la gráfica 10.3 se aprecia un mayor diferencial entre la dureza del área operador y motriz, pero este valor es prácticamente despreciable (2 HLD), incluso entra en el rango de error del sistema obtenido en el estudio R&R ($\pm 1.115\%$) lo cual nos hace deducir que no existe un desgaste por fatiga Hertziana considerable en el contacto WR-rodillo intermedio, es decir, el shifting no afecta la dureza de los WR. Esto descarta la hipótesis inicial y obliga a la búsqueda de otras correlaciones de mayor peso entre las demás variables presentes en la base de datos general. Algunas de las correlaciones más importantes en la tabla de correlación múltiple (Tabla 10.20) se describen a continuación.

11.3 Profundidad radial - *Hb ave*

Una de las correlaciones más fuertes sin duda es la que hay entre la dureza de los rodillos brillantes (*Hbave*) y la profundidad radial, con un coeficiente de correlación de -0.596, además se pudo corroborar esta correlación en la gráfica 10.4 la cual muestra claramente un comportamiento descendiente de la *Hbave* con respecto al incremento de la profundidad radial. La relación entre ambas variables puede explicarse por el proceso de fabricación de los rodillos de trabajo detallado en la sección 3.3, este proceso incluye un temple superficial que provoca que en la superficie del rodillo se tenga presente acero en fase martensítica, y que en el núcleo o eje del rodillo se tengan fases más blandas debido a que no hay una penetración calorífica uniforme. Esto resulta en una dureza mayor en la superficie del rodillo de trabajo terminado y una dureza que disminuye con respecto a la cercanía a su núcleo. La profundidad radial, como se explicó en la sección 8.1.10, es precisamente un parámetro que mide esa cercanía, lo que nos confirma que la dureza del rodillo está fuerte e inversamente relacionada con esta variable.

11.4 Correlación *Hb ave* – número de castillo

Otra correlación que se muestra importante es la que existe entre el número de castillo y la dureza promedio de los rodillos en su estado brillante, presentando un coeficiente de correlación de -0.300 como lo indica la tabla 10.20, y además se corrobora en la gráfica 10.5 de “cajas y bigotes” presentado en la sección 10.4.4 donde se muestra un claro incremento de valor de *Hbave* en los castillos 1 y 2 con respecto al 3, 4 y 5. Esta alta

correlación se debe principalmente a la práctica de selección de rodillos de trabajo para cada castillo de la PLTCM de Ternium Pesquería. Cada castillo trabaja a diferentes parámetros y tiene diferente función dentro del molino, por lo tanto, cada uno necesita de rodillos de trabajo con características específicas. Este criterio de selección se muestra en el anexo A2 donde a grandes rasgos se observa que los rodillos de trabajo con mayor diámetro preferentemente se instalan en los primeros castillos (1 y 2) y tomando en cuenta que la dureza del rodillo está también fuertemente relacionada con su profundidad radial y su diámetro (ver gráfica 10.4) se puede entonces explicar que el coeficiente de correlación entre número de castillo y $H_{b_{ave}}$ sea alto y además positivo indicando una relación proporcional

11.5 Correlación número de castillo – Esfuerzo promedio $\bar{\sigma}$

La correlación castillo- $\bar{\sigma}$ se puede entender observando la figura 2.2 donde se percibe que la lámina va reduciendo su espesor conforme va avanzando por los stands o castillos de laminación, si se reduce el espesor de la lámina se reducirá también el área de contacto WR-lámina. La reducción de esta área aumenta proporcionalmente el esfuerzo ejercido en el gap debido a la fórmula general del esfuerzo (Ecuación 3.5) $\sigma = \frac{F_l}{ba_c}$, lo que demuestra que hay esfuerzos de laminación mayores en los castillos 4 y 5 que en los iniciales 3,2,1. Esto explica el alto coeficiente de correlación de 0.741. Y la gráfica 10.6 lo reafirma mostrando un incremento de valores de media y mediana en la caja y bigotes de los castillos 4 y 5.

11.6 Correlación ΔH_{PLTCM} – Esfuerzo promedio $\bar{\sigma}$

Una de las correlaciones más importantes en esta investigación es la del diferencial de dureza con el esfuerzo promedio durante una campaña (en la zona de contacto WR-lámina), el coeficiente de correlación entre ambas variables es -0.473 lo que indica una relación negativa, es decir conforme se utiliza más esfuerzo para reducir el espesor de una lámina, el rodillo de trabajo (para este caso) tiende a ablandarse o a perder dureza. La gráfica 10.7 reafirma esta relación. Como ya se sabe, en los castillos 4 y 5 se suele trabajar a mayores esfuerzos y es donde precisamente también existe mayor ablandamiento de los rodillos de trabajo.

El ablandamiento por revenido, como lo menciona K.S. Kim y colaboradores en su artículo “A fatigue life model for 5% Chrome work roll Steel under multiaxial loading”, se produce por la acumulación local de calor en la superficie del WR durante la campaña. Cuando este calor genera temperaturas que rondan los 300°C es lógico pensar que hay un tratamiento térmico importante que modifica las propiedades mecánicas al menos en la superficie del rodillo. Este tratamiento térmico puede ser un revenido que alivie las tensiones residuales en la estructura atómica del rodillo generadas por el temple (en su fabricación) lo que se traduce a una pérdida de dureza superficial.

El mecanismo de ablandamiento por fatiga cíclica, explicado por Mirko Klesnil y Petr Lukas en su libro “Fatigue of metallic materials”, suele aparecer en sistemas en donde están en contacto dos piezas y al menos una tiene una geometría curva. En el caso de la PLTCM, los rodillos de trabajo están sometidos constantemente a cargas y descargas durante la campaña. Esto podría ocasionar que haya un cizallamiento de precipitados que se encuentren sobre planos de deslizamiento preferenciales. Cuando esos precipitados se cizallan dejan de oponerse al deslizamiento de las dislocaciones y al permitirles su libre movimiento, el material se “ablanda” o pierde dureza.

Este par de mecanismos afectan las propiedades de la superficie del rodillo, provocan en el WR una superficie blanda o con pobre dureza y esto no es deseado en el proceso de laminación en frío ya que tener rodillos blandos puede ocasionar una pérdida prematura de rugosidad en la superficie del rodillo, lo que provocaría un deslizamiento o “patinamiento” entre el WR y la lámina durante la campaña. Por lo tanto, es de suma importancia remover el material blando de la superficie del rodillo quemado antes de que ingrese a una nueva campaña. Esta remoción se debe llevar a cabo en el proceso de rectificado.

11.7 Correlación $\Delta H_{rectificadora}$ – Esfuerzo promedio $\bar{\sigma}$

Observar la gráfica 10.7 nos lleva a hacer otro cuestionamiento, si los rodillos de trabajo pierden dureza cuando se trabaja a esfuerzos mayores, ¿ganan dureza al ser rectificadores?, esta pregunta se puede responder fácilmente comprando las variables $\Delta H_{rectificadora}$ y el esfuerzo promedio $\bar{\sigma}$. La gráfica 11.8 muestra dicha comparación y nos revela que efectivamente hay una correlación fuertemente positiva entre ambas variables, lo que quiere decir que el rodillo de trabajo gana mayor cantidad de dureza al ser rectificado cuando trabajó a grandes esfuerzos durante su campaña. Esta ganancia de dureza se debe a la remoción (en el proceso de rectificado) de las capas del WR “ablandadas” durante la campaña de laminación.

11.8 Correlación Reducción de espesor (t_r) - ΔH_{PLTCM}

Esta correlación está muy ligada a la mencionada en la sección 11.5 (número de castillo – $\bar{\sigma}$) y 11.6 (ΔH_{PLTCM} – $\bar{\sigma}$). Tomando en cuenta lo que se explica en la sección 8.1.1., donde se dice que las mayores reducciones de lámina se realizan en los primeros 3 castillos y los últimos 2 se utilizan para acabados finales, era predecible ver el comportamiento de la gráfica 10.9 donde observamos un ablandamiento de rodillos donde se realiza una menor reducción, mientras que para una gran reducción, (mayores a .8 mm) el valor de ΔH_{PLTCM} se mantiene en un rango prácticamente constante.

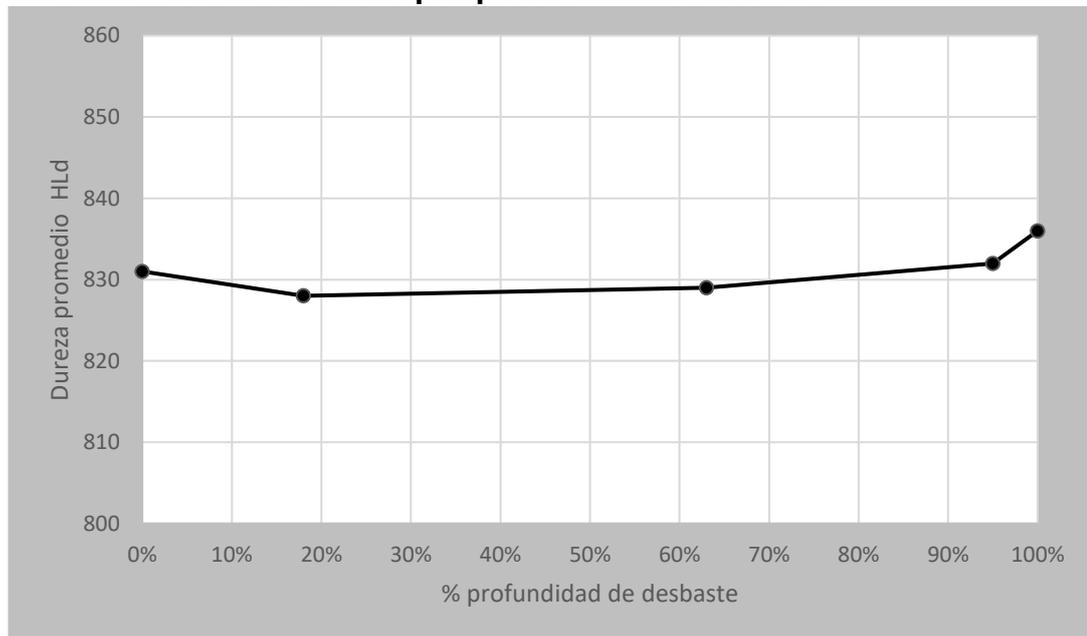
Es cierto que para lograr una mayor reducción de espesor en la lámina es necesaria una mayor cantidad de fuerza F_l , y por esta razón en los castillos 1, 2 y 3, se aplica un F_l mayor, sin embargo, en los castillos 4 y 5 hay un área de

contacto (rodillo-lámina) notablemente menor. Esto provoca, de acuerdo con la ecuación 3.5, que existan esfuerzos mayores en los últimos castillos, como quedó demostrado en la sección 11.5 y estos esfuerzos generan finalmente un mayor desgaste y ΔH_{PLTCM} en el WR.

11.9 Medición de dureza por pase

A continuación, se presentan los gráficos correspondientes a las mediciones de dureza “por pase”, dichos gráficos se elaboraron con los datos de las tablas 10.3 a 10.7 de la sección 10.2 y cada uno representa las 5 mediciones en un WR a diferentes profundidades de desbaste.

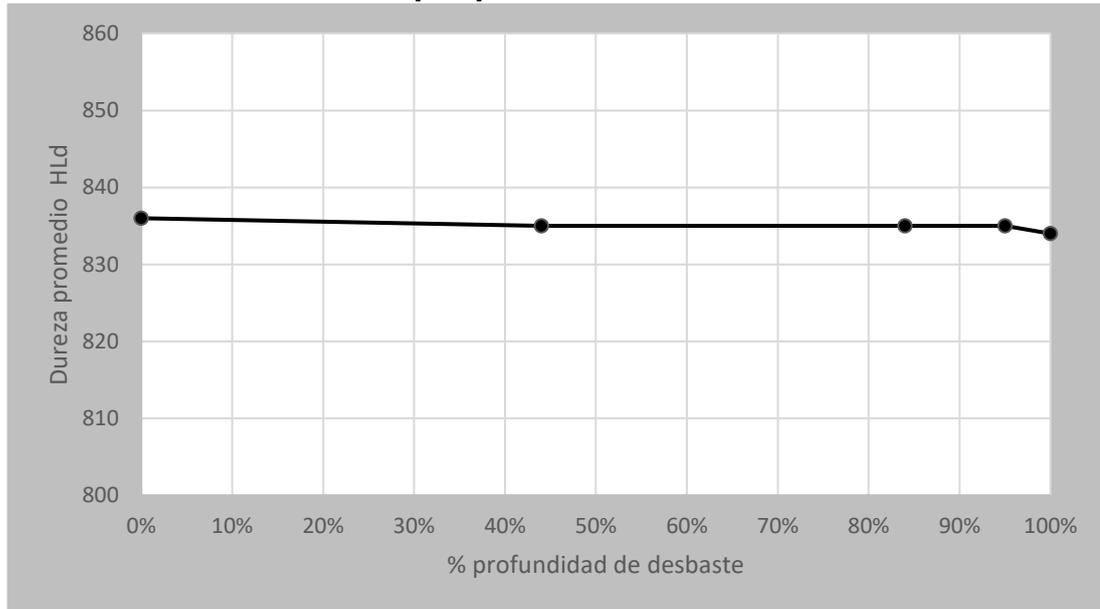
11.9.1 Medición de dureza por pase en WR de castillo 1



Gráfica 11.1 Dureza de rodillo UEHF0271 del castillo 1 respecto a su profundidad de desbaste

En esta gráfica 11.1 podemos observar un muy ligero cambio de dureza promedio con respecto a la profundidad de desbaste. Esto es justamente lo que se esperaba obtener al hacer estas mediciones ya que es sabido que el castillo 1 es donde se trabaja a menor esfuerzo y por lo tanto no existe un ablandamiento significativo del WR durante de una campaña. Como ya quedó demostrado en la gráfica 10.8, los rodillos que pierden dureza durante la campaña suelen recuperarla en el rectificando (al rectificar la capa blanda). Por esto podemos afirmar que al menos esta muestra, el WR no se ha ablandado durante la campaña.

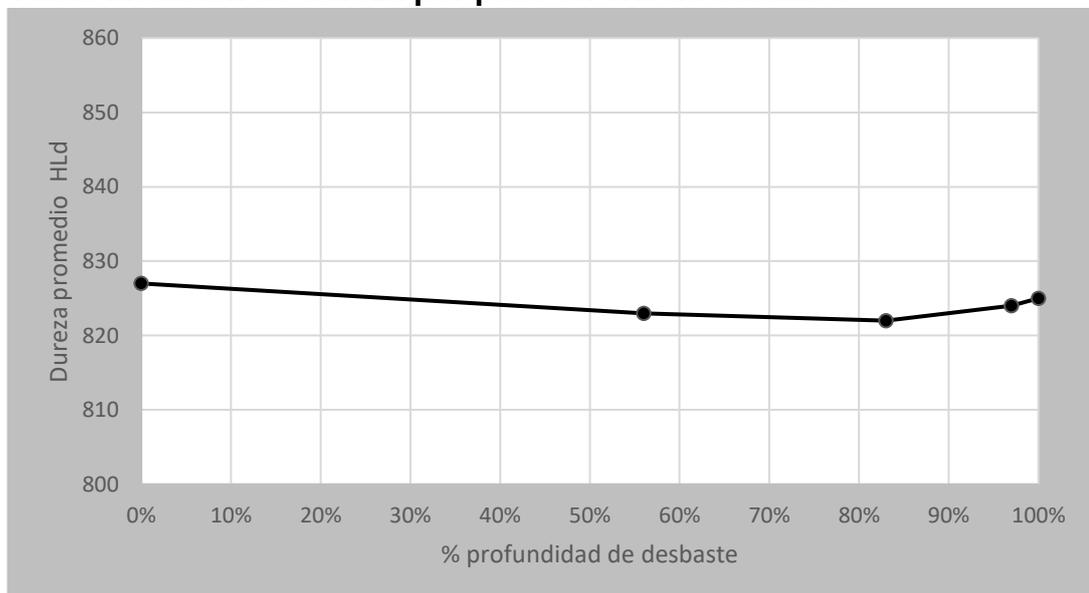
11.9.2 Medición de dureza por pase en WR de castillo 2



Gráfica 11.2 Dureza de rodillo UEHF0207 del castillo 2 respecto a su profundidad de desbaste

Al observar esta gráfica 11.2 de WR se identifica un comportamiento muy similar a los WR del castillo 1 donde no hay un cambio de dureza promedio significativo con respecto a la profundidad de desbaste, este comportamiento permite afirmar que tampoco existe un ablandamiento importante en estos rodillos durante su campaña.

11.9.3 Medición de dureza por pase en WR de castillo 3

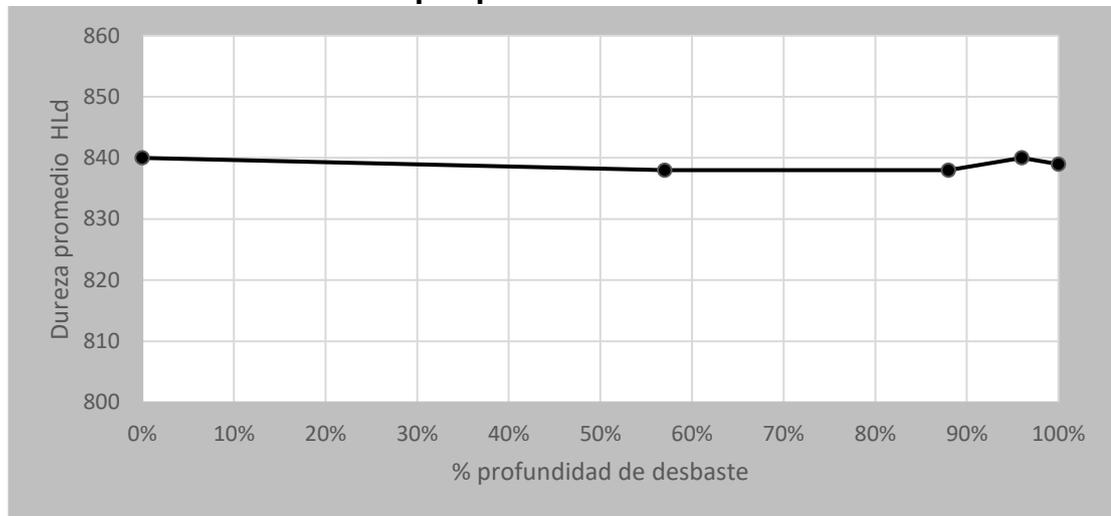


Gráfica 11.3 Dureza de rodillo UEHF0152 del castillo 3 respecto a su profundidad de desbaste

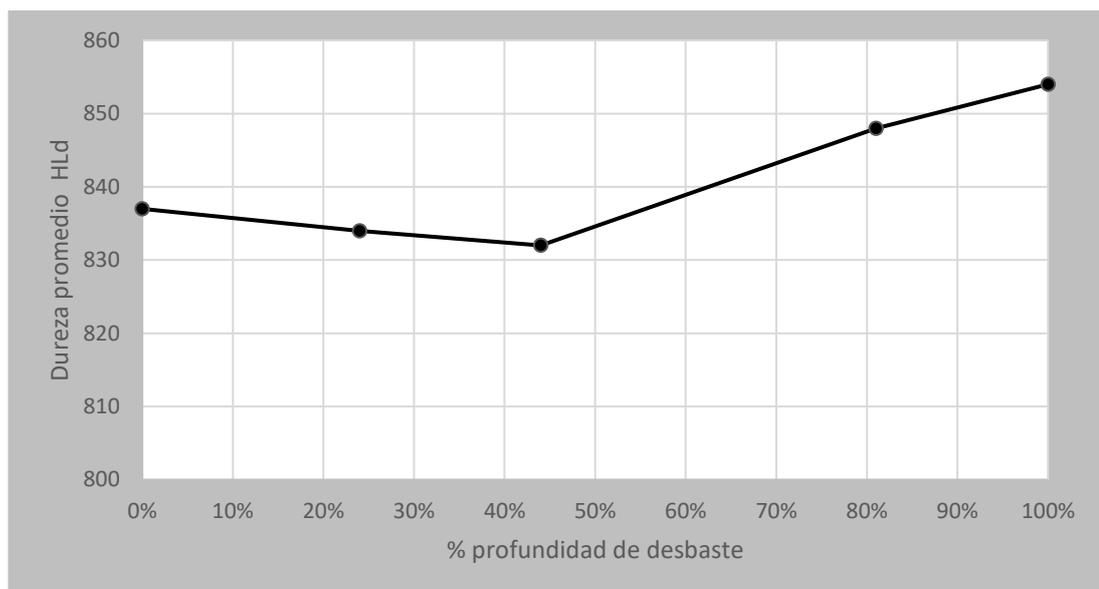
En este WR del castillo 3 observamos también un muy bajo diferencial de dureza promedio con respecto a la profundidad de desbaste lo que es también bastante coherente con la información presentada en la gráfica 10.3 donde se observa que los esfuerzos en el castillo 1, 2 y 3 son bastante similares. Esta similitud en los parámetros de esfuerzo de estos castillos se traduce a una

inminente similitud en los parámetros del diferencial de dureza durante la campaña y, por lo tanto, en la relación entre su dureza con respecto a la profundidad de desbaste.

11.9.4 Medición de dureza por pase en WR de castillo 4



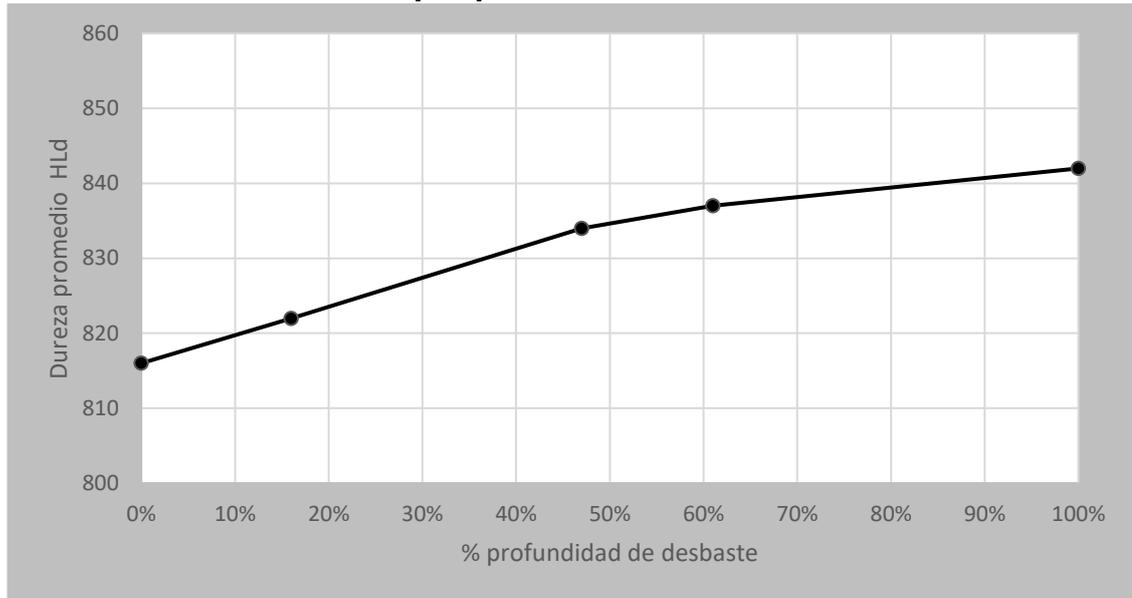
Gráfica 11.4 Dureza de rodillo UEHF0286 del castillo 4 respecto a su profundidad de desbaste



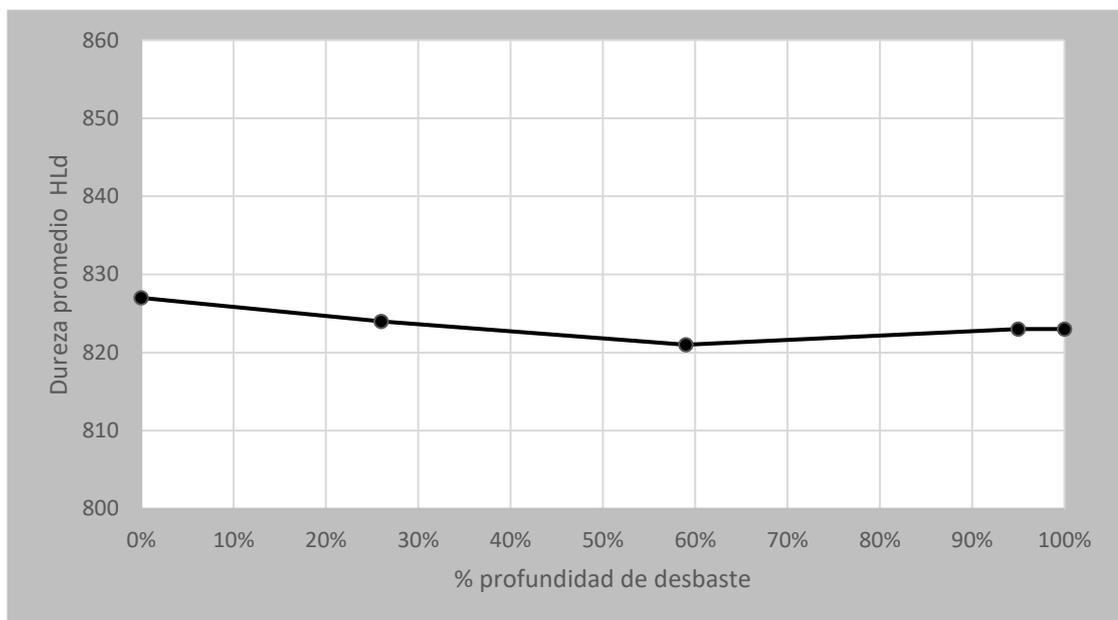
Gráfica 11.5 Dureza de rodillo AEHF0054 del castillo 4 respecto a su profundidad de desbaste

Las 2 muestras recabadas de WR que trabajaron en el castillo 4 muestran resultados muy interesantes, mientras en la gráfica 11.4 observamos un comportamiento equilibrado, con poco diferencial de dureza promedio respecto a la profundidad (muy similar a los WR de los castillos 1,2 y 3), en la gráfica 11.5 podemos observar un marcado incremento de la dureza a partir del 45% de profundidad, este comportamiento sugiere tener mayor precaución al modificar el procedimiento de rectificado para este tipo de rodillos.

11.9.5 Medición de dureza por pase en WR de castillo 5



Gráfica 11.6 Dureza de rodillo UEHF0270 del castillo 5 respecto a su profundidad de desbaste



Gráfica 11.7 Dureza de rodillo UEHF0210 del castillo 5 respecto a su profundidad de desbaste

Para las muestras de los WR del castillo 5 observamos un incremento de dureza prácticamente proporcional a la profundidad de desbaste lo cual concuerda con los datos mostrados en la gráfica, en esta gráfica (11.6) se observa que el 5 es el castillo con mayores esfuerzos de laminación que provocan (como vemos en la gráfica 11.7) un ablandamiento en los WR durante la campaña. Al ablandarse el WR, de forma inminente tendrá que recuperar una parte de su dureza en el proceso de rectificado como observamos en la gráfica 11.6.

En el caso de la gráfica 11.7 observamos un comportamiento de la dureza prácticamente constante donde no hay una variación importante de dureza promedio con respecto a la profundidad de rectificado. Este comportamiento nos indica que se debe hacer un estudio específico a los rodillos que trabajaron en el castillo 5 durante su campaña antes de modificar su práctica de rectificado.

11.10 Caracterización microestructural de rodillo de trabajo.

La microestructura del WR visualizada en la figura 10.1 y 10.2 por microscopía óptica es la típica de un acero templado con 5% de cromo. Se puede ver que existe una matriz martensítica de tamaño de grano ASTM E112 de 10.5 y un 1% de carburos de cromo, esta microestructura es lograda en el proceso de fabricación del rodillo (leer sección 3.3) donde se aplica un tratamiento de temple térmico a la superficie del rodillo. La fase martensítica es una fase no estable que tiene propiedades de dureza elevadas y si a esta condición se suma la presencia de precipitados de carburos de cromo (Cr_3C_2), obtenemos un rodillo con la dureza necesaria para provocar el desgaste abrasivo necesario en la lámina durante el proceso de laminación.

En la figura 10.3 se observa una comparativa de la una microestructura observada por microscopía electrónica de barrido (SEM) en la muestra 1 y 2, que son las zonas longitudinal y transversal del WR respectivamente, se puede ver que ambas son bastante similares, sin embargo, hay una distribución diferente de los carburos de cromo. Mientras que en la microestructura de la muestra 1 la distribución se encuentra uniforme, la de la muestra 2 (área transversal) presenta una mayor población de Cr_3C_2 en la parte superior de la muestra la cual es la más cercana a la superficie del WR respecto a la inferior (que es la más cercana al núcleo). Este fenómeno es también ocasionado en el proceso de fabricación del rodillo, donde no hay una penetración uniforme del tratamiento de temple térmico a través del cuerpo del WR, lo que provoca un diferencial de dureza del material con respecto a la profundidad radial. Este fenómeno se demostró con la gráfica 11.4 donde se puede ver que en las zonas más cercanas a la superficie (o menor profundidad radial) la dureza del WR es superior comparada con la de las zonas más cercanas al núcleo.

Para comprobar que los precipitados antes mencionados son carburos de cromo se realizó un análisis químico por la técnica EDX en los puntos de mayor interés en la microestructura de la muestra 1, estos puntos están señalados en la figura 10.6. Los resultados del análisis (Tabla 10.21) confirman la presencia de acero martensítico y carburos de cromo, y además nos permiten ver su contraste de composición química, mientras que en el punto 1 existe una presencia importante de cromo y carbono respecto al Hierro, en el punto 3 se observa un 75% de peso atómico de Hierro en la microestructura del material.

11.11 Modificación de proceso de rectificado.

La modificación del proceso de rectificado del taller de rodillos de Ternium Pesquería se realizó siguiendo la metodología descrita en la sección 9.7. Esta metodología está basada en las conclusiones de la sección 11.5 donde se demuestra que en los castillos 4 y 5 de una PLTCM 6-High se aplica un mayor esfuerzo de laminación respecto a los castillos 1, 2 y 3. Estos altos esfuerzos que provocan que exista un mayor desgaste del WR cuando participa en los últimos 2 castillos produciendo un ablandamiento de su superficie (véase sección 11.6). Este fenómeno se corroboró en la sección 11.9 con el análisis de las mediciones de dureza de WR “por pase”. De acuerdo con estas interpretaciones, se decidió reducir el desbaste promedio en los primeros 3 castillos. Esta modificación resultó en una mayor eficiencia de los WR, bajando de forma evidente la relación “micras por tonelada” (Mt). En la gráfica 10.10 podemos observar que en los meses en los que aún no se implementaba la modificación del proceso (abril, mayo, junio) el valor de esta relación se encontraba casi constante en un rango de 1.21 a 1.177 y a partir del mes de julio, se observa un descenso evidente de hasta un 10%, cerrando el mes de agosto con un valor de 1.098, este descenso coincide con la fecha de modificación del proceso. En el mes de septiembre, donde se suspendió la nueva práctica de rectificado observamos un notable incremento del valor de la relación (Mt), mismo que decae con la reanudación de la práctica en los meses de octubre y noviembre. Concluimos entonces que gracias a esta implementación se ha reducido el consumo por desbaste de los WR en relación con la producción de lámina fría.

Uno de los riesgos evidentes de la modificación del proceso de rectificado es la generación de accidentes en la PLTCM ocasionados por no desbastar por completo las capas de material fatigado de la superficie del WR. Estas capas desgastadas por fatiga contienen microgrietas que, al no ser removidas por completo, pueden propagarse en el cuerpo del rodillo y generar fracturas tipo “lengua de toro” o “silla de montar” (capítulo 5) durante la campaña de laminación, este tipo de fracturas son de gran impacto para la producción de acero en cualquier línea de producción de la industria siderúrgica.

Durante el período que se modificó el proceso de rectificado se presentó un evento de fractura de WR tipo “lengua de toro”, sin embargo, en base a un análisis exhaustivo de la falla, se comprobó que la causa raíz del evento no fue la modificación de la práctica de rectificado. Por esta razón se puede afirmar que reducir el promedio de desbaste de los WR de los castillos 1, 2 y 3 no representa un riesgo para la producción e integridad de los rodillos. El archivo del análisis de falla mencionado se puede encontrar en la dirección electrónica mencionada en la sección de referencias (15). [30]

Se propone que la modificación del proceso de rectificado para los rodillos provenientes de los castillos 4 y 5 debe estar basada en otro tipo de variables, incluso, se debe reconsiderar la inferencia de la variable KmL sobre el desgaste de los rodillos. La tabla 11.1 muestra una matriz de correlación

múltiple entre las variables KmL , $\bar{\sigma}$ y ΔH_{PLTCM} con datos de rodillos exclusivamente de los castillos 1, 2 y 3 y observamos un coeficiente de correlación bajo entre las variables KmL y ΔH_{PLTCM} .

	Kilometraje laminado	Esfuerzo promedio	ΔH_{PLTCM}
Kilometraje laminado	1	0.082	0.001
Esfuerzo promedio	0.082	1	-0.174
ΔH_{PLTCM}	0.001	-0.174	1

Tabla 11.1 Matriz de correlación múltiple considerando exclusivamente datos de WR provenientes de castillos 1, 2 y 3.

Sin embargo, en la matriz donde se utilizan datos de los WR de castillos 4 y 5 (tabla 11.2) se observa este coeficiente con un valor que, aunque sigue siendo bajo, es considerablemente mayor.

	Kilometraje laminado	Esfuerzo promedio	ΔH_{PLTCM}
Kilometraje laminado	1	-0.035	0.138
Esfuerzo promedio	-0.035	1	-0.436
ΔH_{PLTCM}	0.138	-0.436	1

Tabla 11.2 Matriz de correlación múltiple considerando exclusivamente datos de WR provenientes de castillos 4 y 5.

Una propuesta para un trabajo futuro o continuación de esta investigación sería sin duda hacer un análisis estadístico para rodillos de los castillos 4 y 5 donde se pueda comprobar la relación entre su variación de dureza en una campaña de laminación y la cantidad de kilómetros de lámina deformados, entre otras variables. En base a este estudio se deberá modificar el proceso de rectificado para este tipo de rodillos y comparar los resultados que se obtengan con los presentados en este documento (sección 10.6).

11.12 Desarrollo de modelo matemático

El modelo matemático presentado en la sección 10.7 predice con una exactitud aceptable el ΔH_{PLTCM} de un rodillo de trabajo durante su campaña, sin embargo, es importante mencionar que este modelo es válido para la PLTCM de Ternium Pesquería, para que este modelo sea aplicado en alguna otra línea de laminación de acero es recomendable hacer una adaptación respaldada con un análisis similar al desarrollado en este trabajo, tomando en cuenta sus parámetros específicos de producción. Si se aplica este modelo íntegramente alguna otra línea es probable que la precisión del modelo no sea la adecuada.

12. CONCLUSIONES.

Después de analizar a detalle los datos obtenidos se sacan las siguientes conclusiones:

1. El “shifting” de rodillos intermedios y los kilómetros de acero laminado no son factores determinantes en el desgaste de los WR. A pesar de que en la hipótesis inicial se planteó esta posible relación, los datos analizados muestran un muy bajo coeficiente de correlación entre estas variables y las características de dureza del WR después de su campaña. Lo que propone darles un peso menor como variables independientes en cualquier modelo de rectificado para rodillos de trabajo de laminación en frío.
2. Los rodillos de trabajo presentan una relación importante entre diferencial de dureza durante la campaña de laminación y el esfuerzo promedio en el contacto WR-lámina. Esta relación, aunque se esperaba, llama la atención que se trate de una correlación inversa, es decir, el WR presenta un “ablandamiento” durante la campaña. Este ablandamiento aumenta conforme hay un mayor esfuerzo promedio durante la campaña. Los mecanismos de ablandamiento que se proponen estar presentes durante la laminación en frío son el ablandamiento por fatiga cíclica y el ablandamiento por revenido superficial.
3. En un molino de laminación en frío tipo tándem de 5 castillos con configuración 6-High, los castillos 4 y 5 presentan esfuerzos de laminación mayores respecto a los primeros castillos (1, 2 y 3), estos elevados esfuerzos provocan un “ablandamiento” de la superficie de los rodillos de trabajo durante su campaña. De acuerdo con esta conclusión se modificó la práctica de rectificado para los rodillos de trabajo provenientes de los castillos 1, 2 y 3 después de su campaña en una línea PLTCM, reduciendo su promedio de desbaste. Esta modificación resultó ser acertada de acuerdo con los resultados obtenidos. Para modificar el proceso de rectificado en WR de los castillos 4 y 5 se recomienda hacer un análisis independiente de correlación de variables de proceso exclusivamente para este tipo de rodillos.
4. El modelo de predicción de desgaste aquí desarrollado (sección 11.7) contempla las condiciones y parámetros de operación específicos de la PLTCM de Ternium Pesquería, se recomienda realizar un análisis completo antes de adaptarlo a alguna otra línea de laminación en frío.
5. Gracias al modelo se pudieron identificar las variables más importantes del proceso de laminación y se logró optimizar el proceso de rectificado

para los WR de esta línea de producción. Los resultados de esta optimización demuestran que los rodillos de trabajo deben ser rectificadas en función de los parámetros de laminación durante la campaña.

13. GLOSARIO

Listado de símbolos y caracteres utilizados	
A	Punto posicionado en la entrada del gap
a_c	Área de contacto WR-lámina
b	Ancho de la lámina
Cov_{xy}	Covarianza entre un conjunto de datos x y otro y
C_v	Coeficiente de variación
D	Diámetro de rodillo de trabajo
D_B	Diámetro de rodillo de apoyo
$D_{inicial}$	Diámetro inicial del rodillo de trabajo
D_{final}	Diámetro final del rodillo de trabajo
E	Módulo de elasticidad
F_f	Fuerza de fricción
F_{fe}	Fuerza de fricción estática
F_{fk}	Fuerza de fricción cinética
F_g	Fuerza de separación del gap
F_l	Fuerza de laminación
F_t	Fuerza tangencial
h_0	Espesor inicial lámina
h_f	Espesor final de la lámina
H	Dureza
HL	Dureza Leeb
HR	Dureza Rockwell
$H_{q_{motriz}}$	Dureza de rodillo quemado en área motriz
$H_{q_{centro}}$	Dureza de rodillo quemado en área centro
$H_{q_{operador}}$	Dureza de rodillo quemado en área operador
$H_{b_{motriz}}$	Dureza de rodillo brillante en área motriz
$H_{b_{centro}}$	Dureza de rodillo brillante en área centro
$H_{b_{operador}}$	Dureza de rodillo brillante en área operador
$H_{b_{ave}}$	Dureza promedio de rodillo brillante
$H_{q_{ave}}$	Dureza promedio de rodillo quemado
K	Constante de desgaste
KmL	Kilómetros de acero laminados por WR
KmL_{suave}	Kilómetros de acero suave laminados por WR
$KmL_{comercial}$	Kilómetros de acero comercial laminados por WR

KmL_{DP}	Kilómetros de acero DP laminados por WR
KmL_{IF}	Kilómetros de acero IF laminados por WR
KmL_{HSLA}	Kilómetros de acero HSLA laminados por WR
KmL_{Si} (eléctrico)	Kilómetros de acero eléctrico laminados por WR
KmL_P	Kilómetros de acero P (al fósforo) laminados por WR
l	Longitud de rollo laminado
L	Ancho del Molino de laminación
P	Carga aplicada entre superficies en contacto
P_0	Carga inicial en ensayo de dureza Rockwell
P_1	Carga segunda o secundaria en ensayo de dureza Rockwell
P_f	Carga resultante en ensayo de dureza Rockwell
R	Radio de rodillo de trabajo
r_{xy}	Coeficiente de correlación entre un conjunto de datos x y otro y
s	Deslizamiento entre superficies en contacto
t_r	Diferencial de espesores de entrada y salida del gap.
t_m	Espesor mínimo de lámina para que exista laminación
T_m	Temperatura de fusión
Ton_{PLTCM}	Toneladas producidas por línea PLTCM
Ton_{WR}	Toneladas laminadas por WR
v_0	Velocidad inicial de la lámina
v_f	Velocidad final de la lámina
v_r	Velocidad del rodillo de trabajo
v_{rebote}	Velocidad de rebote.
$v_{impacto}$	Velocidad de impacto.
w	Desgaste
W	Fuerza normal a la superficie
W'	Fuerza adhesiva
α	Ángulo de arco de contacto
ϑ	Desviación estándar
$\vartheta_{R\&R}$	Desviación estándar del sistema
ϑ^2	Varianza
$\vartheta_{repetibilidad}$	Desviación estándar por repetibilidad

$\vartheta_{reproducibilidad}$	Desviación estándar por reproducibilidad
$\vartheta^2_{R\&R}$	Varianza total del sistema
$\vartheta^2_{repetibilidad}$	Varianza por repetibilidad
$\vartheta^2_{reproducibilidad}$	Varianza por reproducibilidad
Δ_{altura}	diferencial de alturas de indentador
$\Delta H_{rectificadora}$	Diferencial de dureza por rectificado
ΔH_{PLTCM}	Diferencial de dureza por campaña en PLTCM
σ	Presión o esfuerzo de contacto WR-lámina
σ_c	Esfuerzo de compresión requerido para deformar la lámina
σ_{acum}	Esfuerzo acumulado en la campaña
$\bar{\sigma}$	Esfuerzo promedio en campaña
μ	Coefficiente de fricción
μ_m	Coefficiente de fricción mínimo para que exista laminación.
μ'	coeficiente de adherencia
x	Conjunto x de datos
\bar{x}	Media aritmética de un conjunto x de datos
y	Conjunto y de datos
\bar{y}	Media aritmética de un conjunto y de datos

14. ANEXOS

Dispositivo de impacto	Dureza máxima	Aplicación
D	68 HRC	El dispositivo de impacto básico utilizado para la mayoría de las pruebas en acero forjado o moldeado, aleaciones de aluminio, aleaciones de cobre y hierros forjados
DC	68 HRC	Un dispositivo de impacto especial diseñado para realizar mediciones de dureza en espacios muy cerrados, ej. Barrenos. Los materiales de aplicación son los mismos que los del dispositivo D.
D+15	68 HRC	Un dispositivo de impacto especial, muy fino. con la bobina de medición colocada detrás para poder acceder a pequeños orificios y surcos. Los materiales de aplicación son los mismos que para el dispositivo D.
G	646 HB	Un dispositivo de impacto especial, mayor en tamaño y energía de impacto que los otros dispositivos, para uso de piezas largas y pesadas. Para uso en acero forjado, hierro moldeado y hierro forjado.
C	70 HRC	Un dispositivo de especial con boja energía de impacto que puede ser usada para medir dureza superficial, dureza en recubrimiento y dureza en componentes de acero de pared delgada.
E	72 HRC	Un dispositivo de impacto especial, con punta de diamante sintético que puede ser usada para pruebas en acero forjado o moldeado con un alto grado de dureza.

Tabla A1 Nomenclatura de dispositivos de impacto de durómetros Equotip y sus características [18]

Castillo	Rango de diámetro del WR (mm)
1	440-495
2	440-495
3	440-495
4	425-495
5	425-495

Tabla A2 Rango de diámetros de WR permisibles en cada castillo de la PLTCM de Ternium Pesquería.

Vickers (HV)	Rockwell (HRc)	Scleroscope Hardnes No. (Shore HSc, HSd)	Scleroscope hardness (Shore HFRSc)	Shore HS (HSC/HSD)	Leeb	
					(HLd)	(HLe)
ASTM E 140			ASTM A 427	JIS B 7731	Equotip	
940	68	97,3	-	98	890	855
926	67,6	96,8	105	97,2	886	850
913	67,3	95,9	104	96,4	882	846
900	67	95	103	95,6	879	843
888	66,7	94,4	102	94,8	876	840

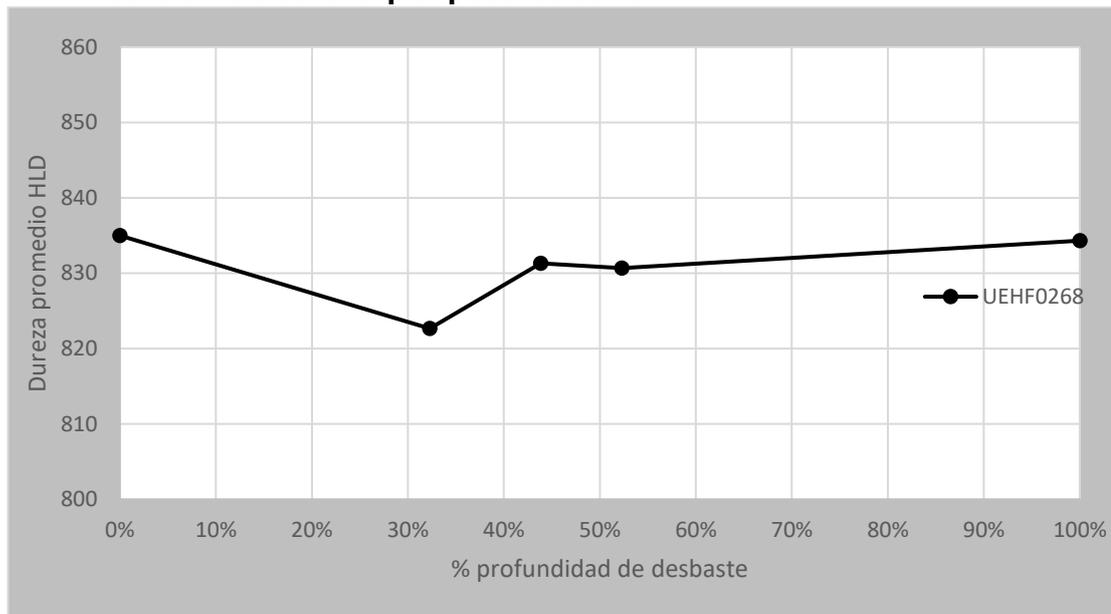
875	66,3	93,8	101	94,0	872	836
862	65,9	92,4	100	93,2	868	832
850	65,6	91,6	99	92,4	865	829
837	65,2	90,6	98	91,5	861	825
825	64,8	90,1	97	90,7	858	821
812	64,4	89,8	96	89,9	854	817
800	64	88,5	95	89,0	850	814
787	63,7	87,6	94	88,1	847	811
774	63,1	86,7	93	87,2	841	805
761	62,4	85,7	92	86,3	834	798
748	62,1	84,7	91	85,4	831	795
735	61,6	83,9	90	84,4	826	791
723	61,1	82,9	89	83,5	822	786
710	60,6	81,8	88	82,5	817	781
698	60	80,9	87	81,6	811	776
685	59,5	80,3	86	80,6	797	771
672	58,9	78,8	85	79,6	796	765
660	58,3	78,2	84	78,6	795	760
647	57,7	76,6	83	77,6	790	754
635	57,2	75,8	82	76,6	785	750
622	56,5	74,7	81	75,5	769	744
610	55,7	73,6	80	74,5	767	736
597	55,1	72,6	79	73,4	766	731
584	54,5	71,8	78	72,3	761	725
571	53,7	70,2	77	71,2	753	718
558	52,9	69,2	76	70,0	746	711
545	52	67,9	75	68,8	739	703
533	51,5	67,1	74	67,8	734	699
520	50,7	65,7	73	66,6	727	692
508	49,6	64,5	72	65,4	718	682
495	48,8	63,3	71	64,2	711	676
482	47,9	62,1	70	63,0	704	669
470	47	61	69	61,8	696	662
457	46	59,7	68	60,5	688	653
445	45	58,4	67	59,3	680	646
432	43,9	57	66	58,0	672	637
420	42,8	55,9	65	56,7	663	628
412	42	54,9	-	55,9	658	622
402	41	53,7	-	54,9	650	615
392	40	52,6	-	53,8	642	608
382	39	51,5	-	52,7	634	601
372	38	50,4	-	51,6	628	594
363	37	49,3	-	50,6	620	587
354	36	48,2	-	49,6	612	580
345	35	47,1	-	48,6	606	573
336	34	46,1	-	47,6	598	567
327	33	45,1	-	46,6	592	561
318	32	44,1	-	45,5	584	554
310	31	43,1	-	44,6	578	548
302	30	42,2	-	43,6	572	542
294	29	41,3	-	42,7	566	536
286	28	40,4	-	41,7	560	531
279	27	39,5	-	40,9	552	525
272	26	38,7	-	40,0	546	519
266	25	37,8	-	39,3	540	514
260	24	37	-	38,5	534	508
254	23	36,3	-	37,7	528	503
248	22	35,5	-	37,0	522	-
243	21	34,8	-	36,4	516	-
238	20	34,2	-	35,7	510	-

Tabla A3 Tabla de conversión de valores de durezas a diferentes escalas. [28]

Escala de Dureza	Tipo de indentador	Carga mayor (kgf)	Aplicaciones típicas de las escalas
A	Cono de Diamante	60	Carburos cementados, aceros en placas delgadas y de capa poco profunda.
B	Esfera de 1/16 pulgada	1000	Aleaciones de cobre, aceros suaves, aleaciones de aluminio, hierros maleables.
C	Cono de Diamante	150	Acero, fundiciones de hierro duras, hierro perlítico maleable, titanio, aceros cementados de capa profunda y otros materiales cuya dureza sea de 100 B.
D	Cono de Diamante	100	Acero en placas delgadas, acero cementado de capa de espesor medio y hierro maleable perlítico.
E	Esfera de 1/8 pulgada	100	Fundición de hierro, aleaciones de aluminio y magnesio y metales para cojinetes.
F	Esfera de 1/16 pulgada	60	Aleaciones de cobre recocidas, metales laminados blandos.
G	Esfera de 1/16 pulgada	150	Bronce al fósforo, aleaciones berilio-cobre, hierros maleables.
H	Esfera de 1/8	60	Aluminio, zinc y cobre.
K	Esfera de 1/8	150	Metales para cojinetes y otros materiales muy blandos y muy delgados.
I	Esfera de 1/4	60	
M	Esfera de 1/4	100	
L	Esfera de 1/4	150	
R	Esfera de 1/2	60	
S	Esfera de 1/2	100	
V	Esfera de 1/2	150	

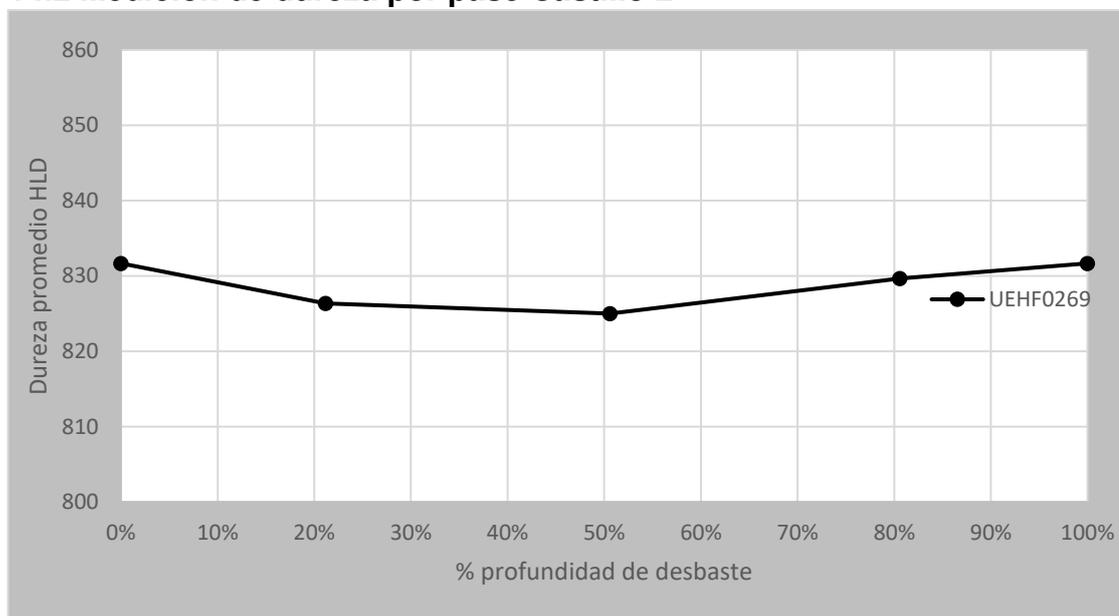
Tabla A4 Tabla de conversión de valores de durezas a diferentes escalas.

14.1 Medición de dureza por pase Castillo 1

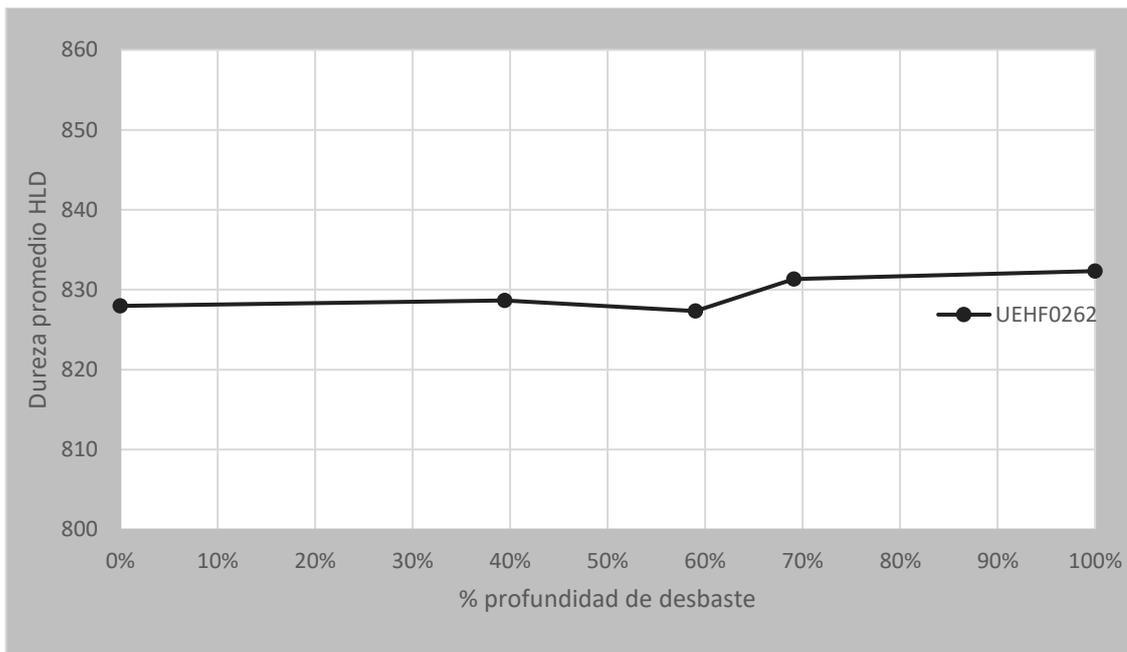


Gráfica A5 Dureza de rodillo UEHF0268 del castillo 1 respecto a su profundidad de desgaste

14.2 Medición de dureza por pase Castillo 2

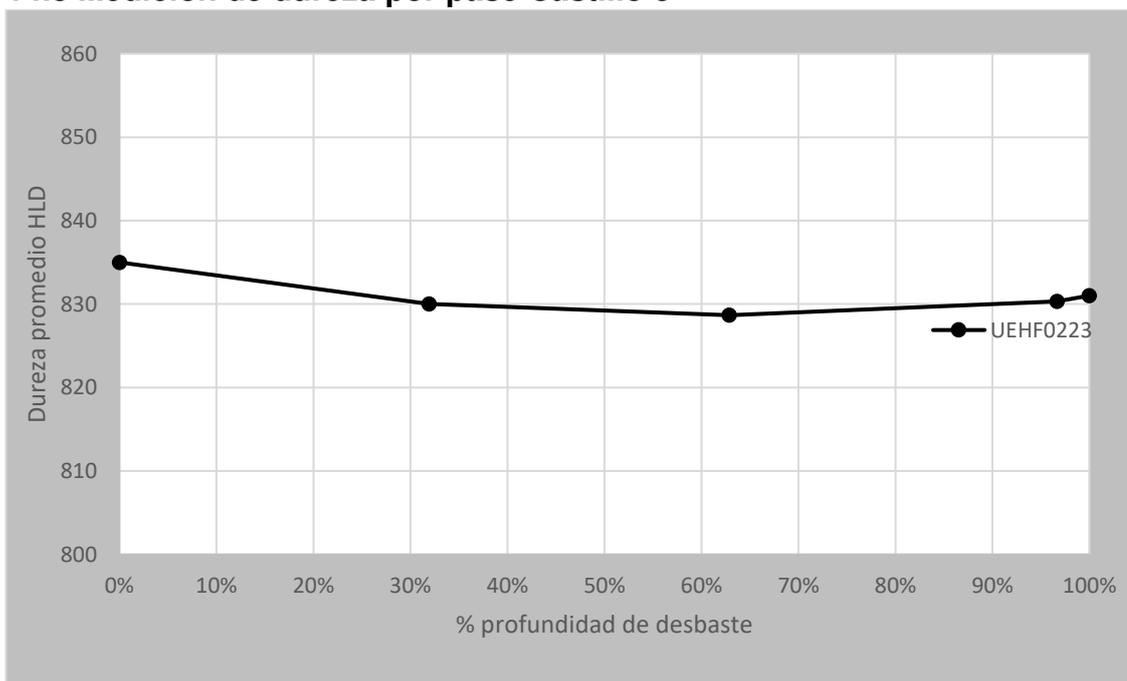


Gráfica A6 Dureza de rodillo UEHF0269 del castillo 2 respecto a su profundidad de desgaste



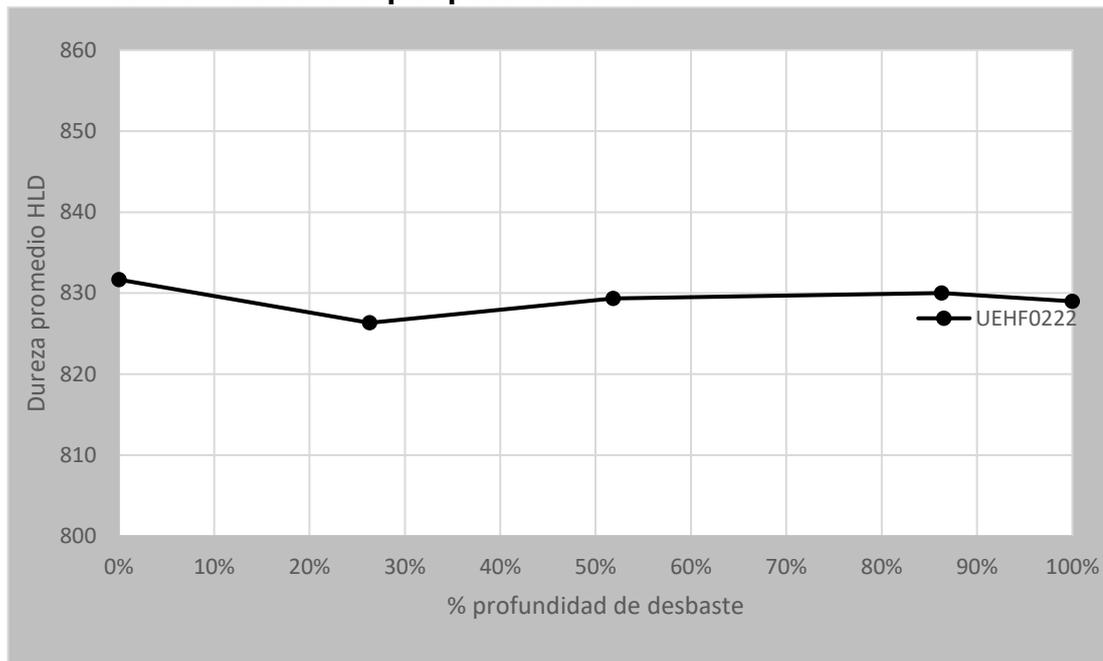
Gráfica A7 Dureza de rodillo UEHF0262 del castillo 2 respecto a su profundidad de desgaste

14.3 Medición de dureza por pase Castillo 3

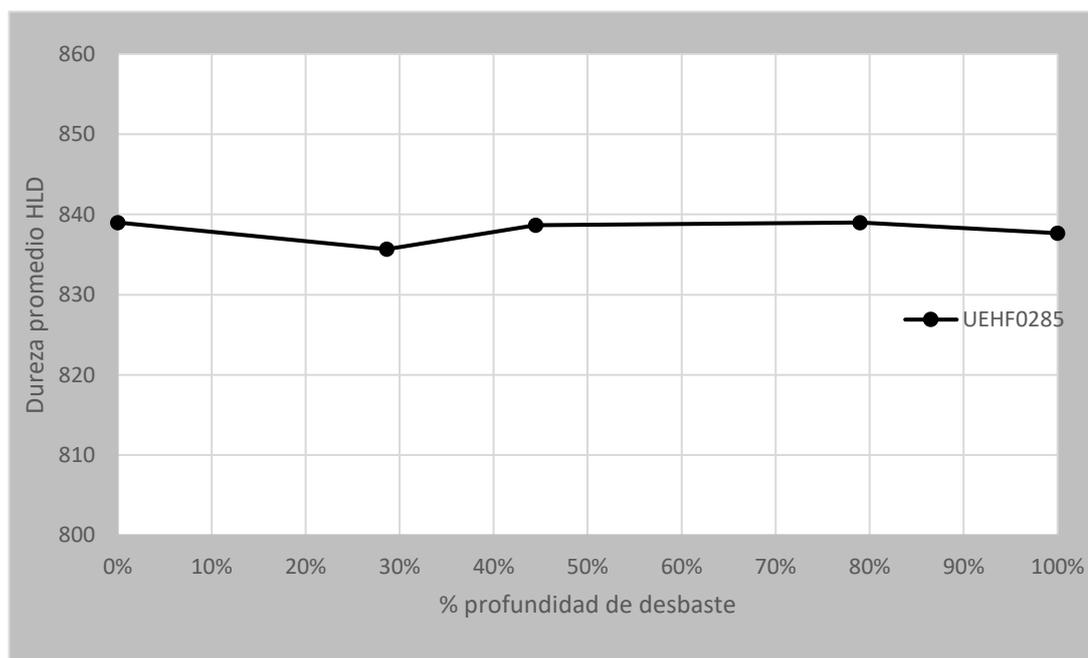


Gráfica A8 Dureza de rodillo UEHF0223 del castillo 3 respecto a su profundidad de desgaste

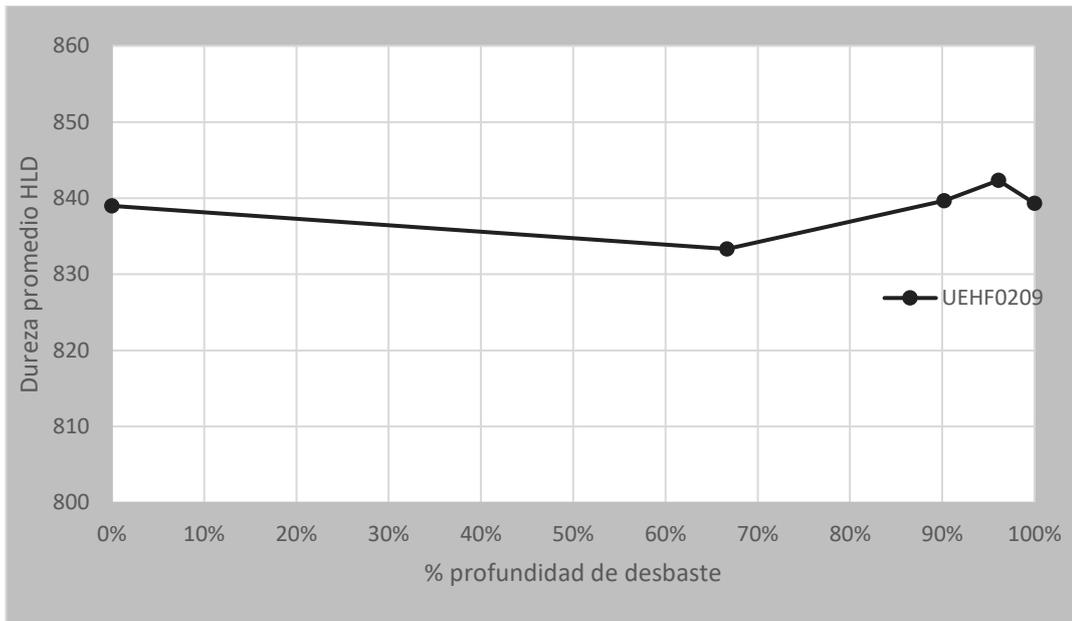
14.4 Medición de dureza por pase Castillo 4



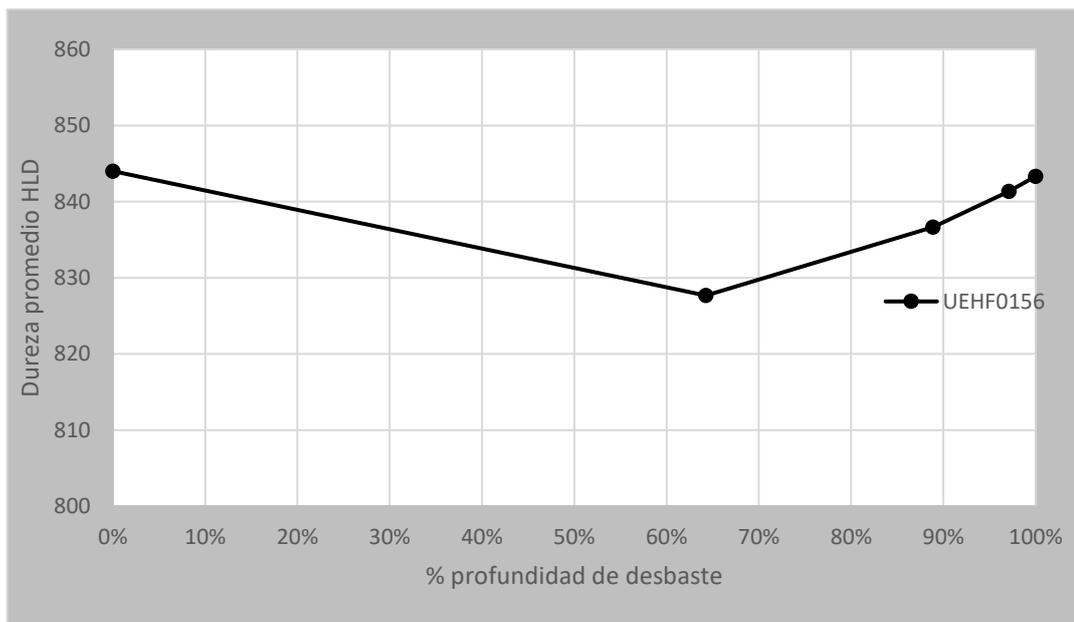
Gráfica A9 Dureza de rodillo UEHF0222 del castillo 4 respecto a su profundidad de desbaste



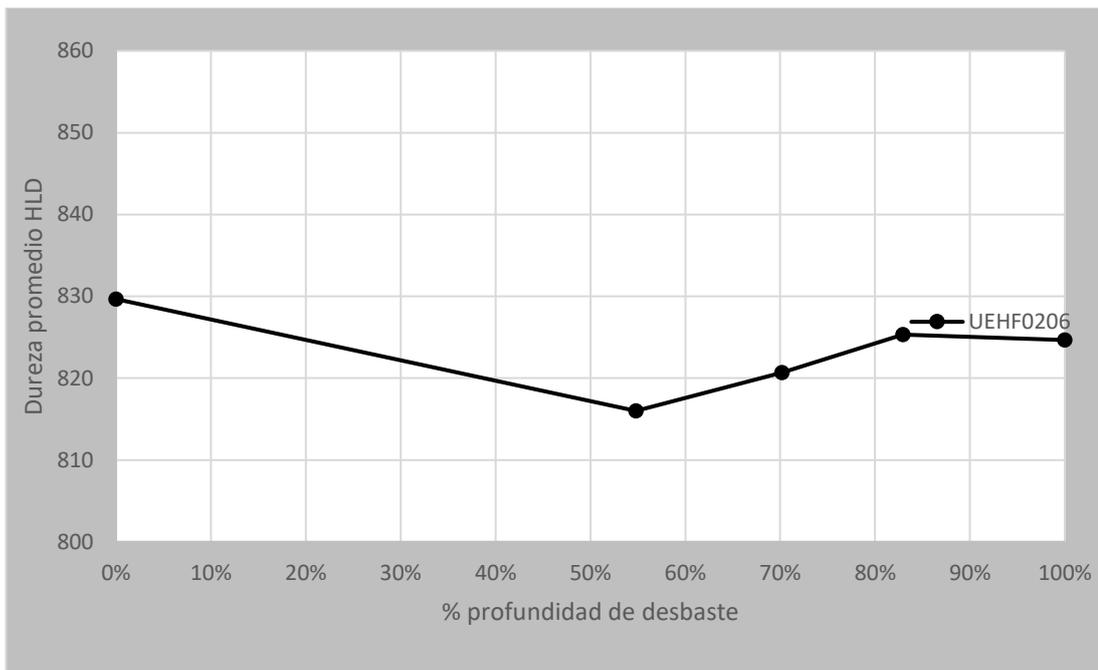
Gráfica A10 Dureza de rodillo UEHF0285 del castillo 4 respecto a su profundidad de desbaste



Gráfica A11 Dureza de rodillo UEHF0209 del castillo 4 respecto a su profundidad de desgaste

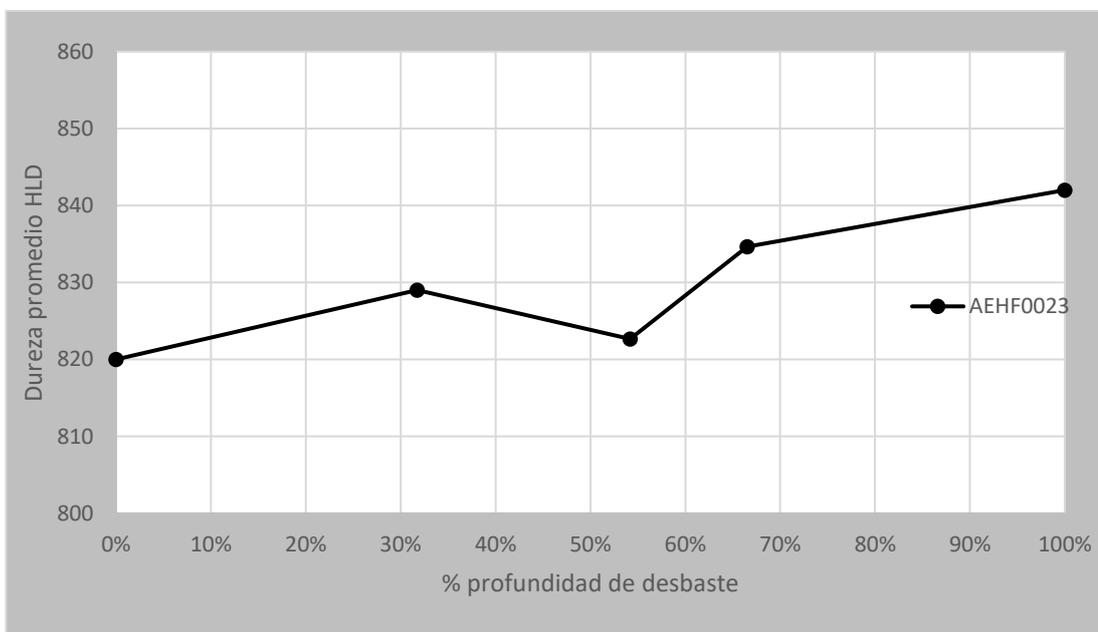


Gráfica A12 Dureza de rodillo UEHF0156 del castillo 4 respecto a su profundidad de desgaste

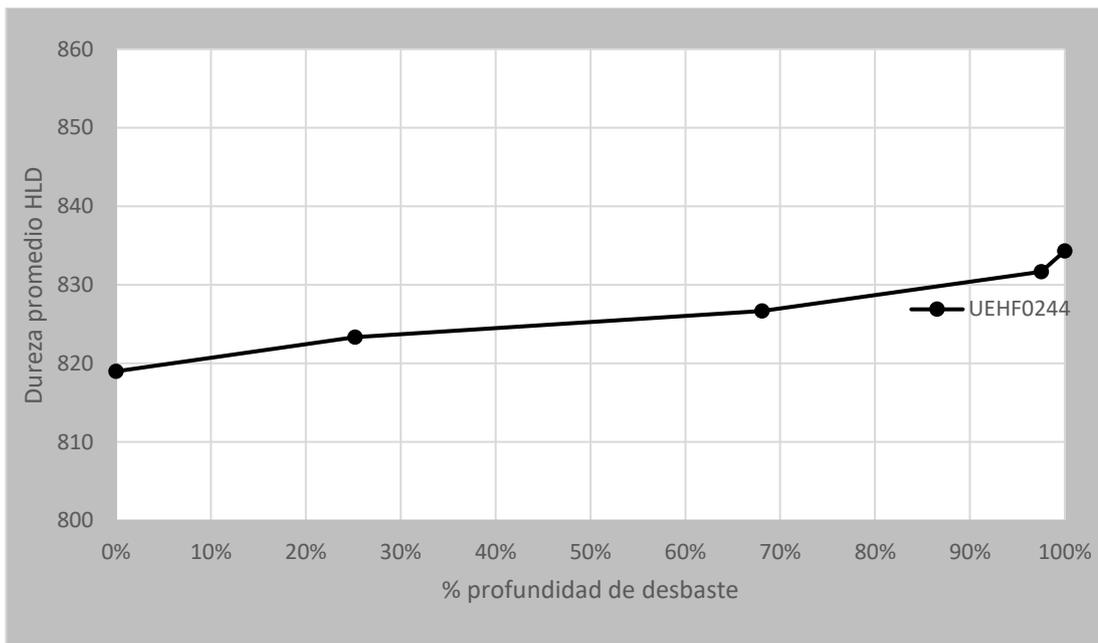


Gráfica A13 Dureza de rodillo UEHF0206 del castillo 4 respecto a su profundidad de desbaste

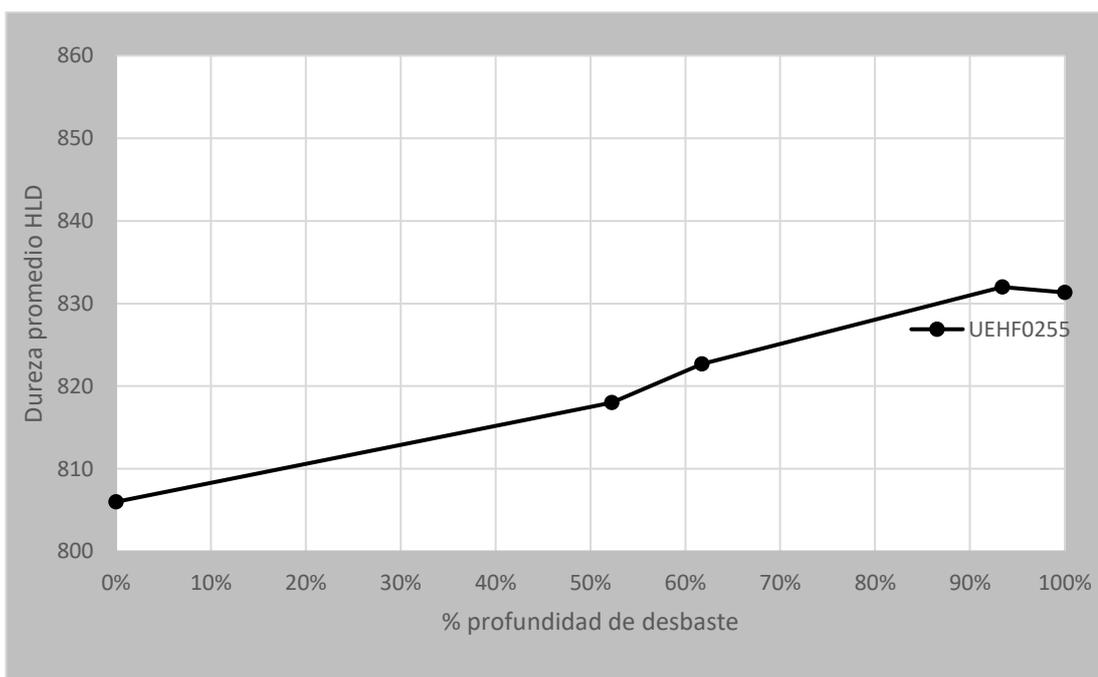
14.5 Medición de dureza por pase Castillo 5



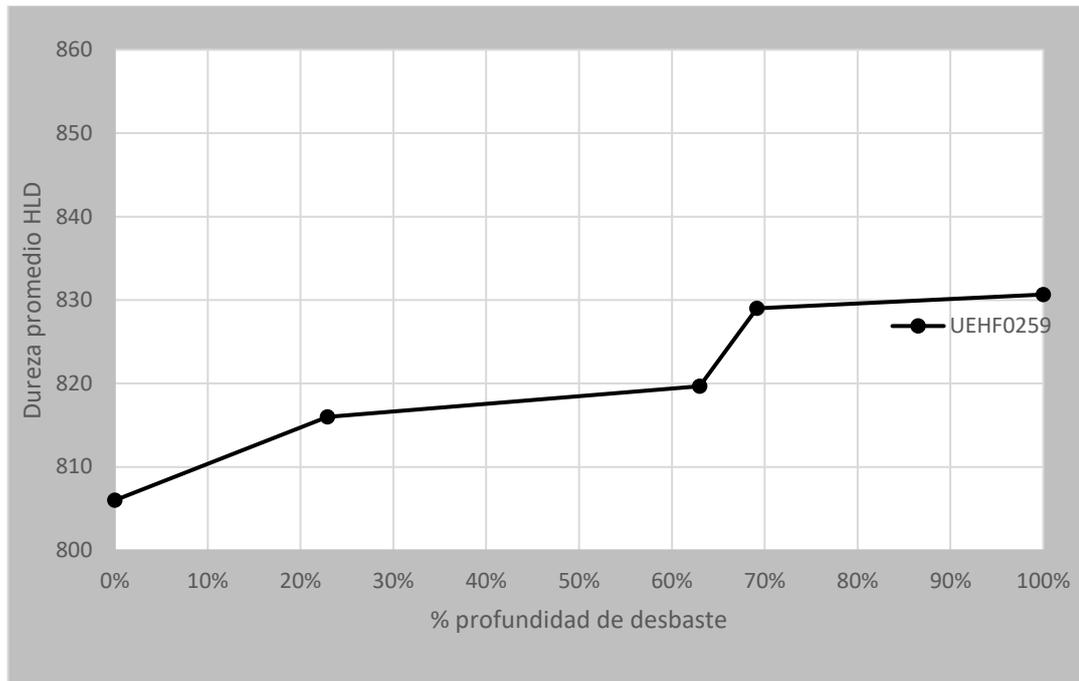
Gráfica A14 Dureza de rodillo AEHF0023 del castillo 5 respecto a su profundidad de desbaste



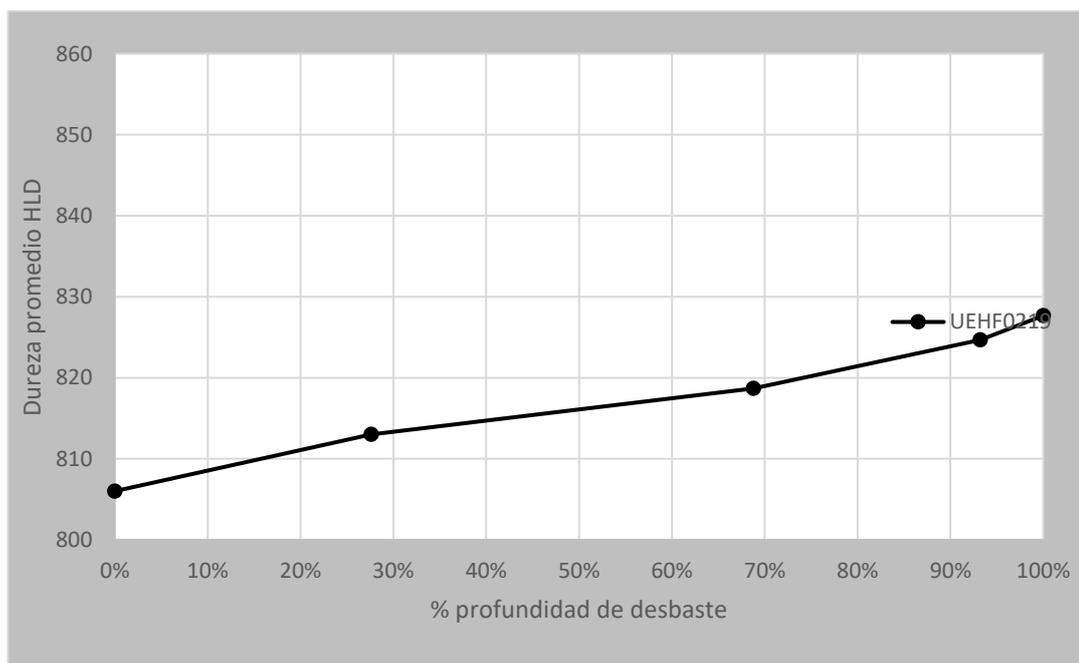
Gráfica A15 Dureza de rodillo UEHF0244 del castillo 5 respecto a su profundidad de desgaste



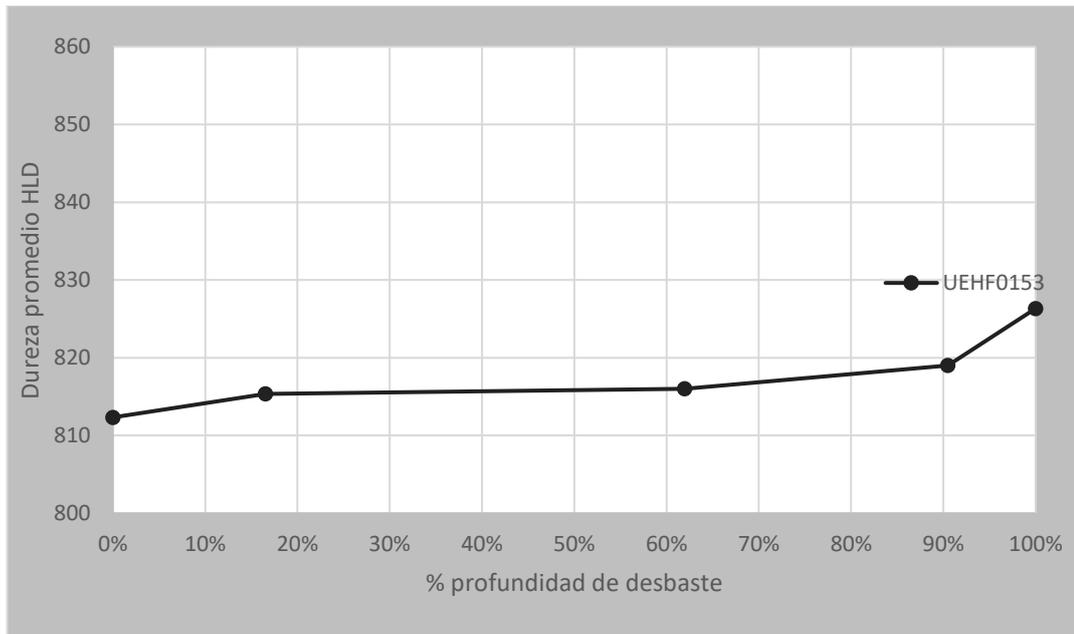
Gráfica A16 Dureza de rodillo UEHF0255 del castillo 5 respecto a su profundidad de desgaste



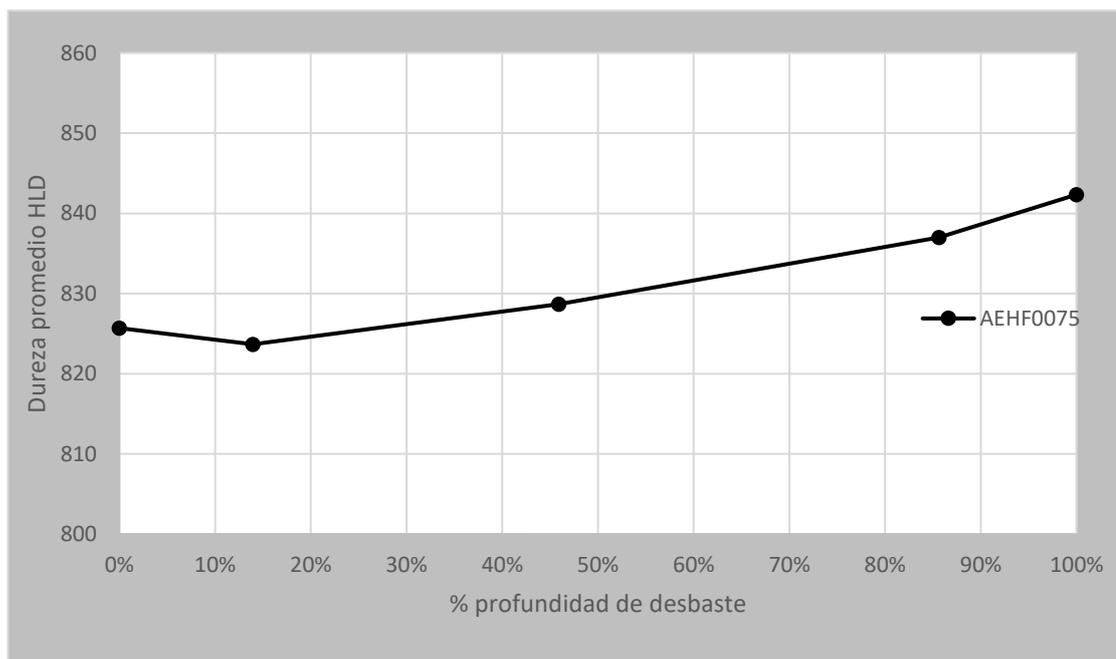
Gráfica A17 Dureza de rodillo UEHF0259 del castillo 5 respecto a su profundidad de desbaste



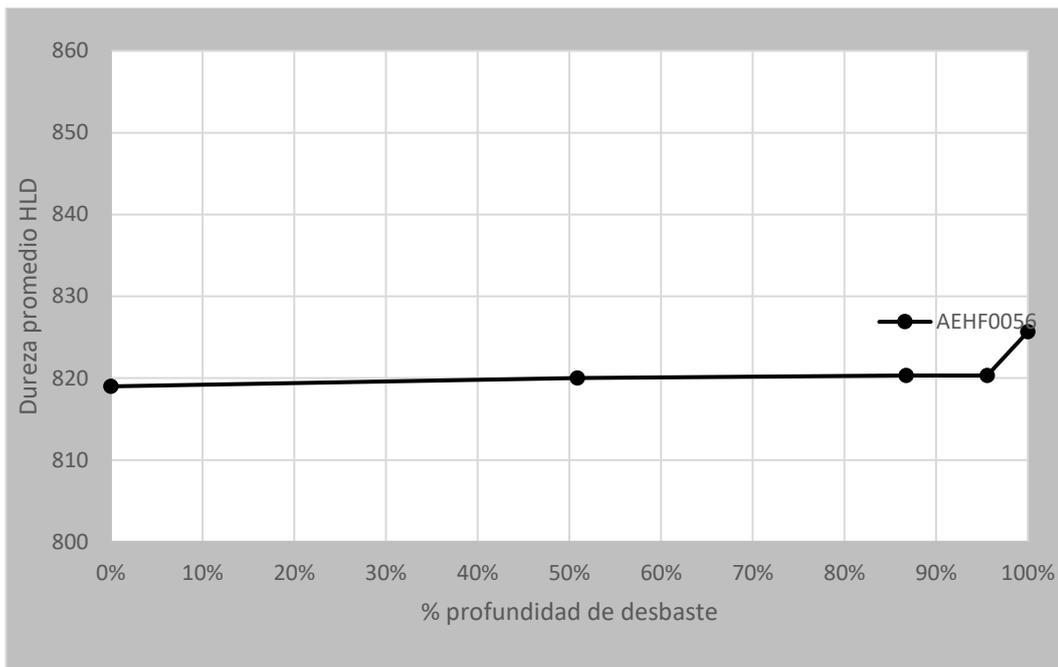
Gráfica A18 Dureza de rodillo UEHF0219 del castillo 5 respecto a su profundidad de desbaste



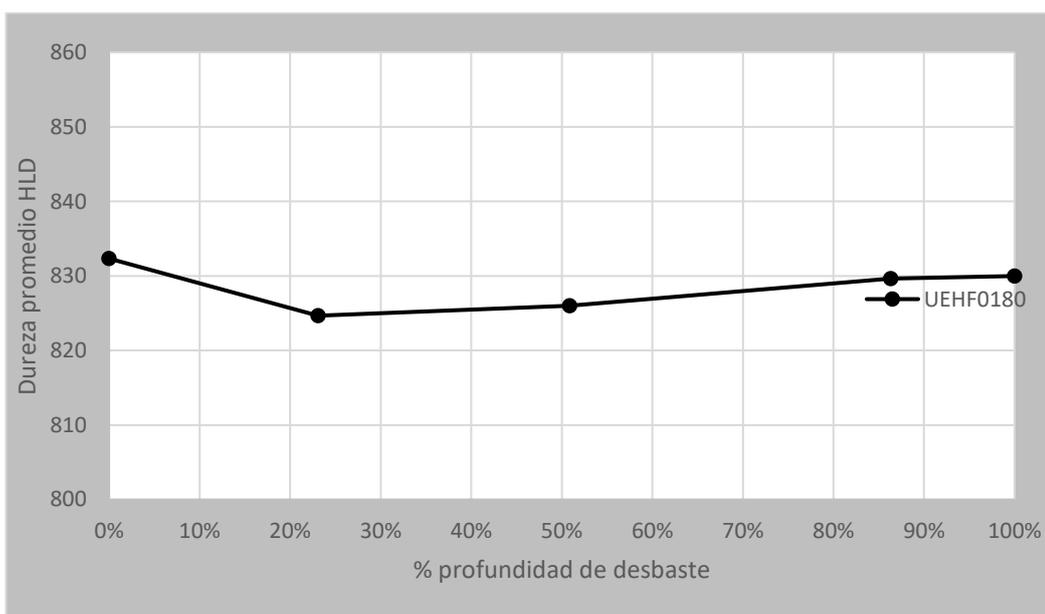
Gráfica A19 Dureza de rodillo UEHF0153 del castillo 5 respecto a su profundidad de desgaste



Gráfica A20 Dureza de rodillo AEHF0075 del castillo 5 respecto a su profundidad de desgaste



Gráfica A21 Dureza de rodillo AEHF0056 del castillo 5 respecto a su profundidad de desgaste



Gráfica A22 Dureza de rodillo UEHF0180 del castillo 5 respecto a su profundidad de desgaste

15. REFERENCIAS

- [1] Lenard, J. G. (2017). Primer on flat rolling. S.L.: Elsevier The Lancet.
- [2] Roberts, W. L. (1978). Cold rolling of steel. New York: Dekker.
- [3] Garza, N.F. (2003). Caracterización microestructural y superficial de aceros laminados en caliente y en frío (Tesis de maestría), México, UANL.
- [4] Geoffrey, W. Rowe. (1977). Principles of Industrial Metalworking Process. S.L.: CBS Publication.
- [5] Avner, S. H. (1988). Introducción a la metalurgia física. México: McGraw-Hill.
- [6] Silva Franco, D. (2012). Laminación en caliente y en frío de aceros al silicio para aplicaciones eléctricas (Tesis de maestría), México, UANL.
- [7] Dieter, G. J. (1961). Mechanical Metallurgy. New York, Ny, McGraw-Hill Book Company.
- [8] Castañeda, R. S. (1999). Caracterización y análisis de rodillos de laminación en caliente y frío (Tesis de maestría), México, UANL.
- [9] Orrego, D. F., Moreno, D. Ú, & Atehortúa, J. E. (2010). Análisis De esfuerzos para un rodillo de trabajo de un molino laminador de acero. Universidad Nacional De Colombia Sede Medellin, 1-12.
- [10] Li, W., Liu, X., Guo, Z., & Huang, J. (2012). Roll shifting strategy with varying stroke and step in hot strip mill. Journal of Central South University, 19(5), 1226-1233. doi:10.1007/s11771-012-1133-z
- [11] Aljabri, A., Jiang, Z. Y., Wei, D. B., Wang, X. D., & Tobar, H. (2013). Thin Strip Profile Control Capability of Roll Crossing and Shifting in Cold Rolling Mill. Materials Science Forum, 773-774, 70-78. doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.773-774.70
- [12] Ginzburg, V. B., & Ballas, R. (1993). High-quality steel rolling: theory and practice. New York: Marcel Dekker.
- [13] Ginzburg, V. B., & Ballas, R. (2000). Flat rolling fundamentals. New York: Marcel Dekker.
- [14] Sikdar, S., John, S., Pandit, A., & Dasu, R. (2007). Analysis of roll stack deflection in a hot strip mill. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 29(3), 284-289. doi:10.1590/s1678-58782007000300008
- [15] Bhushan, B. (2013). Introduction to tribology. Oxford: Wiley-Blackwell.
- [16] Grajales, D. M., & A. S. (2003). El desgaste de materiales, enfrentarlo o dejarlo de lado y asumir los riesgos. Scientia Et Technica Año IX, 22nd Ser., 87-91.

- [17] Suárez Bustamante, F., & Vélez Restrepo, J. (2005). Estudio del modelo de desgaste propuesto por Archard. *Dyna*, 72 (146), 27-43.
- [18] ASTM International. (1996). ASTM A-956-6 Standard Test Method for Leeb Hardness Testing of Steel Products. (PA 19428-2959, United States.).
- [19] Minitab Inc. (2010). Evaluación de la variación de un sistema de medición (Rel16 Ver 1.0). Recuperado de www.minitab.com/es-mx/
- [20] Instituto nacional de estadística y censos INEC (2013). Determinación de los coeficientes de variación estimado (Código: ACTI-CVE-01, Versión: 01). Costa Rica.
- [21] Antonio Rustom J. (2012). Estadística descriptiva, probabilidad e inferencia. Una visión conceptual y aplicada. Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas Universidad de Chile
- [22] Universidad de Valencia. (s.f.). Matriz de correlación. Recuperado 6 mayo, 2018, de <https://www.uv.es/ceaces/base/descriptiva/mcorre.htm>
- [23] Ternium Siderar. (s.f.). Introducción a los procesos y productos de Ternium, Recuperado 6 mayo, 2018, de ar.ternium.com/
- [24] SINOSTEEL XTMMC. (s.f.). Mill roll products. Recuperado 6 mayo, 2018, de <http://www.xt-zhagun.com/ENGLISH/productszg.jsp>
- [25] Instituto Máquina Herramienta. (s.f.). Rectificado. Recuperado 6 mayo, 2018, de <http://www.imh.eus/es/comunicacion/dokumentazio-irekia/manuales/introduccion-a-los-procesos-de-fabricacion/conformacion-por-mecanizado/mecanizado-por-abrasion/rectificado>
- [26] AcelorMittal. (2018). Aceros microaleados para conformación en frío. Recuperado 6 mayo, 2018, de http://automotive.arcelormittal.com/saturnus/sheets/F_ES.pdf
- [27] Union Electric Steel Corporation (2018). Forged hardened steel roll report (World file: 1142-126L special cert)
- [28] Sij ravne systems (2015). Hardness conversion table. Recuperado 6 mayo, 2018, de <https://sij.ravnesystems.com/assets/Uploads/Hardness-Conversion-Table.pdf>
- [29] Universidad Autónoma de Nuevo León (s.f.). Desgaste. Recuperado 6 mayo, 2018, de http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1020150052/1020150052_03.pdf
- [30] Sitio web para consulta de bases de datos de investigación, Desgaste de rodillos de trabajo durante la laminación en frío de aceros planos, <https://www.dropbox.com/sh/cpdiykmzczxeul1/AABHxeJKvkGLD0OsjagozAB4a?dl=0>

- [31] ZEISS. (s.f.). ZEISS Axio Observer for Materials. Recuperado 01 agosto, 2018, de <https://www.zeiss.com/microscopy/int/products/light-microscopes/axio-observer-for-materials.html>
- [32] JEOL. (s.f.). JSM-IT300 InTouchScope™ Scanning Electron Microscope. Recuperado 1 octubre, 2018, de <https://www.jeol.co.jp/en/products/detail/JSM-IT300.html>
- [33] Callister William. (1995b). Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales (Ed. rev.). Barcelona, España: Reverté.
- [34] Davis, Hammer, E., Clement, W., Troxell, G., & Wiskocil, C. (1964). Ensayo e inspección de los materiales de ingeniería (Ed. rev.). México, México: Mc Graw Hill.
- [35] Calle, G., & Henao, E. (s.f.). DUREZA ROCKWELL.
- [36] Paz Esquivel, J. P. (2013). Estimación de la incertidumbre en pruebas de dureza Rockwell C y B. (Tesis de licenciatura), México, Instituto Politécnico Nacional
- [37] Gil Soto, J. J. (2006). Fatiga (IMAC). Recuperado de http://www.imem.unavarra.es/EMyV/pdfdoc/elemaq/em-transparencias_fatiga.pdf
- [38] Romero Olleros, I., & Universidad Politécnica de Madrid. (2016). Mecánica de sólidos. Recuperado de <http://bigmac.mecaest.etsii.upm.es/~ignacio/resources/MSD/Apuntes/msd.pdf>
- [39] LEVINSON. (s.f.). Fracturas por fatiga. Recuperado 5 octubre, 2018, de <http://www.aceroslevinson.com/2017/03/fracturas-por-fatiga/>
- [40] Proceq. (2017e). Equotip piccolo bambino 2 (810 352 01S ver 12 2017). Recuperado de https://www.proceq.com/uploads/tx_proceqproductcms/import_data/files/Equotip%2
- [41] Sitio web para consulta de análisis de fallas, fractura tipo “lengua de toro”, https://www.dropbox.com/sh/lfoclbbn5krkx1s/AAA4pQQqHtb_OMDJo7SD0zURa?dl=0
- [42] Union Electric Åkers. (s.f.). Forged Steel Roll Specifications GRADE: 5CRDH. Recuperado 01 agosto, 2018, de <http://www.akersrolls.com/globalassets/union-electric-akers/products/product-data-sheets/ues/steel-grades---forged-rolls/uea-5crdh-data-sheet.pdf>
- [43] Sitio web para consulta de reporte académico de Ing. José Torres, Modelo de desgaste en rodillos de trabajo para laminación en frío de aceros, <https://www.dropbox.com/sh/utjma6ay875z4v1/AAB-ttiMMvYJu7Bw1Rq7R9tCa?dl=0>

44] CAEF The European Foundry Association. (2002). Roll Failures Manual Hot Mill Cast Work Rolls (1st Edition 2002). Recuperado de info@caef-eurofoundry.org