



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Influencia de las condiciones de esmerilado sobre la aparición de capa blanca en rieles tipo R400HT para uso en el Metro de Medellín

Luis Guillermo Hernández Álvarez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Materiales y Minerales
Medellín, Colombia

2023

Influencia de las condiciones de esmerilado sobre la aparición de capa blanca en rieles tipo R400HT para uso en el Metro de Medellín

Luis Guillermo Hernández Álvarez

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en ingeniería materiales y procesos

Director:

Ph.D. Alejandro Toro

Codirector:

Ph.D. Juan Felipe Santa Marín

Línea de Investigación:

Tribología y superficies

Grupo de Investigación:

Grupo de investigación en Tribología y Superficies - GTS

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Materiales y Minerales

Medellín, Colombia

2023

A mi familia

Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica:

“La voluntad”.

Albert Einstein

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Luis Guillermo Hernández Álvarez

Fecha 29/01/2024

Agradecimientos

Deseo expresar mi profundo agradecimiento en este momento, en primer lugar, a Dios, por permitirme alcanzar este punto en mi vida y por otorgarme la salud necesaria para lograr mis metas. Reconozco su infinita bondad y amor, los cuales han sido fundamentales en mi camino.

Asimismo, deseo expresar mis agradecimientos a mi director Alejandro Toro y co-director Juan Felipe Santa por la valiosa dirección y apoyo brindado en este trabajo.

Quiero expresar mi agradecimiento a Jaime Alberto Jaramillo Carvalho, Juan Camilo Vélez Molina, Manuel Antonio Valdés Canaval, Alejandro Vasquez Gallo, Luis Miguel Ballesteros Ospina, Juan Esteban Lopez Londoño, Sergio Soto Henao y Maria Nelly Gomez Sosa por el valioso respaldo que ofrecieron, el cual fue fundamental para llevar a cabo este trabajo.

También agradezco a mis compañeros del Grupo de Tribología y Superficies GTS, su apoyo personal y humano.

Del mismo modo, quiero agradecer a Luz Mery Arrubla, Efraín Zuluaga, Diego Lopez, personal del Laboratorio de Tecnología y Diseño de Materiales de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, por sus valiosas sugerencias y disposición para el desarrollo de las pruebas de laboratorio.

A mi madre, a mi padre, a mi esposa Yesenia Orrego y a mi hermano, les agradezco por su apoyo incondicional a lo largo de este proceso de mi maestría. Entendieron mis ausencias y me brindaron apoyo en los momentos difíciles de una manera que no tiene precio.

Resumen

Influencia de las condiciones de esmerilado sobre la aparición de capa blanca en rieles tipo R400HT para uso en el Metro de Medellín

El esmerilado de rieles constituye una operación de mantenimiento destinada a corregir defectos superficiales y subsuperficiales presentes en los mismos, especialmente aquellos derivados de la fatiga por contacto con rodadura (RCF) y a la formación de corrugaciones. Sin embargo, el esmerilado de rieles puede inducir la formación de una capa dura y frágil en la superficie conocida como capa blanca. La presencia de esa capa se ha asociado con una aparición temprana de grietas por RCF. En este trabajo, se esmerilaron muestras de rieles R400HT en laboratorio bajo condiciones controladas que promueven la formación de capa blanca. Se sometieron tanto muestras esmeriladas como no esmeriladas a pruebas de fatiga de contacto aceleradas a 20K ciclos (8K ciclos en seco + 12K ciclos con agua) en un tribómetro tipo disco-disco, con el objetivo de determinar la tasa de desgaste y el coeficiente de fricción. Los resultados revelaron que todas las muestras probadas, bajo diferentes condiciones de esmerilado, desarrollaron una capa blanca en sus superficies. Aquellas muestras con esta capa blanca exhibieron un mayor desgaste y una mayor densidad de grietas en comparación con las muestras sin esmerilar, para el mismo número de ciclos de fatiga. Además, se observó que el inicio del agrietamiento fue influenciado por la presencia de la capa blanca, dado que la interfaz entre la capa blanca y la perlita se convirtió en un sitio preferencial para el inicio de las grietas.

Palabras clave: Esmerilado de rieles, capa blanca, fatiga por contacto de rodadura, ensayos disco-disco, agrietamiento.

Abstract

Influence of grinding conditions on the formation of the white layer in R400HT rails for use in the Metro de Medellín

Rail grinding is a maintenance operation carried out to remove surface and subsurface defects in rails, mainly those associated with rolling contact fatigue (RCF) and corrugation. However, rail grinding could promote the formation of a hard and fragile layer at the surface known as White Etching Layer (WEL). The presence of this layer has been associated with the early onset of RCF cracks. In this study, R400HT rail samples were ground in laboratory under controlled conditions that promote the formation of the WEL. The samples were submitted to accelerated contact fatigue tests at 20,000 cycles (8,000 cycles dry + 12,000 cycles with water) in a twin-disc tribometer, in which the wear rate and the coefficient of friction were determined. The results showed that under different grinding conditions, all tested samples developed the WEL at the surface. The samples with WEL presented higher wear and density of cracks compared to WEL-free samples for the same number of cycles. The onset of cracking was influenced by the presence of the WEL since as the WEL-perlite interface was a preferential site for crack initiation.

Keywords: Rail grinding, white Etching Layer (WEL), Rolling contact fatigue, Twin-disc tests, cracking.

Contenido

	Pág.
Resumen.....	IX
Lista de figuras	XIII
Lista de tablas.....	XVII
Lista de Símbolos y abreviaturas	XVIII
Introducción.....	1
1. Capítulo 1: OBJETIVOS	5
1.1 Objetivo general.....	5
1.2 Objetivos específicos	5
2. Capítulo 2: MARCO CONCEPTUAL.....	7
2.1 Nociones básicas del contacto rueda-riel	7
2.1.1 Contacto rueda-riel.....	7
2.1.2 Mecanismos de falla en el sistema rueda-riel.....	15
2.2 Microestructura y defectos típicos en rieles	21
2.2.1 Microestructura en aceros para rieles.....	21
2.2.2 Defectos típicos en rieles.....	23
2.3 Operaciones de mantenimiento y esmerilado de rieles.....	27
2.3.1 Esmerilado y compactación.....	27
2.3.2 Esmerilado de rieles	28
2.3.3 Estrategias de esmerilado	29
2.3.4 Factores que determinan el esmerilado	30
2.3.5 Análisis del proceso corte en el esmerilado	39
2.4 Afectaciones microestructurales del esmerilado	41
2.4.1 Formación de capa blanca en rieles.....	41
3. Capítulo 3: MATERIALES Y MÉTODOS.....	45
3.1 Materiales.....	45
3.1.1 Extracción de muestras.....	45
3.1.2 Caracterización química y microestructural	47
3.2 Pruebas de esmerilado	51
3.2.1 Procedimiento general de esmerilado.....	51
3.2.2 Diseño del experimento	55
3.2.3 Caracterización de las muestras.....	56
3.3 Ensayos tribológicos.....	57

3.3.1	Procedimiento general tribómetro disco-disco	57
3.3.2	Diseño del experimento	59
3.3.3	Caracterización de las muestras	61
4.	Capítulo 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	63
4.1	Análisis de las muestras esmeriladas	63
4.1.1	Calidad superficial	63
4.1.2	Pérdida de masa	68
4.1.3	Microestructura	70
4.2	Efecto de la presencia de la capa blanca sobre la respuesta tribológica en ensayos disco-disco	75
4.2.1	Pérdida de masa	75
4.2.2	Coefficiente de tracción.....	76
4.2.3	Calidad superficial	78
4.2.4	Microestructura	80
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	91
5.1	Conclusiones.....	91
5.2	Recomendaciones	93
A.	Anexo: Maquina esmerilado; Manual de usuario y memorias de diseño	95
	Bibliografía	115

Lista de figuras

	Pág.
Figura 2-1: Principio general del contacto rueda-riel [55].....	7
Figura 2-2: Contacto rueda riel en vía recta y vía curva [56].....	8
Figura 2-3: Descripción del contacto rueda-riel en vía curva izquierda [13].....	8
Figura 2-4: Esfuerzo de contacto conjunto rueda-riel al girar en una curva a) posición de los ejes trasero y delantero. b) Esfuerzos de contacto en eje delantero y trasero [14].	9
Figura 2-5: Contacto entre una sección de la rueda de un tren y el riel parte externa [15].	9
Figura 2-6: Regiones de contacto en la intercara rueda-riel [16].	10
Figura 2-7: Distribución de esfuerzos normales de Hertz en el área de contacto [19]. .	11
Figura 2-8: Parche de contacto rueda-riel condiciones específicas del Metro de Medellín [21].	13
Figura 2-9: Coeficiente de fricción de acuerdo con la evolución de las zonas de adhesión y deslizamiento [23].	13
Figura 2-10: Curva de Creep, representación de toda la curva de tracción con zonas de adhesión y deslizamiento [24].	14
Figura 2-11: Esquema para hallar el porcentaje de deslizamiento entre dos discos que ruedan a diferentes velocidades tangenciales [30].	18
Figura 2-12: Deslizamiento entre la rueda y el riel debido a la diferencia en las velocidades V1 y V2 [28].....	18
Figura 2-13: Pérdida de masa por adhesión: a) Ruptura por la intercara. b) Ruptura por el material más suave (A). c) Ruptura por el material más suave (A) con una parte del material más duro (B). d) Ruptura por ambos materiales [32].	19
Figura 2-14: Evolución de los aceros en los últimos 100 años [34].	22
Figura 2-15: (a) Marcas de adhesión en la superficie del riel, presentes en la curva 5. (b) pérdida de material, producto de elevadas fuerzas adhesivas, imagen tomada de la curva 15 [40].	24
Figura 2-16: Imagen de un Squat presente en la curva 5 del sistema del Metro de Medellín [40].	25
Figura 2-17: (a) Agrietamiento en la cabeza del riel (Head Checks). (b) desprendimiento de material debido a fatiga. Imágenes tomadas del Metro de Medellín, curva 4 y 8 respectivamente [40].	25
Figura 2-18: Tongue Lipping, imagen tomada del riel del hilo alto del Metro de Medellín en la curva 1. [41].....	26

Figura 2-19:	a) Desgaste ondulatorio curva 1, b) Desgaste ondulatorio curva 3 [40]. Metro de Medellín.	27
Figura 2-20:	(a) Máquina para esmerilar referencia RGH 10, (b) sistema de esmerilado. Tomada por el grupo GTS.	27
Figura 2-21:	Aspecto general de la superficie esmerilada.	28
Figura 2-22:	Disposiciones de las ruedas abrasivas al momento de realizar un esmerilado [54].	30
Figura 2-23:	Área de metal removido según el tipo de patrón designado [7].	31
Figura 2-24:	Contacto de la rueda de esmerilar con la esquina del riel [7].	34
Figura 2-25:	Contacto de la rueda de esmerilar con la parte central de la cabeza del riel [7].	35
Figura 2-26:	Secuencia de motores de esmerilado en un determinado patrón [7].	37
Figura 2-27:	Metal removido de acuerdo a una distribución específica de esmerilado [7]. ...	37
Figura 2-28:	Rueda de esmerilar en contacto frontal con la cabeza del riel [7].	38
Figura 2-29:	Proceso de remoción durante el mecanizado de metales [63].	39
Figura 2-30:	Proceso de remoción durante el mecanizado con altas velocidades de corte [63].	40
Figura 2-31:	Condiciones de corte en el esmerilado [63].	40
Figura 2-32:	Microestructura del riel R400HT luego de operación de esmerilado con la esmeriladora RGH 10 a 6 km/h (Ángulos de ataque 21 – 22 = 65%, 23 – 24 = 70%, 25 – 26 = 85%). La flecha indica la ubicación de la capa blanca en la superficie.	43
Figura 3-1:	Proceso de corte y obtención de probetas del componente riel. Modificada de [65].	46
Figura 3-2:	Proceso de corte y obtención de probetas de rueda. Modificada de [65].	46
Figura 3-3:	Dimensiones finales probetas de experimentación.	47
Figura 3-4:	Imágenes rueda E8. (a) Microestructura de la rueda pulida con ataque químico. LOM. (b) Láminas de perlita. SEM. (c) Aspecto de la muestra pulida sin ataque químico. LOM.	49
Figura 3-5:	Imágenes del riel R400HT. (a) Aspecto general de la microestructura del riel R400HT. LOM, (b) Detalle de las láminas de perlita. SEM, (c). Detalle de inclusiones no metálicas tipo sulfuros en el riel R400HT. LOM.	51
Figura 3-6:	Aspecto general de la máquina utilizada para las pruebas de esmerilado.	52
Figura 3-7:	Sistema autocentrante y embrague.	53
Figura 3-8:	Sistema de transmisión de velocidad angular probeta (Arreglo de poleas).	53
Figura 3-9:	Sistema aplicación de profundidad de corte a la probeta.	54
Figura 3-10:	Sistema toma de medidas.	55
Figura 3-11:	Conexión del computador portátil al display de la celda de carga.	55
Figura 3-12:	Condiciones generales del experimento de esmerilado.	56
Figura 3-13:	Obtención de muestra para análisis metalográfico transversal(A) y longitudinal(B).	57
Figura 3-14:	(a) Esquema máquina disco sobre disco. (B) Imagen real del dispositivo.	58

Figura 3-15:	Riel R400HT después de un proceso de torneado. Imagen tomada en microscopio óptico (LOM).....	60
Figura 3-16:	Condiciones generales del experimento tribológico.	61
Figura 3-17:	Obtención de muestra para la realización de mediciones de microdureza.	62
Figura 4-1:	Resultados de fuerza y acabado superficial para condición de esmerilado.	64
Figura 4-2:	Valores obtenidos de fuerza y tiempo con su respectiva desviación estándar.	65
Figura 4-3:	Imágenes por SEM de las superficies esmeriladas para cada condición: A(LV-LL), B(LV-HL), C(HV-LL) y D(HV-HL).....	66
Figura 4-4:	Imagen por SEM de la superficie esmerilada para cada la condición: (HV-LL).	66
Figura 4-5:	Parámetros de rugosidad de las muestras de rieles no esmeriladas y esmeriladas.	68
Figura 4-6:	Pérdida de masa por unidad de longitud para cada condición de esmerilado.	69
Figura 4-7:	Capa blanca obtenidas para cada condición de experimentación.	70
Figura 4-8:	Capa deformada justo debajo de la capa blanca. (A) vista desde un microscopio óptico (LOM) a 50X. (B) vista desde un microscopio electrónico de barrido (SEM) a 5000X.	71
Figura 4-9:	Valores promedio del espesor de la capa blanca.	73
Figura 4-10:	Perfil de microdureza en probetas esmeriladas para cada condición de experimentación.....	73
Figura 4-11:	Variación de la microdureza de muestras esmeriladas en función de la distancia desde la superficie para cada condición de experimentación.	74
Figura 4-12:	Pérdida de masa en los pares rueda-riel en el ensayo en la máquina disco-disco.	75
Figura 4-13:	Pérdida de masa en los rieles después del ensayo en la máquina disco-disco.	76
Figura 4-14:	Coefficiente de tracción para los pares rueda-riel en la máquina disco-disco (A)Tendencia por ciclo, (B)Desviación por condición.	77
Figura 4-15:	Aspecto de las superficies desgastadas de rueda R260 y riel R400HT respectivamente, después de los ensayos tribológicos de acuerdo a las condiciones de experimentación usadas.	79
Figura 4-16:	Metalografía de las muestras después de las pruebas disco-disco, hasta 20K ciclos (8K secos + 12K húmedos). Para las condiciones LV-LL, LV-HL, HV-LL, HV-HL y Sin esmerilar.	80
Figura 4-17:	Interfaz capa blanca y capa deformada después de pruebas por fatiga de contacto. SEM a 5000X.....	82
Figura 4-18:	Zona con alta densidad de grietas para la condición LV-HL. SEM anterior a 100X y posterior a 500X.....	83
Figura 4-19:	(A) Nucleación de grieta en el interfaz de la capa blanca y la capa endurecida. LOM (B) Nucleación de grieta zona superficial y subsuperficial. SEM.....	83

Figura 4-20: Perfil de microdureza en probetas después de pruebas de contacto de fatiga en el tribómetro disco-disco para cada condición de experimentación.	84
Figura 4-21: Variación de la microdureza de muestras después de las pruebas de fatiga de contacto en función de la distancia desde la superficie desgastada para cada condición de experimentación.	85
Figura 4-22: Microdureza y espesor de la capa deformada después de las pruebas de fatiga de contacto en el tribómetro disco-disco.	86
Figura 4-23: Variación de ángulos de las grietas con respecto a la superficie y profundidad de la capa deformada para condición de experimentación.	87
Figura 4-24: Análisis grietas después de las pruebas fatiga de contacto para cada condición de experimentación.	88

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2-1: Composición química y durezas típicas de ruedas y rieles en vehículos de carga y pasajeros [34].....	21
Tabla 2-2: Propiedades mecánicas de aceros ferroviarios [34].	23
Tabla 2-3: Ecuaciones en el mecanizado por esmerilado [63].	41
Tabla 3-1: Composición química % en peso, rueda E8. Espectrometría de emisión óptica UdeA.	48
Tabla 3-2: Composición química para rueda ER8 según la norma UNE-EN 13262:2004 [67].	48
Tabla 3-3: Composición química % en peso, riel R400HT. Espectrometría de emisión óptica - UdeA.....	49
Tabla 3-4: Composición química para riel R400 HT según la norma UNE-EN 13674-1 [66].	50
Tabla 3-5: Factores considerados en la exploración experimental.....	56
Tabla 3-6: Factores considerados en el diseño experimental.....	60
Tabla 3-7: Definición de los parámetros fijos y variables del ensayo.....	61
Tabla 4-1: Descripción de condiciones de experimentación en el esmerilado.....	63
Tabla 4-2: Características de la capa blanca obtenida para cada condición de experimentación.....	72
Tabla 4-3: Espesor de la capa deformada y microdureza obtenidas después de experimentación de esmerilado y disco-disco.	86
Tabla 4-4: Relación de espaciado superficial de grietas y espesor de capa deformada para todas las condiciones de experimentación después de las pruebas de fatiga de contacto.	89

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
P	Carga normal	N	Ec. 2.1
E	Módulo de Young	Pa	Ec. 2.1
R	Radio equivalente	mm	Ec. 2.2
D	Deslizamiento	%	Ec. 2.3
R_R	Radio probeta riel	mm	Ec. 2.3
R_W	Radio probeta rueda	mm	Ec. 2.3
N_R	Revoluciones probeta riel	rpm	Ec. 2.3
N_W	Revoluciones probeta rueda	rpm	Ec. 2.3
V	Velocidad periférica rueda de esmerilar	rpm	Tabla 2-3
MRR	Tasa de remoción de material	mm ³ /s	Tabla 2-3
l_c	Longitud promedio de viruta	mm	Tabla 2-3
n_c	Numero de virutas		Tabla 2-3
U	Energía específica	kJ/kg	Tabla 2-3
H	Dureza Brinell	HB	
H	Dureza Vickers	HV	
R_a	Rugosidad Promedio	μm	
R_t	Altura máxima pico-valle	μm	
R_q	Desviación cuadrática media	μm	
S_m	Espaciado medio entre picos	μm	
R_{sk}	<i>Skewness</i>	μm	

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
ν	Coefficiente de Poisson		Ec. 2.1
t	Espesor de viruta	mm	Tabla 2-3

Abreviaturas

Abreviatura	Término
RCF	Rolling Contact Fatigue
FIM	Friction Induced Martensite
WEL	White Etching Layers
LOM	Microscopio óptico
SEM	Microscopio electrónico de barrido
HRV	Industrias HRV S.A.
GTS	Grupo de Tribología y Superficies
COT	Coefficiente de tracción
LV-LL	Baja velocidad – Baja carga
LV-HL	Baja Velocidad – Alta carga
HV-LL	Alta velocidad – Baja carga
HV-HL	Alta velocidad – Alta carga
CD	Capa deformada
CB	Capa Blanca

Introducción

Uno de los principales retos de la tribología, específicamente en el sector industrial, es el tema de fricción entre elementos mecánicos deslizantes, debido a que, el contacto constante entre éstos conlleva a un mayor desgaste de las piezas, por ende, a un consumo elevado de potencia y energía para realizar una misma operación. Alrededor de 100 millones de terajulios se consumen anualmente en el mundo para vencer los problemas de fricción; este número es enorme, ya que es un quinto de la energía producida a nivel mundial [1]. Los mayores sectores que padecen este fenómeno son el sector industrial (29%) y el de transporte (27%) [1], los cuales invierten grandes sumas de dinero para mitigar estos efectos. Rusia, por ejemplo, gasta entre 5 y 10 veces más de su presupuesto para la reparación y mantenimiento de máquinas por fricción, que para fabricar máquinas nuevas [2].

Desde la llegada de los ferrocarriles, los materiales de los rieles han sido continuamente exigidos, como consecuencia directa del incremento de esfuerzos provenientes de trenes con mayores velocidades y capacidades de carga; esto genera un desgaste prematuro en los componentes y afecta de manera directa la seguridad de los sistemas; además, aumentando los costos de mantenimiento asociados a los mismos.

Los aceros modernos utilizados para la fabricación de rieles presentan estructuras perlíticas que ofrecen una notable resistencia al desgaste. Esto se logra mediante el refinamiento del grano en la microestructura y la minimización de inclusiones no metálicas en el material. Sin embargo, los avances adicionales dentro de estos parámetros parecen estar alcanzando un límite, lo que ha dirigido la atención hacia la exploración de otros tipos de microestructuras que puedan ofrecer un rendimiento superior en términos de resistencia al desgaste [3-4].

El desgaste en sistemas ferroviarios ha sido estudiado por años, abordando problemas como: adhesión, fatiga superficial y desgaste ondulatorio entre otros. Para estos sistemas, los problemas del contacto entre la rueda y el riel dependen del tramo de vía analizado. Estos tipos

de sistemas promueven mecanismos de desgaste característicos y en ocasiones debido a la severidad de estos, generan daños catastróficos en los elementos en contacto. Con el fin de mantener la seguridad de los sistemas ferroviarios y controlar las condiciones de operación del sistema, se realiza un proceso de esmerilado en los rieles [7]

El desgaste en los rieles se incrementa con el tiempo y su tasa de crecimiento está ligada principalmente a las variaciones de carga de tráfico. Por lo tanto, el aumento de los defectos superficiales en la zona de rodadura del riel, debe vigilarse durante varios años para determinar su curva de evolución. La aparición de defectos y el desgaste de rieles tienen consecuencias negativas, que se pueden sintetizar en los siguientes aspectos:

- Aumento de vibraciones y emisión de ruidos de rodadura/deslizamiento, que repercuten negativamente en los usuarios y en los vecinos del ferrocarril.
- Necesidad prematura de la renovación de la infraestructura de la vía, en particular el reemplazo de los rieles desgastados que constituye una operación difícil de realizar y de alto costo.
- Aumento creciente de los trabajos de mantenimiento de la vía, tanto de mano de obra como de equipamiento, por ejemplo, tareas de bateo y saneamiento del balasto.
- Perjuicios en la explotación de la línea, por ejemplo, un mayor consumo energético como consecuencia de la existencia de desaceleraciones en la marcha de los trenes y la necesidad de un torneado de las ruedas con más frecuencia.
- Aumento de las exigencias mecánicas y una disminución de la disponibilidad de la infraestructura, ya que los rieles son propensos al desgaste y al fenómeno de fatiga [5].

El desgaste en estos sistemas es un serio problema para la competitividad de la industria del transporte. En consecuencia, resulta necesaria la medición de los perfiles longitudinales y transversales de los rieles para determinar la necesidad de realizar operaciones de esmerilado; además, es necesario el examen mediante ultrasonido con el fin de detectar defectos internos.

El esmerilado ferroviario es una operación importante para mantener la infraestructura ferroviaria. La operación de esmerilado de rieles ayuda a mejorar la vida útil del riel al eliminar defectos y mantener el perfil del riel [6]; pero mediante la planificación de los intervalos entre esmerilados, una empresa de transporte podría ahorrar alrededor de 2660 US \$ / km por año

[7]. Para una línea de 30 km como la del Metro de Medellín en Colombia, el ahorro puede alcanzar hasta US \$ 80,000 por año. El mantenimiento sistemático de los rieles permite un mejor reparto de las cargas actuantes, mejora las condiciones para la marcha de los vehículos y prolonga la duración de la vida útil de los rieles [8].

El proceso de esmerilado es indispensable para mantener el sistema de rieles en óptimas condiciones de funcionamiento y por ende, es indispensable que este procedimiento no adicione otros defectos a la vía como lo es la capa blanca. Durante el esmerilado se logra la eliminación de una capa superficial altamente deformada de material y la corrección de defectos; sin embargo, investigaciones previas han mostrado que el esmerilado puede producir una capa de martensita o “capa blanca” en la superficie [9], [10], que podría formarse mecánicamente por una alta deformación plástica [78] que podría atribuirse a la disolución de la cementita debido a severos esfuerzos de corte y compresión, durante una intensa deformación cizalladora, debido a la interacción carril-rueda [72], y/o térmicamente por la energía inducida transferida a la cabeza del riel.

La energía térmica a menudo es inducida por las ruedas abrasivas durante la operación de esmerilado [11], [73], pero también puede proporcionarse por el deslizamiento dado entre las ruedas y el riel durante el frenado y la aceleración de los vehículos ferroviarios [12] [74]. Dicha capa puede inducir agrietamiento prematuro de la cabeza del riel, por ende, se requiere estudiar el efecto del esmerilado en la aparición de capa blanca en los rieles utilizados en sistemas de transporte. Para el caso particular del Metro de Medellín, se ha observado la aparición de defectos asociados a la capa blanca, lo cual tiene un impacto importante en la vida útil de los rieles. De acuerdo con lo anterior, este es un tema de interés industrial y científico debido al impacto que tiene en sistemas de transporte crecientes, como lo es el Metro de Medellín.

Una tendencia mundial para enfrentar dichos problemas es utilizar procesos de esmerilado tanto en la rueda como en el riel [7]. Sin embargo, pocos estudios relacionan los efectos del esmerilado frente a la aparición de capa blanca y muchas decisiones tribológicas son tomadas con base a sugerencias técnicas dadas por los fabricantes de sistemas comerciales [7]. Dichos sistemas se basan en condiciones estándar de otros países; la mayoría del hemisferio norte (E.U. y Europa). Al parecer aún no hay aproximaciones para países tropicales como Colombia,

con menores y distintas exigencias de operación, además con diferentes condiciones atmosféricas (mayor temperatura y humedad).

Esta propuesta de trabajo se refiere a la influencia del esmerilado en la aparición de capa blanca en los rieles, así como su respuesta sobre el comportamiento al desgaste y el daño de las superficies en contacto.

Los resultados de este trabajo fueron obtenidos en condiciones de laboratorio controladas que simulan el contacto rueda-riel. El capítulo 1 hace referencia a los alcances del proyecto, también se detalla los procesos necesarios para la realización del trabajo. Seguidamente, en el capítulo 2 se presenta el marco conceptual con temas útiles para la disertación sobre el trabajo realizado, como lo son: las nociones básicas de la tribología de sistemas rueda-riel, las operaciones de mantenimiento, esmerilado de rieles, así como los defectos típicos encontrados en los rieles, mecanismos de daño asociados y el estudio de las posibles causas de formación de capa blanca en rieles. El capítulo 3 reporta la metodología y los procedimientos necesarios para el desarrollo del trabajo, este capítulo se divide en tres secciones. La primera se centra en la obtención y preparación de muestras, así como la caracterización química y microestructural de las mismas (sección 3.1). Seguida del diseño de las pruebas de esmerilado en laboratorio y caracterización de los ensayos obtenidos (sección 3.2), por último, el diseño de las pruebas tribológicas en el laboratorio y caracterización de los ensayos obtenidos (sección 3.3). El capítulo 4 hace un compendio de los resultados obtenidos con las pruebas de esmerilado, como también de los ensayos tribológicos, se discute el efecto de las condiciones de esmerilado sobre la formación de la capa blanca y el efecto de la presencia de dicha capa sobre la respuesta tribológica, además se realizan algunos análisis de mecanismos de desgaste. Finalmente, en el capítulo 5, se presentan las conclusiones del trabajo, las perspectivas y trabajos futuros referentes al tema de estudio.

1. Capítulo 1: OBJETIVOS

1.1 Objetivo general

- Estudiar los efectos del proceso de esmerilado sobre la aparición de capa blanca en rieles R400HT en el sistema rueda-riel del Metro de Medellín.

1.2 Objetivos específicos

- Desarrollar un diseño de experimentos que permita evaluar el efecto de algunas variables del proceso de esmerilado sobre la aparición de capa blanca en rieles R400HT.
- Caracterizar la microestructura de los materiales que serán objeto de estudio en los ensayos tribológicos.
- Evaluar en laboratorio, usando máquina disco-disco bajo condiciones representativas de funcionamiento del Metro de Medellín, la respuesta tribológica de muestras esmeriladas.

2. Capítulo 2: MARCO CONCEPTUAL

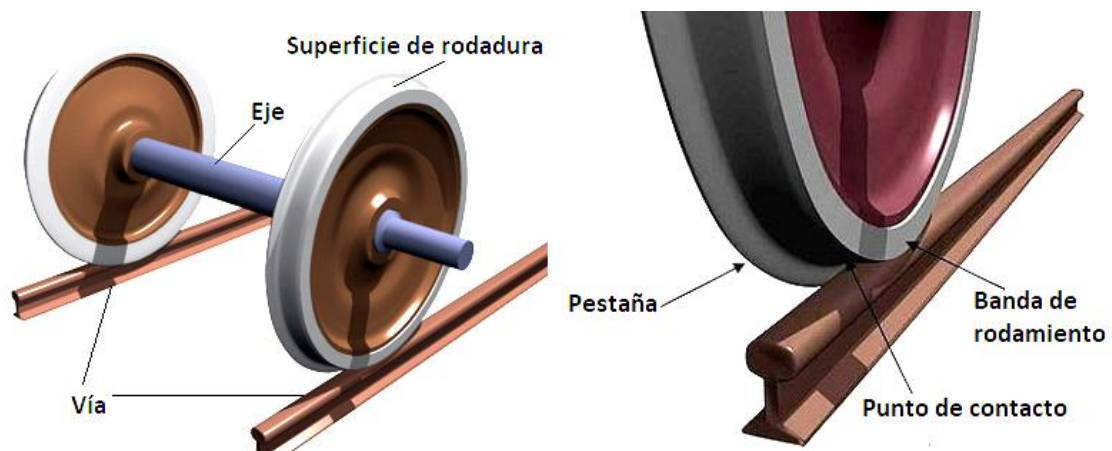
2.1 Nociones básicas del contacto rueda-riel

2.1.1 Contacto rueda-riel

El contacto rueda-riel es un contacto metal-metal donde la superficie del riel tiene una mayor dureza que la rueda, para incrementar su vida útil, ya que los procesos de mantenimiento y recambio de rieles involucran mayor trabajo que sus equivalentes en ruedas.

Las ruedas ferroviarias se apoyan sobre los rieles sin algún tipo de guía, excepto en algunas ocasiones donde las pestañas tocan el riel. Contrario a lo que se cree, las pestañas no deben tocar los rieles, pues estas son sólo un último recurso para evitar que las ruedas se descarrilen, siendo esto una característica que brinda seguridad. Las ruedas ferroviarias son cónicas y la cabeza del riel presenta una ligera curvatura en su geometría tal y como se muestra en la **Figura 2- 1**. El grado de conicidad es fijado por la empresa ferroviaria y varía de un lugar a otro.

Figura 2-1: Principio general del contacto rueda-riel [55].



Un principio básico del contacto rueda-riel en vía recta es que las bridas o pestañas no suelen hacer contacto con los rieles a diferencia del paso sobre la vía curva; la rueda interior utiliza el borde externo durante el paso por la curva. La pestaña de la rueda externa va a tocar el riel cuando el tren tome la curva, por lo tanto, no existe un contacto simétrico en ambos lados. Esto a menudo causa un chillido y como es natural también un mayor desgaste que cuando el tren tiene un recorrido por una vía recta. Ver **Figura 2- 2** y **Figura 2- 3** [12].

Figura 2-2: Contacto rueda riel en vía recta y vía curva [56].

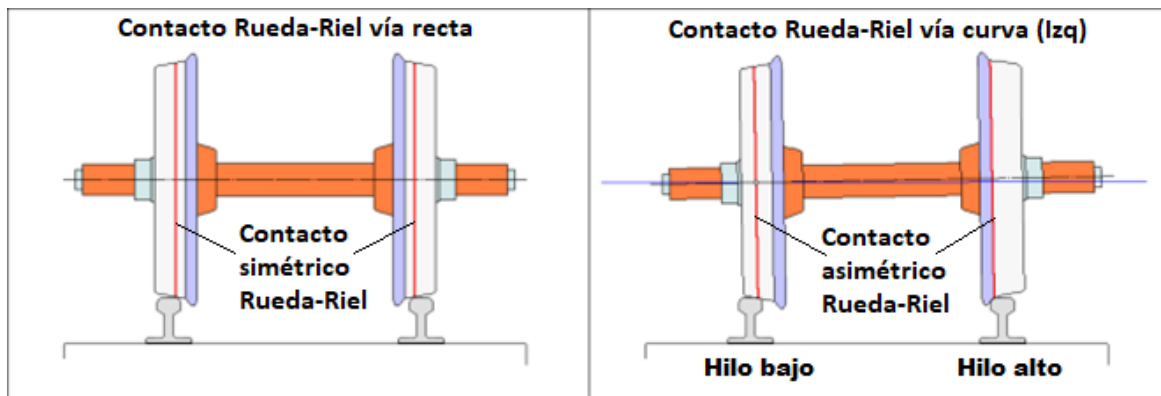
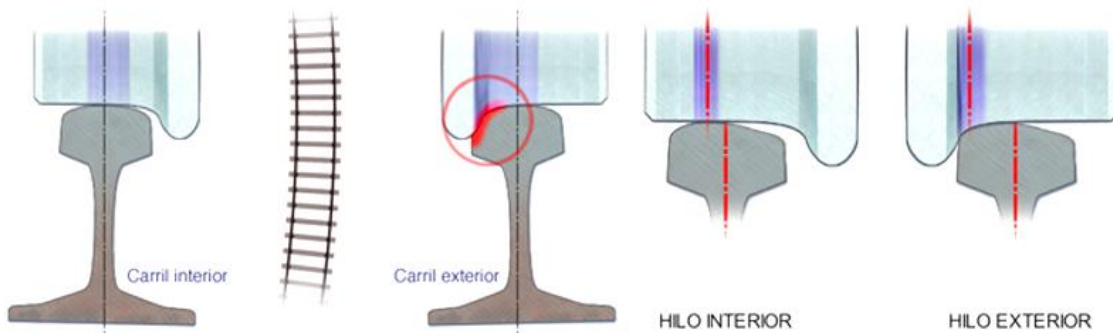
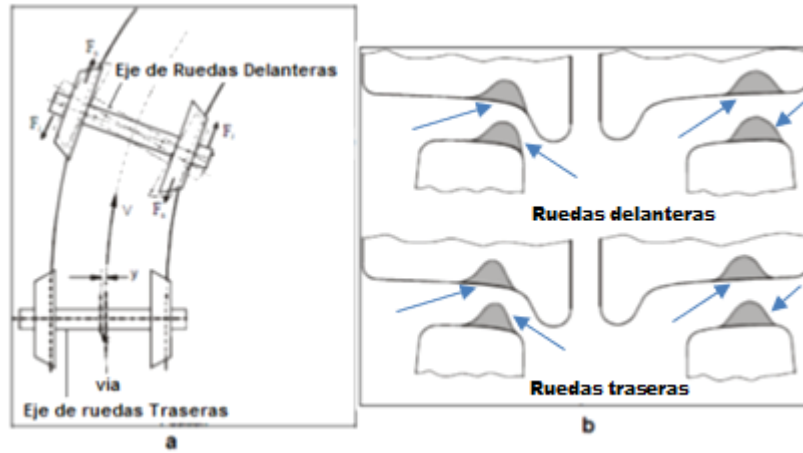


Figura 2-3: Descripción del contacto rueda-riel en vía curva izquierda [13].



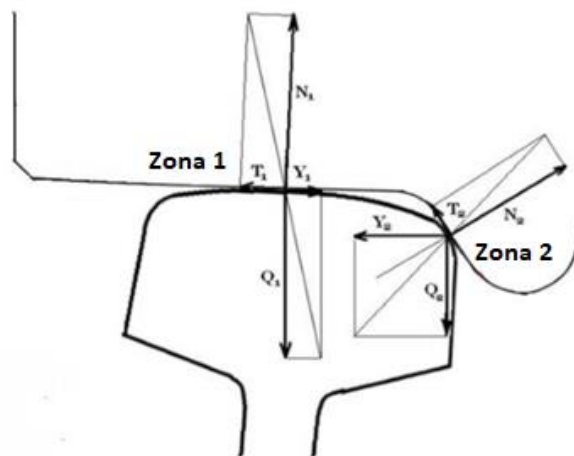
Cuando el tren toma una curva la rueda exterior tiene una mayor distancia que recorrer que la rueda interior, para compensar esto, el juego de ruedas se mueve lateralmente en relación con la vía de manera que el radio mayor de la rueda es usado en el carril exterior de la curva, La distribución de esfuerzos se indican con las flechas azules, ver **Figura 2- 4**.

Figura 2-4: Esfuerzo de contacto conjunto rueda-riel al girar en una curva a) posición de los ejes trasero y delantero. b) Esfuerzos de contacto en eje delantero y trasero [14].



La **Figura 2- 5** describe el contacto entre una sección del riel y una sección de una rueda de tren. En este caso, se observa un momento en el que además de existir contacto en la zona de rodadura, zona 1, existe contacto en la zona de la pestaña o brida, zona 2 que es la parte de la rueda que limita el desplazamiento lateral del tren sobre la vía. En la imagen, se pueden apreciar también los esfuerzos producidos en cada punto de contacto [15].

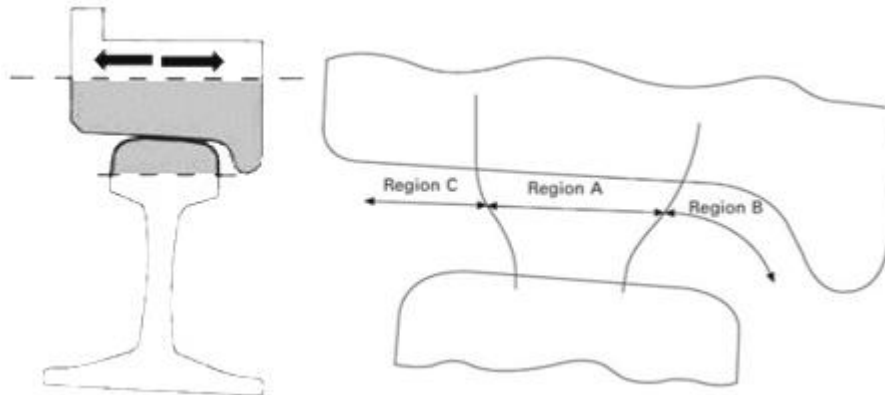
Figura 2-5: Contacto entre una sección de la rueda de un tren y el riel parte externa [15].



La naturaleza del contacto, las fuerzas en la intercara rueda-riel y la cinemática del vehículo están fuertemente influenciadas por la geometría de las ruedas y los rieles, en particular la geometría de la sección transversal del riel y la sección radial de la rueda; las cuales presentan un desplazamiento lateral, ver flechas negras. En esta interacción se presentan tres zonas

funcionales como se muestra en la **Figura 2- 6**, donde el parche de contacto y los esfuerzos de contacto varían considerablemente debido a la diferencia de curvatura de cada región. Además, las estrategias de lubricación son diferentes en cada caso [16] [17].

Figura 2-6: Regiones de contacto en la intercara rueda-riel [16].



Durante el movimiento del tren la posición del juego de ruedas en relación con la vía presenta diferentes combinaciones de zonas de contacto durante la interacción de la rueda con la vía. Las zonas funcionales en el contacto rueda riel se describen a continuación:

Región A. Banda de rodadura de la rueda-cabeza del riel: corresponde al espacio entre la región central de la corona del riel y la banda de rodadura de la rueda, es el tipo de contacto más frecuente cuando los trenes se desplazan en secciones rectas de la pista o en curvas suaves. Los esfuerzos de contacto en esta región son los más bajos debido a que se establece una mayor superficie de contacto entre los dos componentes.

Región B. Pestaña de la rueda-esquina del riel: el área de contacto en esta región es mucho menor que en la región A y frecuentemente los esfuerzos de contacto son más severos y las tasas de desgaste son mucho más altas. Este tipo de contacto se presenta en curvas muy cerradas.

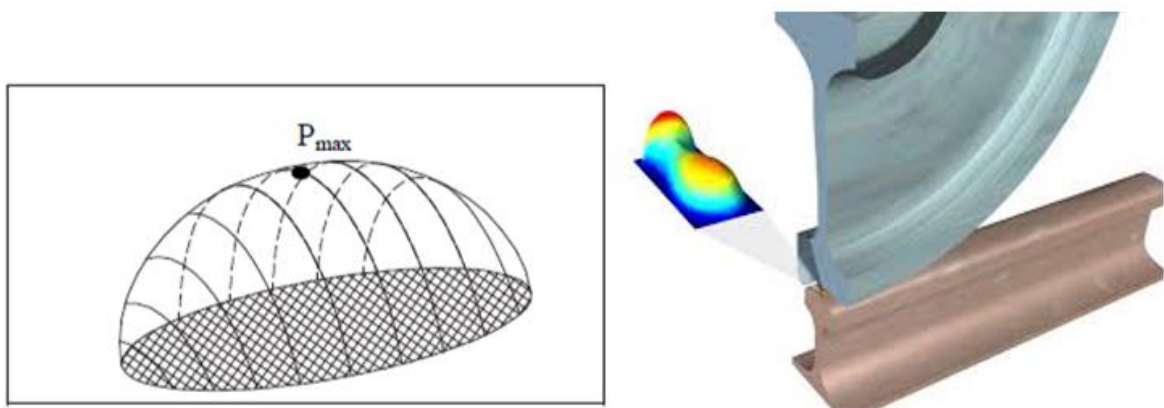
Región C. Contacto entre lados libres de la rueda y el riel: este tipo de contacto es menos probable que ocurra, y si se presenta se generan altos esfuerzos de contacto, lo que conducirá a fenómenos de desgaste no deseados, causando direcciones incorrectas en el contacto de las ruedas sobre la vía.

El tamaño y geometría del parche de contacto pueden ser calculados a partir de la fuerza normal, la geometría local de la rueda y el riel (descritas por sus respectivos radios de curvatura en la dirección de rodadura y su sección transversal) y las propiedades del material. [18].

Como el punto de contacto entre rueda y riel en sistemas ferroviarios no se presenta de manera uniforme sobre toda la rueda o el perfil de riel, la forma de los perfiles cambia con el tiempo debido al desgaste (proceso en gran parte generado por las cargas y la condición de deslizamiento durante el contacto). Con el propósito de predecir cómo pueden evolucionar los perfiles, se requiere alcanzar una adecuada comprensión de los esfuerzos de contacto normales, tangenciales y de tracción superficial, los cuales, entre otros, son los responsables de la aparición de fatiga por contacto de rodadura o RCF (por su nombre en inglés: *Rolling Contact Fatigue*) de los componentes ferroviarios.

En un sistema ferroviario, dos cuerpos que se tocan en una región pequeña, específicamente en las superficies de rodadura de la rueda y del riel, presentan una deformación en el área de contacto, la cual puede ser definida mediante el radio de la curvatura del punto de contacto y la carga aplicada, con lo cual se obtiene un área de contacto elíptica ver **Figura 2- 7** con semiejes mayores a lo largo de los ejes longitudinales del riel y donde la presión máxima estaría definida por la **Ecuación 2.1** [19].

Figura 2-7: Distribución de esfuerzos normales de Hertz en el área de contacto [19].



$$P = \sqrt[3]{\frac{3FE^2}{2\pi^3 R_e^2 (1-V^2)^2}}$$

Ecuación 2.1

Donde P es la carga normal, E y ν son el módulo de Young y la relación de Poisson respectivamente (asumiendo que rueda y riel son el mismo material), y R es el radio equivalente que está dado por la **Ecuación 2.2**.

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

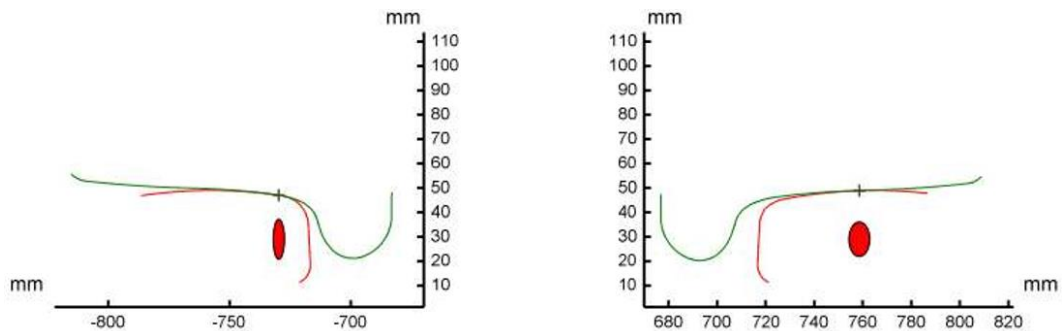
Ecuación 2.2

Se tiene que R1 y R2 son el radio de contacto del riel y la rueda en la banda de rodadura, este enfoque, sin embargo, debe realizarse bajo las siguientes suposiciones: 1) que las superficies en contacto son lisas y no hay efecto de las asperezas, 2) que el material tiene una respuesta elástico-lineal, 3) que se tiene un contacto sin fricción y 4) que las dimensiones del área de contacto deben ser pequeñas en comparación con los radios de curvatura de los cuerpos en contacto. Para un tren urbano la presión máxima de Hertz puede estar en un rango de 600 MPa entre la banda de rodadura de la rueda y la cabeza del riel, y hasta de 2700 MPa en la zona de contacto de la pestaña de la rueda con la esquina del riel [3].

Durante el movimiento de los trenes la posición de contacto de la rueda sobre el riel cambia constantemente. El área de contacto que es típicamente de 1 cm², varía continuamente a medida que el tren avanza por una sección de la pista. La posición exacta depende de los perfiles de la rueda y del riel; así como del grado de curvatura de la vía. En recta, es muy probable que la banda de rodadura del riel y la rueda estén en contacto, mientras en curva se presenta el contacto con la pestaña de la rueda y la cara interna del riel. En la **Figura 2- 4** se muestra cómo es la posición de contacto y la variación del esfuerzo en el eje delantero y en el eje trasero para las ruedas que entran en contacto con el riel.

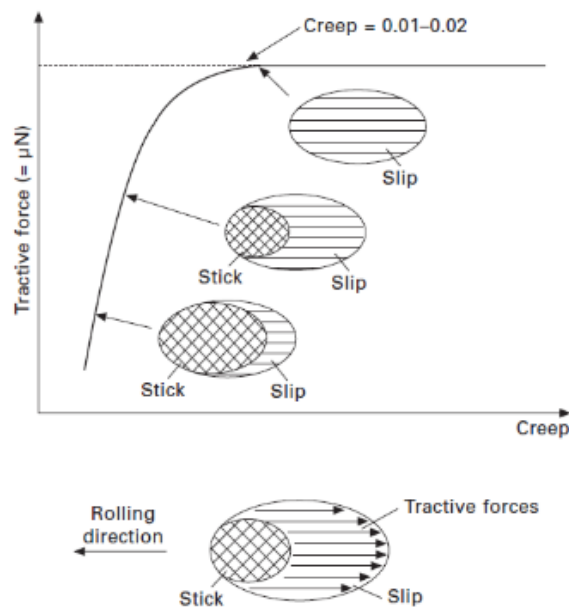
La **Figura 2- 8** muestra los parches de contacto para hilo alto y bajo respectivamente, simulados en Vampire® a partir de las condiciones dinámicas del vehículo y la vía del Metro de Medellín. La mayor deformación se da en el centro de la superficie donde se concentra el mayor esfuerzo evidenciando un perfil elíptico típico de superficies en movimiento relativo con contacto rodante deslizando [20].

Figura 2-8: Parche de contacto rueda-riel condiciones específicas del Metro de Medellín [21].



Cuando se presenta una fuerza tangencial el parche de contacto es dividido en dos zonas, una de adhesión y otra con micro deslizamientos, donde la relación entre estas zonas depende de la magnitud de la fuerza tangencial. A valores más altos de la fuerza tangencial mayor es la zona de deslizamiento y cuando ésta ocupa todo el parche de contacto se encuentra un valor de coeficiente de fricción constante. Este tipo de curva se muestra en la **Figura 2- 9**, también conocida como curva de deslizamiento, la cual representa la evolución de la fuerza de fricción. [22].

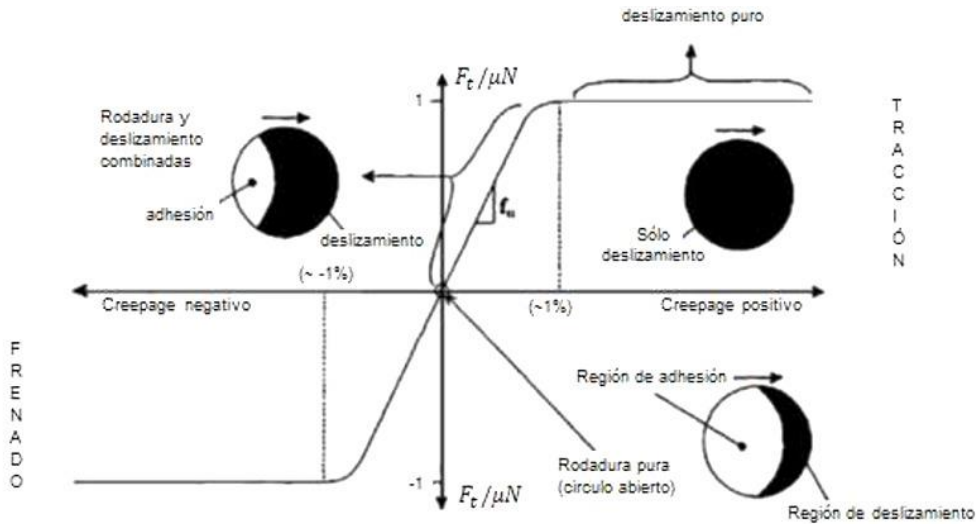
Figura 2-9: Coeficiente de fricción de acuerdo con la evolución de las zonas de adhesión y deslizamiento [23].



En el contacto rueda-riel, los micro deslizamientos generados en la intercara denominados Creepage generan pérdidas de energía en calentamiento por fricción en la intercara: en hilo alto donde el contacto es en el flanco, región B en la **Figura 2- 6**, la temperatura puede exceder los 800°C con velocidades de deslizamiento mayores a 0.9 m/s (fuente de ruido en las curvas) y presión de contacto superior a 2.7 GPa, mientras que en hilo bajo la temperatura puede alcanzar los 400°C con velocidades de deslizamiento inferiores a 0.1 m/s y la presión de contacto siempre menor que 1.5 GPa [19]. Ocorre además una distribución diferente de las zonas de adhesión y deslizamiento durante el frenado y la tracción en operación, las cuales como se muestra en la **Figura 2- 10** son opuestas entre sí.

Es decir, en operaciones de aceleración bajo condiciones de deslizamiento la zona de adhesión va disminuyendo por efecto del Creepage presente en la intercara hasta alcanzar la totalidad del contacto, mientras que en operaciones de frenado se presenta un comportamiento negativo o Creepage negativo, ya que va disminuyendo nuevamente hasta alcanzar una adhesión total al detenerse el vehículo.

Figura 2-10: Curva de Creep, representación de toda la curva de tracción con zonas de adhesión y deslizamiento [24].



El eje vertical de la curva de Creep de la **Figura 2- 10** muestra que los esfuerzos tangenciales tienen una relación directa con el coeficiente de fricción y la carga del vehículo, los cuales se presentan normalizados para representar el comportamiento del fenómeno. Se observa, además, que esta figura es susceptible a variaciones de presión en el contacto y las condiciones del par rueda-riel (acabados superficiales, presencia de un tercer cuerpo en la intercara como

un sólido y/o líquido, estado de la vía, entre otros), por lo que a través de esta curva es posible obtener información para mantenimiento preventivo del par con un control adecuado de las variables de operación involucradas, optimizando el proceso de tracción-frenado y las pérdidas energéticas asociadas.

2.1.2 Mecanismos de falla en el sistema rueda-riel

En la literatura técnica se encuentran diferentes descripciones y clasificaciones acerca de los fenómenos de desgaste relacionados con el sistema rueda-riel, sin embargo, estos mecanismos de falla pueden ser clasificados dentro de tres grupos; desgaste adhesivo, fatiga superficial y fatiga sub-superficial. Estos fenómenos pueden ocurrir simultáneamente en el mismo componente y están en permanente competencia uno contra el otro. Los mecanismos de desgaste encontrados dependen de las condiciones de funcionamiento del sistema ferroviario [25].

El problema es complejo y requiere diferentes habilidades para estudiar todos los parámetros que influyen en los fenómenos de desgaste, como lo son: la distribución de los esfuerzos en la superficie de contacto bajo diferentes condiciones de trabajo, el deslizamiento, la distribución de esfuerzos bajo la sub-superficie, los cambios térmicos en el material, el efecto de las grietas y defectos internos, las propiedades del material en términos de desgaste, la resistencia a la fatiga y la influencia de la textura superficial, entre otros.

- **Fatiga de contacto por rodadura (RCF)**

Uno de los mecanismos de falla más comunes se debe principalmente a la fatiga de contacto por rodadura. Este mecanismo está relacionado con la variación cíclica de un estado cerrado de esfuerzos en la zona de contacto, estos están localizados en el borde de la rueda y como consecuencia pueden afectar la seguridad del vehículo. En la fatiga de contacto por rodadura pueden ocurrir diferentes sub-mecanismos de falla, entre estos el descascaramiento debido al origen de grietas superficiales y sub-superficiales, siendo el descascaramiento profundo el más peligroso.

Para el caso de rodadura pura, cuando un material en la vía es sometido a la acción de una carga cíclica por la rueda del tren, si la carga se incrementa hasta el límite elástico, los esfuerzos normales y cortantes se incrementan, pero permanecen dentro del campo de deformación

elástica. Cuando la carga se incrementa por encima del límite elástico los esfuerzos de contacto exceden el campo de deformación elástica y el material del riel se deforma plásticamente.

Al material ser descargado surgen esfuerzos residuales, estos son de naturaleza protectora y reducen la tendencia al flujo plástico en los siguientes pasos de la rueda, en esta interacción se produce un efecto de endurecimiento por deformación y por lo tanto, el material del riel adquiere una capacidad de soportar cargas más altas que el límite elástico inicial del material. Este es el proceso de “*Shakedown limit*” o amortiguamiento, e instaura un estado estable de deformación puramente elástico y es la base para el diseño de vías ferroviarias y rodamientos [26].

La nucleación de la grieta puede ocurrir de dos diferentes maneras, bajo el “*Shakedown limit*” o excediendo la condición en que éste es producido por acumulación cíclica de deformación plástica; esta condición depende de las propiedades del material, de las condiciones de trabajo y usualmente involucra una amplia región. En ausencia de flujo plástico, esto puede ser debido a una fractura frágil localizada alrededor de defectos inherentes al material, los cuales actúan como concentradores de esfuerzos [26].

La predicción de la nucleación de la grieta por flujo plástico puede realizarse mediante un análisis básico no lineal de elementos finitos. Ellos son complejos y necesitan ser validados por medio de algunos ensayos experimentales comparativos reproduciendo las condiciones reales de servicio de la rueda y el riel. Además, la relación entre las condiciones superficiales y la vida de la rueda y el riel podría ayudar a establecer intervalos de inspección para decidir sobre el esmerilado de ambos componentes [27].

Cuando una grieta inicia podría propagarse o no, las condiciones de propagación dependen de la intensidad de esfuerzos en la punta de la grieta, de la amplitud del factor K, del correspondiente valor límite de variación durante un ciclo de carga y del material.

- **Desgaste asociado al deslizamiento**

El movimiento relativo entre las superficies involucra la aplicación de una fuerza tangencial en el contacto, debido a la acción de conducir o frenar un cilindro (o rueda), lo cual distorsiona la distribución de esfuerzos sobre y debajo la superficie. Así, la facilidad de crear una grieta en el material es una función de la fuerza de fricción aplicada en el contacto entre las superficies.

La distorsión en la distribución de esfuerzos es caracterizada por expandir dichos esfuerzos más allá de la zona de contacto. Por otro lado, el esfuerzo cortante máximo bajo la superficie se incrementa a medida que se hace mayor la fuerza de fricción durante la rodadura, lo cual sucede con el aumento del porcentaje de deslizamiento [27].

Por otra parte, con el aumento en la fuerza de fricción el esfuerzo de corte máximo pasa de ser aplicado bajo la superficie a ser desplegado en la superficie. Johnson [28] estableció un valor límite de 0.3 para el coeficiente de fricción, por encima del cual el esfuerzo de cizalladura máximo comienza a ser ejercido en la superficie. Suárez [29] definió que los incrementos en los esfuerzos máximos son más marcados para valores del coeficiente de fricción superiores a 0.4; por lo tanto, a partir de este valor, se puede decir que el efecto de la fricción comienza a ser relevante, a la hora de determinar la carga máxima que puede soportar el cuerpo sin que su material presente un flujo plástico.

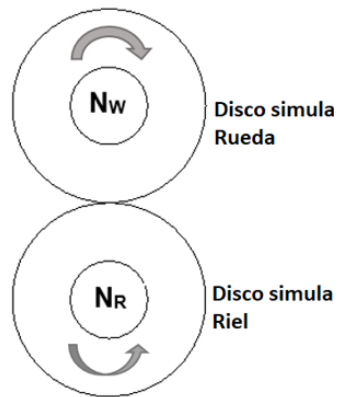
Dada la importancia que toma el deslizamiento sobre los esfuerzos creados durante la rodadura, es conveniente conocer el porcentaje de deslizamiento desarrollado en un contacto rodante determinado.

Para hallar el porcentaje de deslizamiento que se impone en un contacto rodante, es preciso definir la geometría del sistema. En el caso del contacto entre dos discos, la **Ecuación 2.3** muestra como calcular el porcentaje de deslizamiento; las variables correspondientes se explican en la **Figura 2- 11**. Lo anterior es relevante en la simulación del contacto rueda-riel, donde dos discos ruedan sometidos a una carga y con un porcentaje de deslizamiento determinados.

$$Deslizamiento(\%) = 200 \cdot \frac{(R_R N_R - R_W N_W)}{R_R N_R + R_W N_W} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

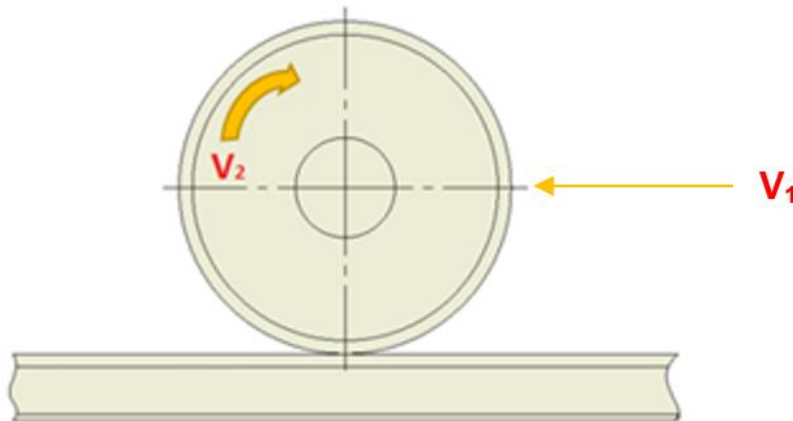
Donde R_R y R_W son los radios de las probetas de los materiales que simulan el riel y la rueda respectivamente, N_R y N_W son las revoluciones (rpm) a las que giran ambas probetas. Un porcentaje de deslizamiento negativo significa que la probeta que simula el material de la rueda está ejerciendo una fuerza de tracción sobre la probeta que simula el material del riel.

Figura 2-11: Esquema para hallar el porcentaje de deslizamiento entre dos discos que ruedan a diferentes velocidades tangenciales [30].



Para el caso rueda-riel, en la **Figura 2- 12** y en la **Ecuación 2.4** se muestra como hallar el porcentaje que desliza la rueda sobre el riel.

Figura 2-12: Deslizamiento entre la rueda y el riel debido a la diferencia en las velocidades V_1 y V_2 [28].



$$\% \text{Deslizamiento}_{\text{Rueda-riel}} = \frac{V_2 - V_1}{V_1} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

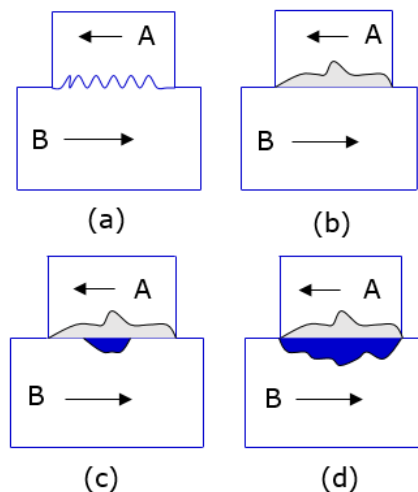
Con la ecuación anterior es posible hallar el deslizamiento longitudinal de la rueda sobre el riel. La velocidad (V_1) de la **Figura 2- 12**, es la velocidad lineal del vehículo que se desplaza sobre el riel o, mejor dicho, la velocidad del centro de la rueda. La velocidad (V_2) es calculada en función de $w \cdot R$.

El principal mecanismo presente en un proceso de deslizamiento entre superficies es desgaste por adhesión. En la aplicación rueda-riel, hay varias situaciones donde se produce tal deslizamiento; unas de las más relevantes son el deslizamiento entre las pestañas de la rueda y el riel, así como el deslizamiento durante el frenado. En estas situaciones es importante establecer las propiedades que debe tener el material y así disminuir el daño en los componentes del sistema.

La adhesión ocurre cuando parte de los átomos en las asperezas de una de las superficies establece enlaces primarios con átomos de la otra. Esto es impulsado por la disminución de la energía libre superficial de los cuerpos en contacto, mediante la eliminación de dos superficies y la creación de una sola intercara [31]. Luego, con el avance del deslizamiento, la fractura se produce en la intercara original o en capas atómicas de ambas subsuperficies, dependiendo de las resistencias de estas regiones; tales resistencias van a estar influenciadas por algún tipo de defecto que presenten. Este fenómeno es representado en la **Figura 2- 13**.

La fractura por una región diferente a la intercara original se podría explicar por la mayor energía que poseían las superficies en el momento de su unión, por lo que luego es difícil separarlas a pesar de que presenten una menor área de sección.

Figura 2-13: Pérdida de masa por adhesión: a) Ruptura por la intercara. b) Ruptura por el material más suave (A). c) Ruptura por el material más suave (A) con una parte del material más duro (B). d) Ruptura por ambos materiales [32].



Cuando uno de los materiales involucrados en el deslizamiento es más blando que su par, el primero es el que usualmente se deforma, sufre la fractura y pierde masa; sin embargo, si el

material duro presenta zonas blandas localmente, éste va a ser finalmente el fracturado (**Figura 2- 13 c y d**). Adicionalmente, existen otras teorías que buscan explicar la adhesión por medio del bloqueo mecánico entre las asperezas, la difusión electrónica, la adsorción, y la microfatiga por la continua formación y rompimiento de uniones de adhesión [32].

Se ha planteado que cuando el plano de la junta de adhesión no es paralelo a la dirección de deslizamiento es más probable la remoción de material; así, si la rugosidad aumenta conforme avanza el deslizamiento entonces el proceso de remoción de material se incrementa. Sin embargo, se ha encontrado que el desgaste no necesariamente disminuye con superficies lisas y en otros casos se ha observado que la tasa de este mecanismo de desgaste adhesivo es independiente de la rugosidad [31].

El desgaste en los rieles se incrementa con el tiempo a una tasa que está ligada a las variaciones de carga, de manera que el aumento de los defectos de superficie en la zona de rodadura del riel debe vigilarse durante varios años para determinar su curva de evolución. Los defectos y desgastes en el riel traen consecuencias negativas, que se pueden sintetizar en los siguientes aspectos:

- Aumento de vibraciones y de emisión de ruidos de rodadura, que repercuten negativamente en los usuarios y en los vecinos del sistema ferroviario.
- Aumento creciente de los trabajos de mantenimiento de la vía, tanto de mano de obra como de equipamiento, por ejemplo, tareas de bateo y saneamiento del balasto.
- Perjuicios en la explotación de la línea, por ejemplo, un mayor consumo energético como consecuencia de la existencia de desaceleraciones en la marcha de los trenes y la necesidad de un torneado de las ruedas con más frecuencia.
- Disminución de la disponibilidad de la infraestructura para la explotación de línea ferroviaria.

2.2 Microestructura y defectos típicos en rieles

2.2.1 Microestructura en aceros para rieles

La resistencia de un tren para rodar tiene varios componentes, incluyendo resistencia a la aceleración, fuerzas del viento, resistencia mecánica de los componentes, y resistencia en el contacto rueda-riel. Solo esta última condición, la resistencia en el contacto es la que tiene una fuerte influencia la selección de los materiales de riel y rueda.

Varios factores influyen este contacto. Primero, durante condiciones de rodadura las superficies del riel y la rueda son deformadas elásticamente, proceso durante el cual puede ocurrir movimiento relativo entre las mismas. Segundo, la energía puede ser disipada por la deformación plástica, y tercero, fenómenos de adhesión pueden disipar también energía.

Alrededor del mundo ferroviario, la mayoría de los componentes de rueda y riel son fabricados en aceros con composiciones de carbono-manganeso y aceros perlíticos con estructuras laminares, ver **Tabla 2- 1**. De manera general, las ruedas para vehículos de pasajeros tienden a tener bajos contenidos de carbono y durezas tan altas como los ejes de carga de los vehículos.

Tabla 2-1: Composición química y durezas típicas de ruedas y rieles en vehículos de carga y pasajeros [34].

COMPOSICION QUIMICA Y DUREZAS TIPICAS EN RUEDAS Y RIELES DE CARGA Y PASAJEROS						
		C (Wt%)	Mn (Wt%)	S (Wt%)	P (Wt%)	Durezas (Brinell)
RIELES	Endurecido	0,75	0,90	0,02	0,02	290
	Estándar	0,75	0,90	0,02	0,02	370
RUEDAS-PASAJEROS	Endurecido	0,50	0,80	0,04 máx.	0,04 máx.	260
	Estándar	0,55	0,80	0,04 máx.	0,04 máx.	270
RUEDAS -CARGA	Endurecido	0,62	0,72	0,05 máx.	0,05 máx.	300
	Estándar	0,72	0,72	0,05 máx.	0,05 máx.	340

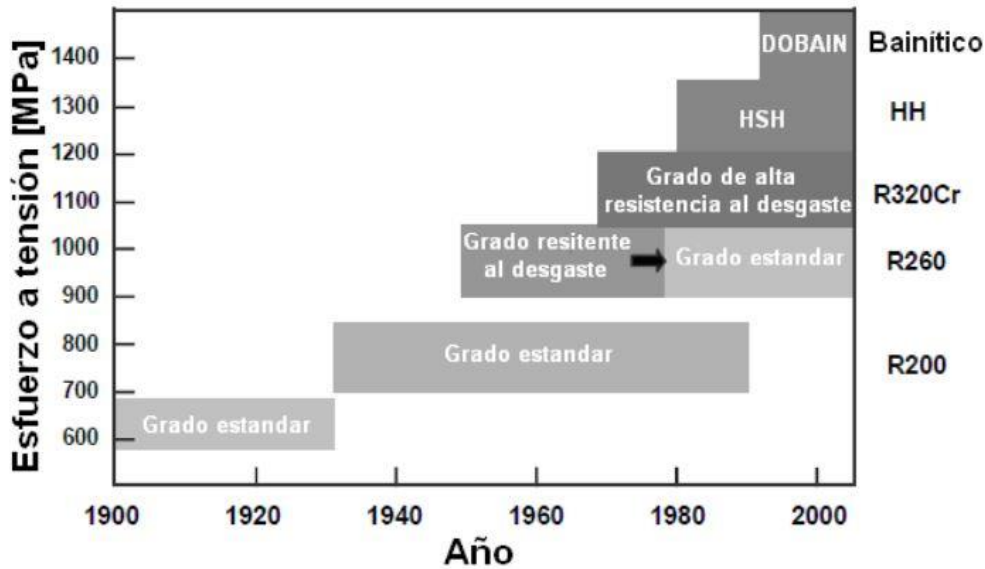
Por otra parte, los rieles son aceros que tienen alrededor de 300 HB de dureza, y bajo esta condición son típicamente usados para rieles en pistas rectas (estándar), mientras que rieles en un rango de durezas de 340-390 HB tienden a ser usados en curvas donde las condiciones son mucho más severas. Sin embargo, numerosos estudios han evaluado el uso de materiales

con alto grado de dureza, como aceros bainíticos y martensíticos para la fabricación de ruedas y rieles [35].

Los aceros modernos utilizados en rieles presentan estructuras perlíticas que proporcionan una alta resistencia al desgaste inherente a estos sistemas. Las mejoras en estas propiedades se han logrado mediante el refinamiento del grano en la microestructura y la minimización de inclusiones no metálicas en el material. Sin embargo, parece haber limitaciones en los avances adicionales dentro de estos parámetros, lo que ha llevado a dirigir la atención hacia la exploración de otros tipos de microestructuras que puedan ofrecer un mejor rendimiento en términos de resistencia al desgaste. El trabajo realizado por Girsch y otros [34] hace una revisión de las propiedades y el desempeño en campo de los aceros empleados durante años en aplicaciones ferroviarias, comparándolos con las nuevas tendencias en aceros empleados en nuestros días para la fabricación de rieles.

La **Figura 2- 14** muestra el desarrollo de aceros ferroviarios durante los últimos 100 años y la forma como cada vez más ha venido incrementándose el esfuerzo a tensión de estos.

Figura 2-14: Evolución de los aceros en los últimos 100 años [34].



Las propiedades mecánicas y condición microestructural de los aceros de la **Figura 2- 14** son presentadas en la **Tabla 2- 2**.

Tabla 2-2: Propiedades mecánicas de aceros ferroviarios [34].

	Grado de riel	hh	Micro-estructura	Composición Química				R _{m,min} [MPa]	A _{5,min} [%]	Dureza [BHN]
				C	Mn	Si	Cr			
Grados Convencionales Norma EN13674	R220		Perlita	0,50-0,60	0,20-0,60	1,00-1,25	≤ 0,15	770	12	220-260
	R260		Perlita	0,62-0,80	0,15-0,58	0,70-1,20	≤ 0,15	880	10	260-300
	R260Mn		Perlita	0,55-0,75	0,15-0,60	1,30-1,70	≤ 0,15	880	10	260-300
	R320Cr		Perlita	0,60-0,80	0,50-1,10	0,80-1,20	0,80-1,20	1080	9	320-360
	R350HT	x	Perlita	0,72-0,80	0,15-0,58	0,70-1,20	≤ 0,15	1175	9	350-390
	R350LHT	x	Perlita	0,72-0,80	0,15-0,58	0,70-1,20	≤ 0,30	1175	9	350-390
Nuevos grados	370LHT	x	Perlita	0,70-0,82	0,40-1,00	0,70-1,10	0,40-0,70	1175	9	>370
	380UHC	x	Perlita	0,90-0,95	0,20-0,35	1,20-1,30	0,25-0,30	1200	9	> 380
	400UHC	x	Perlita	0,90-0,95	0,20-0,35	1,20-1,30	0,25-0,30	1240	9	> 380
	DOBAIN 340	x	Bainita	0,76-0,84	0,20-0,35	0,80-0,90	0,40-0,55	1100	11	340-380
	DOBAIN 380	x	Bainita	0,76-0,84	0,20-0,35	0,80-0,90	0,40-0,55	1250	10	380-420
	DOBAIN 430	x	Bainita	0,76-0,84	0,20-0,35	0,80-0,90	0,40-0,55	1400	9	> 430

hh: Cabeza endurecida / Tratada térmicamente

Cabe notar que en la **Tabla 2- 2**, R_m es la resistencia a la tracción y A₅ es el alargamiento después de la ruptura. Investigaciones recientes han permitido comparar la resistencia al desgaste de aceros perlíticos con otros aceros y otras microestructuras, como los aceros bainíticos. Sin embargo, estas últimas microestructuras parecen tener una resistencia al desgaste menor, aunque en algunos casos se ha encontrado un comportamiento comparable entre los aceros bainíticos y los aceros perlíticos. [36].

Los aceros perlíticos están constituidos principalmente por la perlita, la cual es la consecuencia de la transformación eutectoide de la austenita consistente en la nucleación y crecimiento de láminas de ferrita y cementita (Fe₃C); la primera es una fase blanda y dúctil, mientras que la segunda es un carburo duro y frágil. En general, la perlita es una microestructura fina comparada con la ferrita y la cementita proeutectoides, que se obtiene con enfriamientos relativamente lentos como lo es en un horno o al aire.

En la observación metalográfica de la perlita se pueden observar las colonias, las cuales son equivalentes a los granos en otras microestructuras. Las colonias son dos monocristales de ferrita y cementita, donde todas las láminas son paralelas [37].

2.2.2 Defectos típicos en rieles

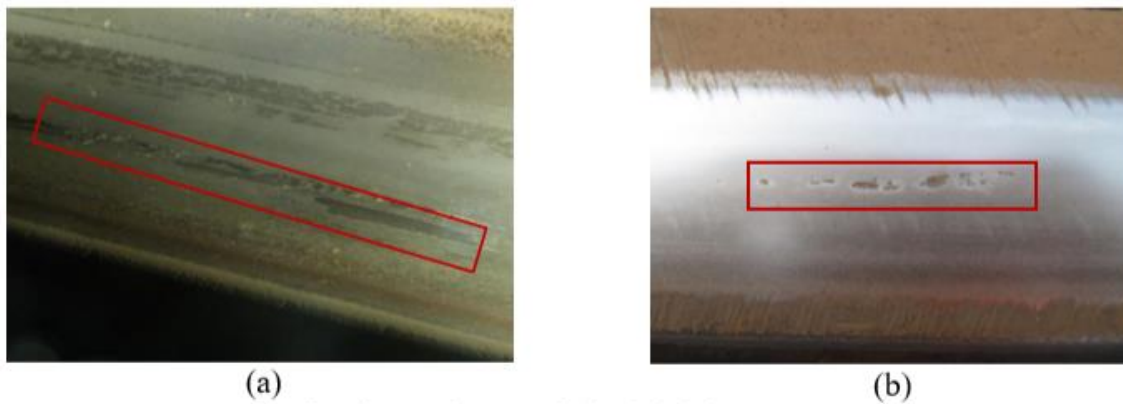
La identificación y caracterización de los defectos presentes en la vía férrea es una tarea crucial para la mejora de los procedimientos y la disminución de los costos de operación [3]. Al caracterizar los mecanismos de falla, es posible establecer estrategias de mantenimiento que permitan mitigar estos defectos, evitando su aparición temprana y de esta manera alargar la vida útil de las vías [38]. En el Metro de Medellín, para remover los defectos de la superficie es

necesario llevar a cabo operaciones de esmerilado que permitan retirar material de la superficie del riel, eliminando daños superficiales, teniendo como referencia un valor de 12 mm de altura del perfil para el cambio del cupón [39]. Con base en lo encontrado en la literatura y en los daños identificados en rieles de la vía comercial del metro de Medellín, se clasificaron los mecanismos de desgaste en cuatro tipos: Adhesión, Squats, Fatiga superficial y Flujo Plástico (tongue lipping) [40]. Los cuales se describen a continuación:

- **Adhesión**

Debido a las altas cargas típicas de estos sistemas, los materiales experimentan una fuerza de tracción efectiva lo suficientemente grande para generar el desprendimiento de material, tal como se muestra en la **Figura 2- 15**. Estas marcas se observan comúnmente en curvas y cerca de las estaciones, lugares en que se presentan altas tasas de deslizamiento, lo que conlleva a que el área efectiva de adherencia disminuya y por consiguiente la carga sea aplicada en una zona menor aumentando los esfuerzos de contacto [41].

Figura 2-15: (a) Marcas de adhesión en la superficie del riel, presentes en la curva 5. (b) pérdida de material, producto de elevadas fuerzas adhesivas, imagen tomada de la curva 15 [40].

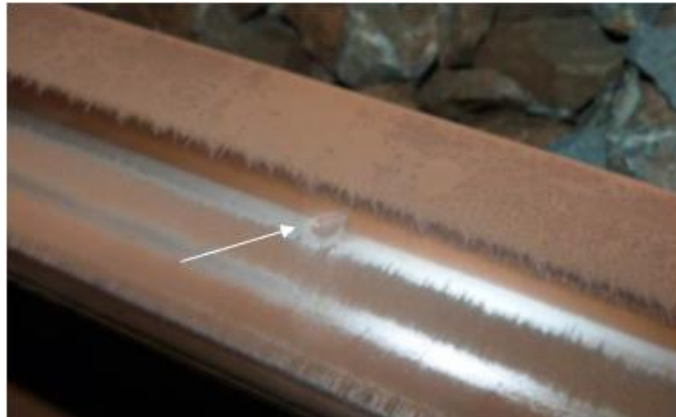


- **Squats**

Los Squats se caracterizan por formar una superficie oscura sobre el riel, combinada con un ensanchamiento de la banda de rodadura. Son formados debido a la existencia de grietas sub-superficiales que crecen paralelas a la superficie del riel, las cuales producen que el material cercano se desplace hacia los lados generando una depresión que recoge suciedad y se corroe dándole el aspecto oscuro. En la **Figura 2- 16** se puede observar una imagen del sistema del

Metro de Medellín. Es importante aclarar que este tipo de marcas son observadas comúnmente en curvas de la vía férrea y que para el metro de Medellín no pasan del régimen leve [40].

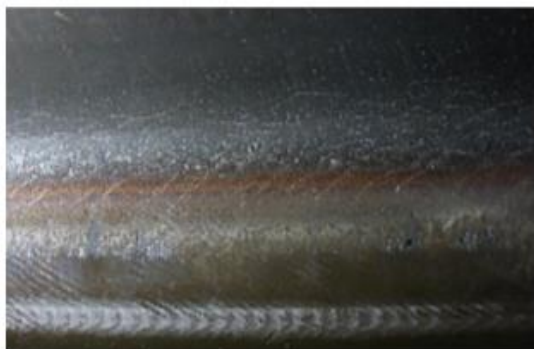
Figura 2-16: Imagen de un Squat presente en la curva 5 del sistema del Metro de Medellín [40].



▪ Fatiga superficial

La fatiga superficial es común especialmente en el hilo alto de las curvas, siendo más crítico en curvas de menor radio. El defecto observado en la cabeza del riel, comúnmente conocido como Head checks, consiste en la aparición de pequeñas fisuras como se muestra en la **Figura 2-17a**. Los Head checks mantienen una inclinación con respecto al eje longitudinal del riel debido a la dirección resultante entre las fuerzas longitudinal y transversal presentes en la intercara [42]. A medida que las grietas crecen, se ramifican y avanzan hacia el interior del riel, lo cual ocasiona desprendimiento de material, fenómeno conocido como Spalling, ver **Figura 2-17b**.

Figura 2-17: (a) Agrietamiento en la cabeza del riel (Head Checks). (b) desprendimiento de material debido a fatiga. Imágenes tomadas del Metro de Medellín, curva 4 y 8 respectivamente [40].



(a)

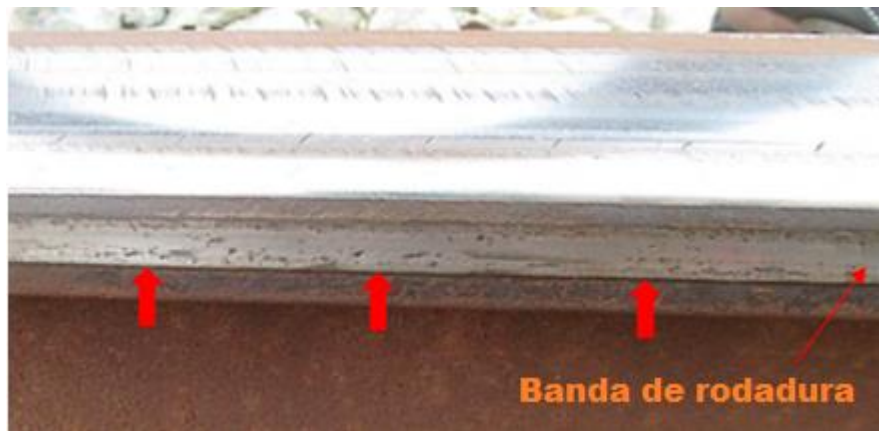


(b)

- **Flujo plástico (Tongue lipping)**

Este fenómeno de desgaste es generado por las altas cargas presentes en los rieles del hilo alto, las cuales producen una deformación plástica en el flanco del riel, especialmente en curvas (**Figura 2- 18a**). Se caracteriza por que el material del riel sobresale más allá de la banda de rodadura formándose en algunos casos grietas por debajo de estas capas, las cuales crecen en un plano aproximadamente paralelo a la superficie de la cabeza del riel, tal como se muestra en la **Figura 2- 18b** [6,7]. Este fenómeno de desgaste no es común en el sistema Metro de Medellín y sólo se ha reportado en una de las curvas que presentaba un radio de curvatura de 300 m con ausencia de peralte [40].

Figura 2-18: Tongue Lipping, imagen tomada del riel del hilo alto del Metro de Medellín en la curva 1. [41].



- **Desgaste ondulatorio**

Este tipo de desgaste se presenta sobre la superficie del riel en forma de corrugación y normalmente se aprecia a simple vista dependiendo de las frecuencias de las ondulaciones, como se puede observar en la **Figura 2- 19**. La aparición de estos picos y valles se debe principalmente a la interacción dinámica del vehículo con la vía, aunque fenómenos como flujo plástico, flexión plástica del riel y fatiga de contacto por rodadura contribuyen a su aparición [40].

Figura 2-19: a) Desgaste ondulatorio curva 1, b) Desgaste ondulatorio curva 3 [40]. Metro de Medellín.

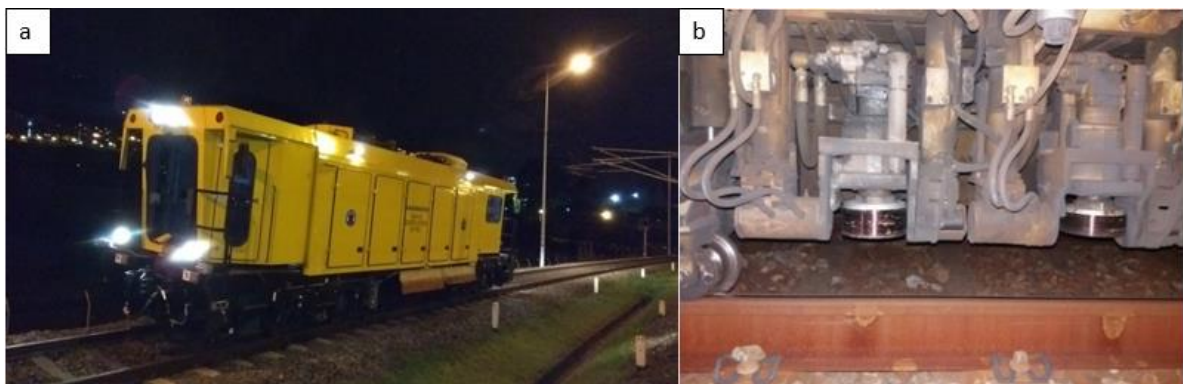


2.3 Operaciones de mantenimiento y esmerilado de rieles

2.3.1 Esmerilado y compactación

Cuando la vía alcanza su trazado planialtimétrico definitivo, obtenido por sucesivos levantes y nivelaciones longitudinales y alineaciones de vía, se procede a compactar el balasto con máquinas compactadoras especiales, que apisonan tanto las cajas de balasto entre durmientes, como la parte exterior de la vía, [33] posterior a dichas operaciones se realiza el proceso de esmerilado, el cual se ejecuta con una máquina de vía llamada “Esmeriladora” ver **Figura 2-20**, dando a la vía su sección final definitiva.

Figura 2-20: (a) Máquina para esmerilar referencia RGH 10, (b) sistema de esmerilado. Tomada por el grupo GTS.



2.3.2 Esmerilado de rieles

El riel constituye el principal elemento de la vía y es un factor determinante en el costo de construcción para una vía férrea, constituyendo el elemento estático del sistema rueda-riel que se encuentra en contacto directo con el vehículo ferroviario, influyendo sobre la buena circulación de los trenes y el estado de la misma, además es un factor de calidad esencial para el confort de los pasajeros.

La rueda concentra su carga ejerciendo los esfuerzos en un área extremadamente pequeña del riel, en consecuencia, se produce en la superficie de la cabeza de éste una importante concentración de sollicitaciones, con la superposición de cargas verticales y laterales, éstas últimas particularmente en curvas de radio reducido, pudiendo incluso llegar a superarse el límite de fatiga del acero del riel [33]. El esmerilado sistemático de los rieles presenta, sobre la rentabilidad de una línea ferroviaria, las siguientes ventajas:

- Alarga la vida útil de los rieles hasta en un 70%, en particular en las curvas de radio reducido. Ejemplos encontrados demuestran que el esmerilado aumenta la vida útil de los rieles como mínimo, en 100 millones de toneladas. Reduce hasta un 50% las intervenciones de bateo con equipos mecanizados para recomponer la geometría de la vía.
- Prolonga los intervalos de torneado de las ruedas.
- Disminuye el consumo de energía.
- Permite que los niveles acústicos admisibles no sean superados [7].

En la **Figura 2- 21** se puede ver el acabado final después de un esmerilado de un riel.

Figura 2-21: Aspecto general de la superficie esmerilada.



2.3.3 Estrategias de esmerilado

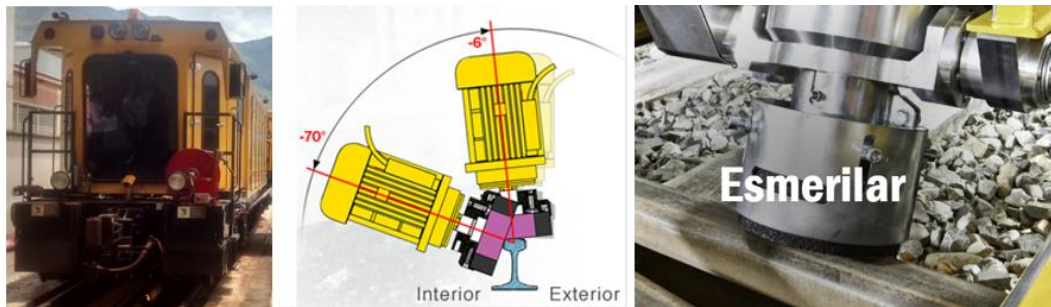
La determinación de las estrategias de esmerilado en una línea ferroviaria depende básicamente de la edad, del estado de los rieles y de la intensidad de carga de dicha línea. La elaboración de un programa de intervenciones representa una influencia determinante en los costos de las operaciones de esmerilado, en consecuencia, largas distancias y tiempos muertos entre intervenciones sucesivas aumentan los gastos improductivos de los equipos de esmerilado; cuanto mejor se logre programar la sucesión de las zonas a tratar, tanto geográficamente y cronológicamente, más se reducirán los tiempos improductivos [43].

La planificación del esmerilado de los rieles a largo plazo permite disminuir la velocidad de desgaste de los mismos, y por medio del cuidado sistemático posibilita la reducción de las consecuencias de los defectos en el sistema global. Entre las distintas estrategias de esmerilado tenemos:

- **Esmerilado de rieles nuevos:** este esmerilado permite establecer las mejores condiciones posibles de contacto y rodadura, minimizar los esfuerzos dinámicos y retardar al máximo el inicio de los procesos de deterioro de la infraestructura de vía. Mediante este esmerilado se elimina la película de laminado o zona descarburada en la cabeza de los rieles (pobre en carbono), se eliminan errores de superficie provocados por la manipulación de los rieles, se previene la formación del desgaste ondulatorio y de Headchecks, se corrigen eventuales errores cometidos en el montaje del emparrillado de vía (como por ejemplo variaciones en la inclinación de los rieles o formación de ondas largas, etc.), además permite la corrección del deterioro de la superficie de rodadura por los equipos durante el montaje de vía y la corrección de irregularidades en la nivelación de juntas soldadas. Mediante esta acción de esmerilado se busca corregir el perfil del riel al prescrito inicialmente. El esmerilado preventivo de los rieles nuevos retrasa la formación de inconvenientes en la superficie en más de 60 millones de toneladas.
- **Esmerilado cíclico:** este esmerilado responde a un ciclo de intervención en función del desarrollo de los defectos en los rieles. Con este esmerilado se logra la eliminación de la capa superficial de material y la corrección del perfil longitudinal del riel, la disminución de fatiga del material en la superficie de rodadura y la conservación óptima del contacto entre rueda y riel. Mediante el esmerilado cíclico se alcanza una estructura metalúrgica de carácter homogéneo.

- **Esmerilado correctivo:** posibilita la eliminación del desgaste ondulatorio y de las ondas profundas y la eliminación de deformaciones plásticas del perfil transversal del riel, posibilitando el restablecimiento de las condiciones óptimas. Este esmerilado posibilita la eliminación de los defectos o bien la atenuación de los mismos, para ello se varían los ángulos de las ruedas abrasivas con el fin de esmerilar y mantener el perfil del riel. En la **Figura 2- 22** se pueden observar las posibles disposiciones de las ruedas abrasivas al momento de realizar un esmerilado.

Figura 2-22: Disposiciones de las ruedas abrasivas al momento de realizar un esmerilado [54].



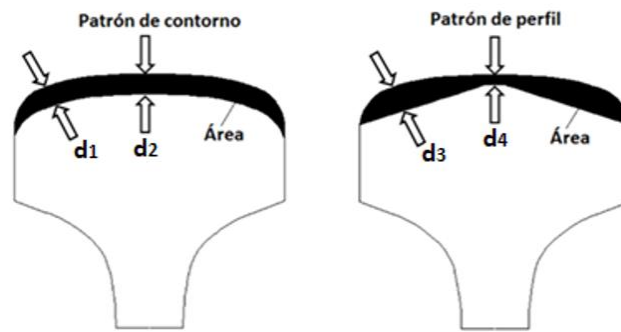
2.3.4 Factores que determinan el esmerilado

Dado que el esmerilado de rieles es la extracción de metal de la superficie de la cabeza del riel, es importante comprender los factores claves que afectan dicha remoción. Primero, hay que tener en cuenta que la extracción de metal es realmente una medida volumétrica. A menudo se define como el peso (o volumen, para materiales de densidad uniforme) del material eliminado durante un período de tiempo fijo.

Para una máquina esmeriladora de rieles que se mueve a lo largo de la vía a una velocidad constante, se puede suponer que el área de metal removida de la sección transversal de la cabeza del riel es constante. Esta área puede ser aproximada tomando varias medidas de "profundidad" a través del ancho conocido de la cabeza del riel. Esta profundidad de extracción de metal, generalmente definida en milésimas de pulgada (o décimas de milímetro), es lo que generalmente se conoce como extracción de metal en el entorno de esmerilado de rieles.

La **Figura 2-23** ilustra la extracción de metal en función del área de la sección transversal del riel (es decir, a una velocidad de esmerilado constante). Se debe tener presente que la profundidad real del metal removido (d) varía significativamente a través de la cabeza del riel. Por lo tanto, si bien es común referirse a la extracción de metal en términos de profundidad de material removido, en pulgadas (o mm), debe entenderse que la ubicación y distribución de los motores de esmerilado y el patrón del mismo correspondiente tienen un impacto significativo en la distribución de la extracción de metal a través de la cabeza del riel, incluso si el volumen total es constante. [7]

Figura 2-23: Área de metal removido según el tipo de patrón designado [7].



- **Factores que influyen en la remoción de metales**

- A. Potencia de esmerilado
- B. Velocidad de esmerilado
- C. Ubicación en la cabeza del riel
- D. Configuración de motores
- E. La rueda abrasiva

A. Potencia de esmerilado

Es la cantidad de potencia disponible en una máquina esmeriladora. Esto incluye:

- El número de motores en una máquina esmeriladora, puede variar de 16 a 120 motores (correspondientes a entre 8 y 60 motores por riel).
- La potencia de los motores, puede variar de 7.5 hp a 30 hp por motor, por lo tanto, la potencia total de esmerilado de un tren puede variar de cientos de caballos de fuerza de esmerilado (por ejemplo, 16 motores a 20 hp por motor = 320 hp) a varios miles de caballos de fuerza (por ejemplo, 96 motores a 30 hp por motor = 2,880 hp).

La mayoría de las máquinas esmeriladoras de rieles de alta producción operan en el extremo superior de este rango, pero las máquinas locales o especializadas más pequeñas operan en el extremo inferior de este rango de potencia de esmerilado, siendo para el Metro de Medellín entre 2.5 – 17 kW.

La extracción de metal y la potencia de esmerilado están directamente relacionadas, donde la extracción de metal se define en términos de una profundidad "promedio". La capacidad de extracción de metal del equipo de esmerilado depende directamente de la potencia total disponible. Por ejemplo, para un sistema de esmerilado de 720 hp eliminará entre 0.15 y 0.2 mm de metal de la cabeza del riel con un patrón convencional de esmerilado de contorno (como se ilustra en la [Figura 2- 24](#)) a una velocidad de aproximadamente 3.2 Km/h. Usando el mismo patrón de esmerilado y operando a la misma velocidad, una máquina esmeriladora de 1,440 hp removerá entre 0.3 y 0.4 mm de metal del cabezal del riel. Para una potencia de 2,400 hp resulta un aumento en la remoción de metal de aproximadamente 0.5 mm de remoción de metal a 3.2 Km/h. Por lo tanto, parece haber una relación directa (y aparentemente lineal) entre la potencia de esmerilado (hp) y la remoción de metal, dentro del límite de lo normal en operaciones de este tipo (todos los demás factores son constantes).

Sin embargo, si la combinación de potencia, velocidad y otros factores desvía la operación de esmerilado fuera de la región operativa en estado estable, puede haber un deterioro significativo (y no lineal) en el rendimiento de extracción de metal [7].

B. Velocidad de esmerilado

La velocidad de avance de la máquina esmeriladora, representa uno de los parámetros clave en el control de la operación, pero sin dejar de lado parámetros tan importantes, como son el ángulo de ataque y la profundidad de corte. Si la velocidad del equipo es muy alta dará como resultado un acabado inadecuado, con imperfecciones en la superficie y una remoción desigual de metal. Si el esmerilado se da a una velocidad demasiado lenta provocará daños en la superficie del riel, incluyendo daño metalúrgico ("azulado") y ranuras en la cabeza del riel.

El aumento de la velocidad de avance de la máquina esmeriladora (manteniendo constante la velocidad de rotación de los motores de esmerilado) generalmente da como resultado una disminución en la extracción de metal. Esto se debe a que la rueda abrasiva pasa menos veces sobre una ubicación determinada en la cabeza del riel. Así, por ejemplo, una rueda abrasiva de

3.600 rpm, que avanza a una velocidad de 6.4 Km/h (aproximadamente 1.8 metros por segundo), aproximadamente pasará 10 veces por cada 0.3 metros lineales del riel. Si la velocidad de avance se duplicó, a 12.8 Km/h, los mismos 0.3 metros lineales del riel solo recibirá 5 pases de corte de la misma rueda abrasiva, así, el número total de cortes disminuye, y por lo tanto se tendrá un decrecimiento en la cantidad de metal eliminado durante el paso del motor de esmerilado. Además, la distancia entre las "marcas" de esmerilado aumentará con la velocidad, debido a la mayor distancia recorrida por la máquina esmeriladora durante cada rotación de la rueda abrasiva.

Sin embargo, esta relación no siempre es lineal, ya que existen efectos no lineales asociados con (1) eficiencias de corte aumentadas / disminuidas (en función del tipo de motor, potencia o rueda abrasiva utilizada), (2) efectos de interacción rueda abrasiva-riel (que varían en función de la velocidad, el diseño de la máquina esmeriladora, las características dinámicas del sistema y/o la selección de rueda abrasiva) y (3) otras características del sistema de esmerilado, la superficie del riel y las características de respuesta dinámica local del sistema.

La relación general entre la remoción de metal y la velocidad de avance, es la disminución de la remoción de metal en función del aumento de la velocidad de avance de la máquina esmeriladora. Por lo tanto, la velocidad representa un medio eficaz para controlar la cantidad de metal eliminado para cada pasada. Este efecto forma la base de un esmerilado de mantenimiento moderno de alta velocidad que utiliza un único pase para la extracción de metal (aplicado a intervalos frecuentes) para controlar el perfil del riel y evitar el desarrollo de daños por fatiga.

El rango normal de velocidad de esmerilado es entre 2.5 y 15 km/h, por debajo 2.5 km/h, el equipo de esmerilado generará daños a la cabeza del riel, debido a que en estas bajas velocidades se produce una gran cantidad de entrada de calor en la superficie del riel por los motores de esmerilado, que puede causar daño metalúrgico ("azulado"). Además, si un motor de esmerilado permanece demasiado tiempo en cualquier ubicación, puede provocar la extracción excesiva de material produciendo una disminución en la vida útil del riel.

El rango superior de velocidad de esmerilado ha evolucionado significativamente en las últimas décadas. Mientras que los primeros sistemas de esmerilado tenían límites de velocidad

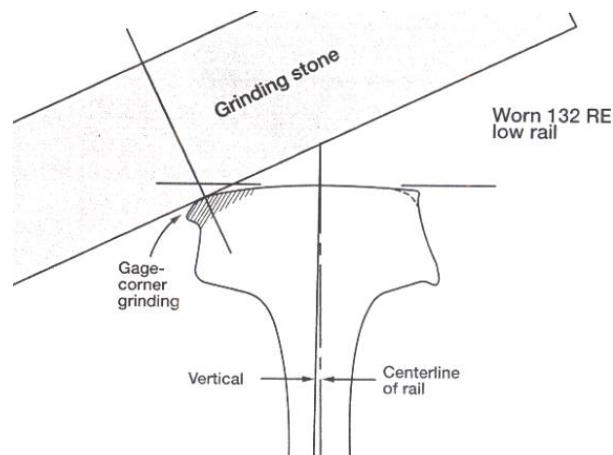
máxima en el rango de 6 a 10 km/h, los sistemas de esmerilado modernos pueden esmerilar a una velocidad mayor de 16 km/h, existen informes de esmerilado de 20 a 23 km/h. [7] La velocidad máxima de esmerilado generalmente está limitada por la estabilidad del Buggy de la máquina esmeriladora y del diseño de sus motores. Si la velocidad genera inestabilidad del Buggy, se produce una vibración de alta intensidad, con eliminación de metal no uniforme y daños potenciales tanto en el riel como en los motores de esmerilar.

Los estudios indican que profundidades de corte en el rango de 0.3 a 0.4 mm pueden ser producidos con una máquina esmeriladora de 1440 hp con 96 motores de 15 hp trasladándose a 3 Km/h. Si para esa misma máquina se reduce la velocidad a 2.5 km/h, la remoción de material aumenta en el rango de 0.4 a 0.5 mm, pero si se aumenta la velocidad entre 4 y 5 km/h la remoción de material se reduce. El cambio de potencia, ya sea aumentando el número o el tamaño de los motores, también da como resultado un cambio significativo en la extracción de metal [7].

C. Ubicación en la cabeza del riel

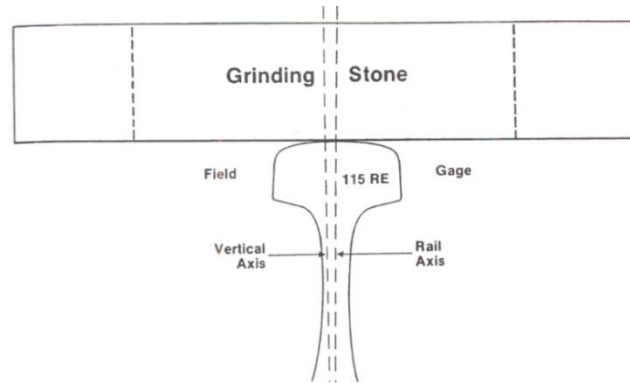
El ancho de la banda de esmerilado varía en función del ángulo de ataque de la rueda abrasiva con respecto a la cabeza del riel y del radio de curvatura local donde se produce el contacto. La **Figura 2- 24** ilustra esto y muestra el contacto entre la cara plana de la rueda abrasiva y la esquina del riel. El parche de contacto resultante es relativamente estrecho, ya que el radio es más pequeño en la esquina del riel que en la parte superior del mismo, esto se da en la mayoría de los diseños de sección de cabeza de riel estándar.

Figura 2-24: Contacto de la rueda de esmerilar con la esquina del riel [7].



La **Figura 2- 25** ilustra un contacto con un área más ancha en la parte superior de la cabeza del riel. Por lo tanto, el esmerilado sobre el centro de la cabeza del riel produce una banda más ancha dicho punto (donde hay un radio de mayor tamaño y un área de contacto más ancha correspondientemente) y un esmerilado en la esquina del riel produce una faceta más estrecha (donde el radio es significativamente menor).

Figura 2-25: Contacto de la rueda de esmerilar con la parte central de la cabeza del riel [7].



Por lo tanto, la posición de la rueda abrasiva sobre la cabeza del riel, afecta tanto el ancho de banda y la profundidad del metal removido. La extracción de metal es una medida volumétrica. En realidad, se define como el peso (o volumen, para materiales de densidad uniforme) del material eliminado durante un período de tiempo fijo.

Para una esmeriladora de rieles que se mueve a lo largo de la línea a una velocidad constante, el área de sección transversal de metal removida por cada motor de esmerilado puede tomarse como constante y puede considerarse igual al ancho de la banda multiplicado por la profundidad del metal eliminado por el motor de esmerilado. Por lo tanto, la profundidad del metal removido varía significativamente a través de la cabeza del riel a medida que cambia el ancho de la banda. En consecuencia, la eliminación de metal medido en la parte superior de la cabeza del riel puede ser significativamente diferente del valor extraído en las esquinas del riel [7].

D. Configuración de los motores

El patrón se define como la distribución de los motores en una máquina de esmerilado. Como generalmente hay más motores de esmerilado que el mínimo requerido para cubrir la cabeza del riel, se puede concentrar más motores en el área donde se va a eliminar la mayor cantidad

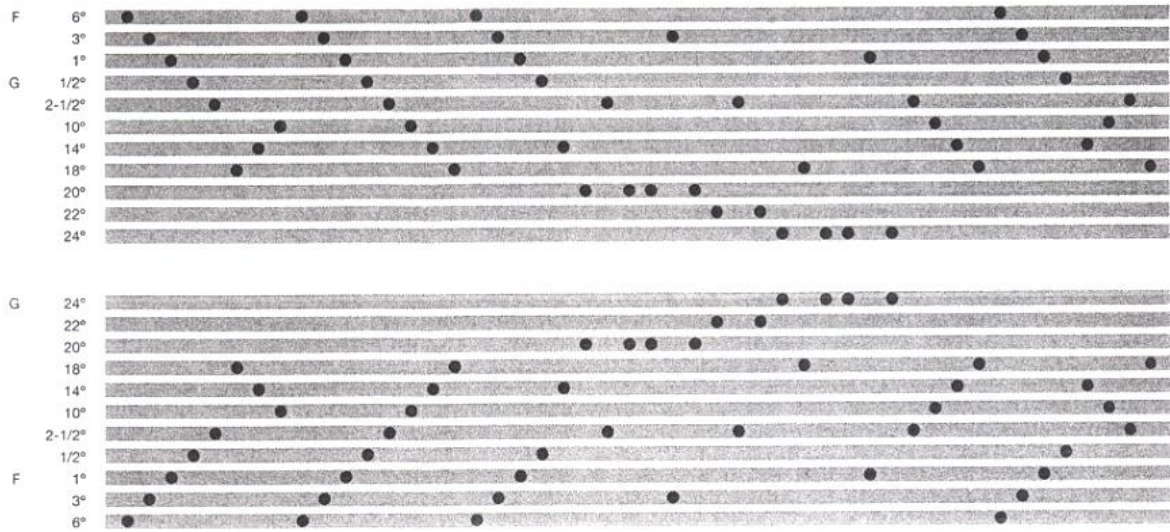
de metal. Para las máquinas de esmerilado de gran tamaño, como son las que tienen 44, 48 o incluso 60 motores de esmerilado por riel, existe la posibilidad de variar la configuración de los motores y por lo tanto obtener un gran número de patrones [7].

Incluso para máquinas más pequeñas con 10 a 24 motores por riel, es posible también obtener una gran variación en los patrones de esmerilado, aunque la cantidad de motores disponibles para ser utilizados al mismo tiempo disminuyen y por lo tanto la extracción de metal es más limitada. Según Zarembski [7] se pueden obtener 16 patrones diferentes con 10 motores de esmerilado por riel. Aunque el ángulo de esmerilado es una variable primaria entre los patrones, la posición lateral del motor con respecto a la cabeza del riel (el desplazamiento lateral del motor) y el ajuste de potencia de esmerilado de los motores individuales puede también ser variado.

Se debe tener presente que en los lugares donde se requiere mayor potencia de esmerilado, hay una mayor concentración de motores. Sin embargo, estos motores no están "agrupados", sino que están separados y posicionados en diferentes ángulos para permitir una mayor eficiencia de esmerilado entre ellos.

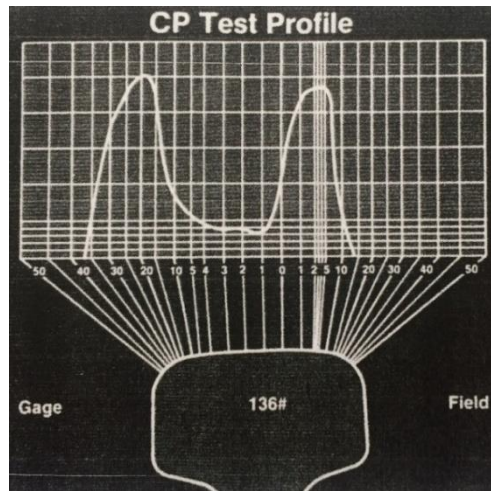
Al diseñar patrones de esmerilado, es común que los motores de esmerilado secuencial se superpongan ligeramente en un patrón, para facilitar el desarrollo eficiente de la operación y por ende la eliminación de metal. Por lo tanto, la secuencia de motores de esmerilado en un determinado patrón a menudo toma la forma de una "X" o una forma de "V", o una serie de formas de "V" (**Figura 2- 26**). A medida que aumenta el número de motores de esmerilado en una máquina esmeriladora, la posibilidad de "ajustar" un patrón con una extracción de metal cuidadosamente controlada aumenta, debido a la capacidad de tener motores adicionales concentrados en las ubicaciones de los cabezales del riel donde se requiere más extracción de metal.

Figura 2-26: Secuencia de motores de esmerilado en un determinado patrón [7].



La **Figura 2- 27** ilustra la remoción de metal resultante para cada uno de los patrones utilizados, cuyo foco está en los lados de la cabeza del riel y con una remoción mínima de metal en el centro del mismo.

Figura 2-27: Metal removido de acuerdo a una distribución específica de esmerilado [7].



En algunos diseños de esmerilado, hay diferentes rangos en los cuales algunos motores no pueden intervenir, por lo tanto, para esos esmerilados, no se pueden acomodar a la gama completa de ángulos disponibles, estos limitantes deben ser tenidos en cuenta al momento de programar los patrones de esmerilado.

E. La rueda abrasiva

Las ruedas abrasivas tienen espesor variable (generalmente entre 2 y 3 pulgadas (50 a 75 mm) que contienen miles de partículas de grano abrasivo unidas en forma de rueda por un material aglomerante. Normalmente las ruedas abrasivas utilizadas para esmerilar los rieles tienen un diámetro exterior nominal de 10 pulgadas (250 mm) y un diámetro interno de 6 pulgadas (150 mm) (Ver **Figura 2- 28**) y funcionan generalmente a velocidad constante que es definida por el motor en el cual están instaladas, dichas velocidades están en el rango entre 3600 a 6000 rpm. Las ruedas abrasivas para propósitos especiales, como las que se usan en las esmeriladoras de interruptor y de cruce, pueden variar en tamaño desde 4 pulgadas (100 mm) a 8 pulgadas (200 mm) de diámetro exterior, y ser operadas a velocidad constante generalmente entre 4536 a 9072 (rpm).

Figura 2-28: Rueda de esmerilar en contacto frontal con la cabeza del riel [7].



Las ruedas de esmerilar realizan su trabajo cuando las partículas de grano abrasivo cortan individualmente pequeñas piezas o astillas del material con el cual están en contacto. A medida que continúa la acción de corte, las virutas abrasivas se desgastan, con la consiguiente pérdida en la eficiencia de corte de la rueda abrasiva. A medida que estas partículas se desgastan, se producen dos acciones que afilan o "visten" las ruedas abrasivas: (1) la fractura de los granos abrasivos proporciona bordes de corte frescos, y (2) la fractura de la superficie de unión elimina los granos desgastados y expone partículas abrasivas frescas.

Al hacer coincidir adecuadamente la resistencia de las partículas y la resistencia de la unión, se puede establecer la mejor combinación de efectividad de corte y vida útil. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el simple cambio de uno de estos dos componentes, el grano abrasivo o el material de unión, no necesariamente mejorará la capacidad de corte y la vida en general.

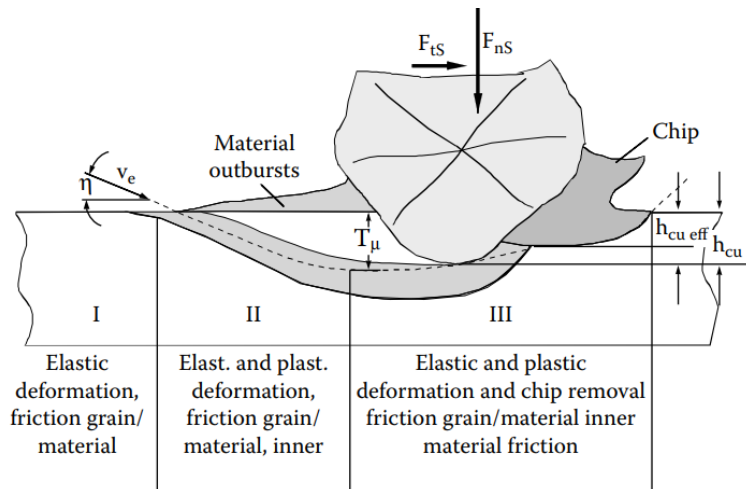
Es la combinación adecuada de estos dos componentes lo que produce el mejor rendimiento de la rueda abrasiva en términos de eliminación de metal y vida útil de la misma.

2.3.5 Análisis del proceso corte en el esmerilado

- **Remoción de material en el rectificado**

De acuerdo con Marinescu et al [63] durante el rectificado, el filo del grano penetra la pieza de trabajo en un camino muy plano causando flujo plástico del material después de una fase muy corta de deformación elástica. El ángulo entre el contorno del filo y la superficie de la pieza de trabajo es muy pequeño debido al filo redondeo, inicialmente no se forma ninguna viruta. El material de la pieza sólo se empuja hacia un lado, formando crestas laterales, y fluye hacia el flanco debajo del filo [64]. La **Figura 2- 29** muestra la formación de viruta durante el rectificado de materiales dúctiles.

Figura 2-29: Proceso de remoción durante el mecanizado de metales [63].

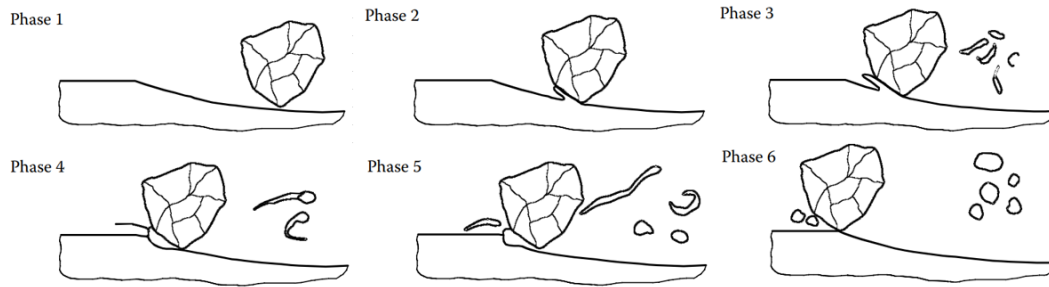


Sólo si el filo penetra en la pieza de trabajo a una profundidad que supere el espesor de la viruta no deformada, h_{cu} , alcanzaría a la llamada profundidad de corte crítica, T_{μ} , donde comienza la formación de viruta real. En el proceso posterior se producen simultáneamente procesos de desplazamiento y formación de virutas, esto es crucial para la eficiencia de la eliminación de material.

Marinescu et al [63] han diferenciado aún más el proceso de formación de viruta durante el mecanizado de materiales dúctiles con altas velocidades de corte. Sobre la base de

experimentos, determinaron en total seis fases de formación de viruta singular durante el rectificado, como se muestra en la **Figura 2- 30**.

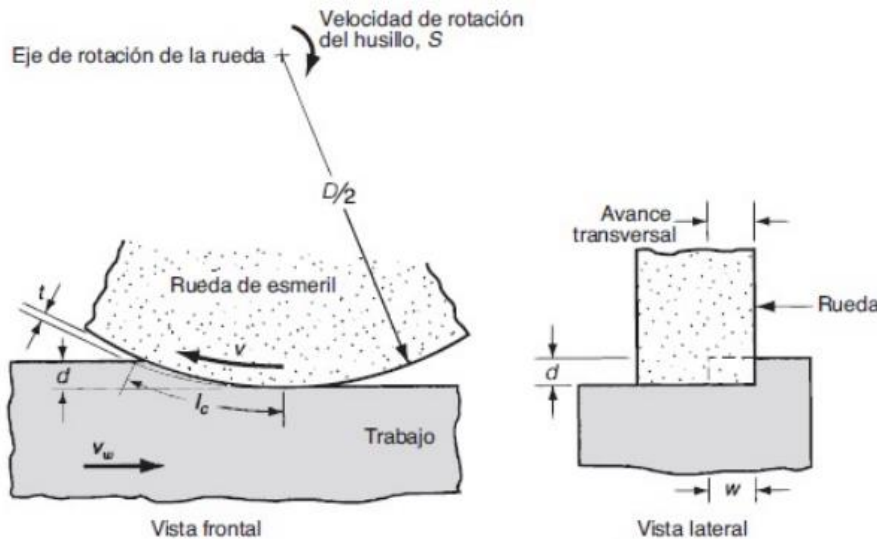
Figura 2-30: Proceso de remoción durante el mecanizado con altas velocidades de corte [63].



Condiciones de corte en el esmerilado

Las condiciones de corte en el esmerilado se caracterizan por velocidades muy altas y cortes muy pequeños, comparados con el fresado y otras operaciones de maquinado tradicional. En la **Figura 2- 31** se ilustran las principales características del proceso de esmerilado superficial.

Figura 2-31: Condiciones de corte en el esmerilado [63].



Con base en la **Figura 2- 31** se derivan las ecuaciones para el mecanizado con ruedas abrasivas que se muestran en la **Tabla 2-3**.

Tabla 2-3: Ecuaciones en el mecanizado por esmerilado [63].

Velocidad periférica de la rueda del esmeril	Tasa de remoción de material	Longitud promedio de la viruta
$V = \pi DN$ <p>Donde: V = velocidad periférica de la rueda D = diámetro de la rueda N = velocidad de rotación del husillo</p>	$MRR = V_w W d$ <p>Donde: MRR = Tasa de remoción de material V_w = velocidad de avance w = ancho de corte d = profundidad de corte</p>	$l_c = \sqrt{Dd}$ <p>Donde: l_c = Longitud promedio de la viruta D = diámetro de la rueda d = profundidad de corte</p>
Espesor de la viruta	Número de virutas	Energía específica
$t = \sqrt{\frac{4v_w}{VCr}} \sqrt{\frac{d}{D}}$ <p>Donde: t = Espesor de viruta C = cantidad de puntos de corte por unidad de área de la periferia del disco r = relación de la anchura de la viruta al espesor promedio de la viruta sin deformación D = diámetro de la rueda d = profundidad de corte V = velocidad de la rueda V_w = velocidad de avance w = ancho de corte / avance transversal</p>	$n_c = VW C$ <p>Donde: n_c = Número de virutas V = velocidad de la rueda w = ancho de corte / avance transversal C = cantidad de puntos de corte por unidad de área de la periferia del disco</p>	$U = \frac{F_c V}{v_w d}$ <p>Donde: Donde: U = energía específica F_c = fuerza de corte V = velocidad de la rueda V_w = velocidad de avance d = profundidad de corte</p>

2.4 Afectaciones microestructurales del esmerilado

2.4.1 Formación de capa blanca en rieles

El inicio y la propagación de los diferentes tipos de grietas por fatiga por contacto rodante (Rolling Contact Fatigue – RCF) normalmente depende de una gran variedad de parámetros en una correlación compleja. Sin embargo, en muchos casos se ha encontrado que las grietas de RCF están asociadas con capas superficiales de martensita, que a veces también se conocen como martensita inducida por fricción (Friction Induced Martensite - FIM) o simplemente capa blanca (White Etching Layer - WEL) debido a que la martensita no se ve afectada por el ataque químico y, por lo tanto, aparece blanca en la observación en el microscopio óptico [46].

Estas son esencialmente capas inducidas en la superficie del riel que típicamente se consideran como resultado de la fricción entre la rueda y el riel durante la aceleración o el frenado. La

superficie del riel puede calentarse a temperaturas elevadas seguido de un enfriamiento muy rápido debido al alto flujo de calor en la mayor parte del riel frío [76]. Si las temperaturas son lo suficientemente altas como para provocar la austenización del acero, esto será seguido por una transformación martensítica durante el enfriamiento rápido.

En la década de 1990, las actividades sistemáticas de esmerilado de rieles en Dinamarca se iniciaron con el principal objetivo de eliminar las ondulaciones presentes en estos; dichos defectos son pequeñas deformaciones que se dan de manera secuencial sobre la superficie del riel y están distanciadas en intervalos entre 10 a 30 centímetros [49].

Durante los últimos 10 a 15 años, las actividades de esmerilado han aumentado significativamente y al día hoy el objetivo principal del esmerilado es prevenir o eliminar las grietas de RCF, lo que sugiere que la formación de grietas se produce a un ritmo mayor que el desgaste normal de los rieles [45]. Si bien las capas superficiales martensíticas en los rieles se han estudiado en detalle [46-47] principalmente por frenado, hasta hace poco solo se habían realizado investigaciones limitadas sobre cómo el esmerilado de perfiles afecta la superficie del riel [49].

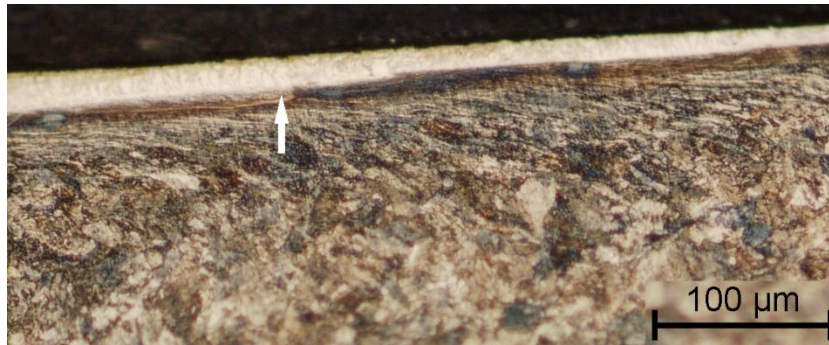
En 2014, Rasmussen y colaboradores demostraron que el esmerilado de rieles causó capas de martensita en las superficies de los mismos, lo que podría estar relacionado con grietas RCF [48]. En 2016, Steenbergen publicó una investigación detallada sobre el rol de las superficies de los rieles para esmerilar [10], centrándose en el efecto del esmerilado de rieles de grado R370CrHT y R260Mn con RCF. Sugirió que había una relación entre el esmerilado de los rieles y el inicio de RCF al comienzo de la vida útil del riel R370CrHT, concluyendo la necesidad de evitar las capas superficiales de martensita. También indicó que el riel R370CrHT es más vulnerable al daño inducido por esmerilado en comparación con los rieles con un grado de dureza menor como lo es el R260Mn. Esto corresponde bien con la experiencia en Dinamarca, donde se han producido graves problemas de spalling en rieles R350HT endurecidos en su cabeza, un problema que se ve con menos frecuencia en rieles más blandos [49].

Algunos autores [10, 49] han encontrado que un procedimiento incorrecto de esmerilado de rieles puede inducir defectos de RCF como Head Checks, Squats, Studs y desprendimiento de material. Ambos autores extrajeron muestras del campo, atacaron químicamente la cabeza del riel y encontraron parches blancos cerca de los defectos. Después de la preparación

metalográfica, los autores encontraron una capa blanca generada por el proceso de esmerilado.

La **Figura 2- 32** presenta la microestructura de la sección transversal de una muestra extraída de uno de los tramos esmerilados en el sistema ferroviario Metro de Medellín, dicha figura muestra la región superficial donde se llevó a cabo el procedimiento. Puede notarse claramente que el proceso de esmerilado afectó la microestructura generando una capa blanca cuyo espesor alcanzó en algunas zonas hasta 40 μm . Esta capa es altamente indeseable debido a que actúa como una zona con alta propensión para la nucleación de grietas incluso para bajos ciclajes de operación.

Figura 2-32: Microestructura del riel R400HT luego de operación de esmerilado con la esmeriladora RGH 10 a 6 km/h (Ángulos de ataque 21 – 22 = 65%, 23 – 24 = 70%, 25 – 26 = 85%). La flecha indica la ubicación de la capa blanca en la superficie.



Se ha descubierto que la capa blanca inducida por la deformación se forma por una severa deformación plástica de la microestructura perlítica, las láminas de cementita se fragmentan y se dispersan finamente en la ferrita deformada, formando una estructura nanocristalina con propiedades similares a las de una estructura martensítica [50]. Investigaciones de Al-Juboori et al [51] encontraron este tipo de WEL que contiene solo "martensita fina" está asociada con perlita deformada en el sustrato, por lo que también concluyeron que fue inducida por una severa deformación plástica en la interfaz rueda-riel.

Estas deformaciones plásticas severas localizadas promueven transformaciones por debajo de la temperatura de austenización a raíz de los altos esfuerzos presentes en la superficie y subsuperficie durante el contacto, que favorecen la disolución de las láminas de cementita dentro de la ferrita [57], [75], [77] y el subsecuente enriquecimiento de la ferrita con carbono,

dando paso a la posible formación de estructuras tetragonales similares a las observadas en la martensita, que podrían explicar la alta dureza y fragilidad de esta capa [58].

Además, la WEL puede actuar a menudo como un incubador de grietas que se pueden clasificar de dos maneras: (i) grietas perpendiculares a la capa que se propagan a través de ella hasta alcanzar la intercara de contacto [59] y se asocian a una respuesta frágil del material dada su alta dureza. Sin embargo, no se tienen valores experimentales de tenacidad a la fractura que lo corroboren [60], y (ii) Grietas que se nuclean en la interfase capa blanca-perlita propagándose a través de ella y que a menudo forman ramificaciones en etapas posteriores formando sistemas intrincados [61]. Aunque existen numerosos estudios sobre la iniciación y propagación de grietas en la capa blanca, en la actualidad falta una comprensión completa de los mecanismos de formación asociados a ésta y de la formación de grietas en su vecindad [62].

A diferencia de la WEL causada por excesiva deformación plástica, la WEL inducida térmicamente se forma por un calentamiento rápido de la superficie del riel por encima de la temperatura de austenización; Tan pronto como la fuente de calor desaparece, sigue un enfriamiento rápido a través del material del riel. Este proceso de enfriamiento genera una estructura martensítica generalmente mezclada con austenita retenida. Siendo este tipo de WEL encontrada con perlita no deformada en el sustrato [51]. Esta hipótesis ha encontrado soporte con la detección de austenita retenida, indicando una posible transformación incompleta en esta zona.

La relación entre la WEL y defectos de RCF ha sido bastante estudiada recientemente porque la WEL es susceptible al agrietamiento debido a su alta dureza y fragilidad en comparación con la microestructura perlítica del riel, por lo que podría actuar como un nucleador de grietas tempranas que promueven la aparición de defectos de RCF [11]. Steenbergen [10] y Rasmussen et al [49] asociaron los Squats con la WEL porque las grietas encontradas cerca de las zonas con WEL se propagan hacia el interior del riel y pueden causar desprendimiento de material.

Sin embargo, es importante mencionar que el Squat clásico formado por Ratchetting o agotamiento de la plasticidad no es necesariamente el mismo defecto encontrado por ellos. Grassie et al concluyeron que tanto los Studs como los Squats son iniciados por daño térmico del riel [52]. La diferencia más significativa es que no hay evidencia de que los Studs puedan conducir a defectos transversales como la fractura de rieles como sí lo hacen los Squats [53].

3. Capítulo 3: MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Materiales

3.1.1 Extracción de muestras

Las muestras utilizadas en este estudio se extrajeron de ruedas y rieles del sistema ferroviario del Metro de Medellín. Las probetas que simulan el riel en los ensayos tribológicos de laboratorio fueron extraídas de la parte superior (cabeza del riel) como se muestra en la **Figura 3- 1** y las que simulan las ruedas se tomaron de ruedas dadas de baja por la empresa por pérdida de dimensiones. Cada una de las probetas fabricadas para la rueda tiene un proceso de manufactura diferente al proceso de las probetas de riel, como se puede observar en la **Figura 3- 2**, donde cada segmento vertical marcado en la rueda antes del maquinado sirvió para la extracción final de las probetas que se utilizaron en los ensayos.

Las probetas para rueda fueron segmentadas en tronzadora circular, partiendo de una distancia de 150 mm desde el diámetro exterior hacia adentro de la rueda y los cortes se realizaron con una separación equidistante de 54 mm aproximadamente, finalmente se llevaron al torno hasta obtener barras cilíndricas, que luego serán ajustadas a las medidas finales del diseño planteado inicialmente.

Luego del diseño computarizado para la optimización del material, el maquinado y la puesta a punto de las probetas de riel y rueda, se hizo un mecanizado final con el fin de obtener el parámetro Ra en un rango de valores establecidos (1.0 - 1.5 μm); este proceso mecánico se hizo por remoción de material para ambas probetas, torneado y fresado.

46 **Influencia de las condiciones de esmerilado sobre la aparición de capa blanca en rieles tipo R400HT para uso en el Metro de Medellín**

Figura 3-1: Proceso de corte y obtención de probetas del componente riel. Modificada de [65].

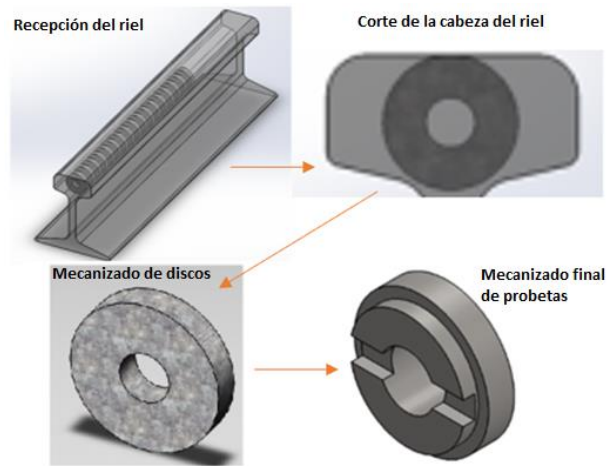
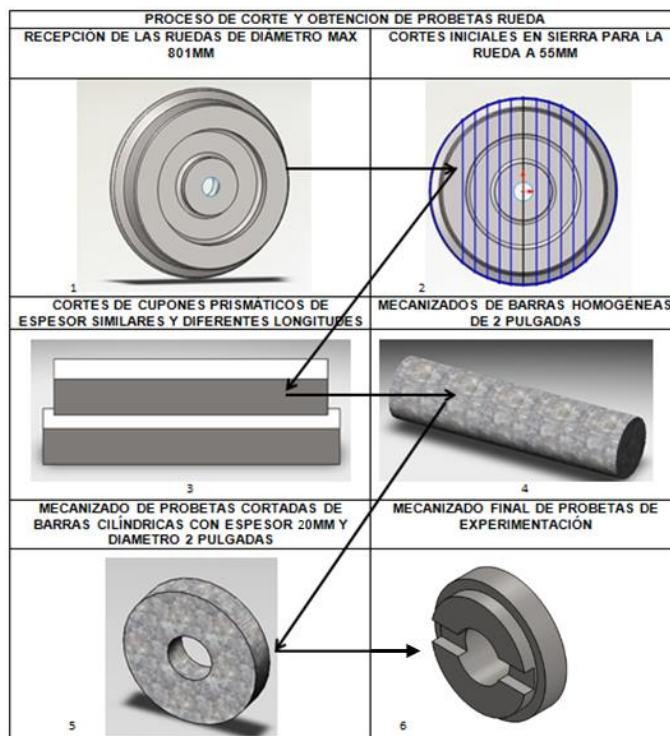
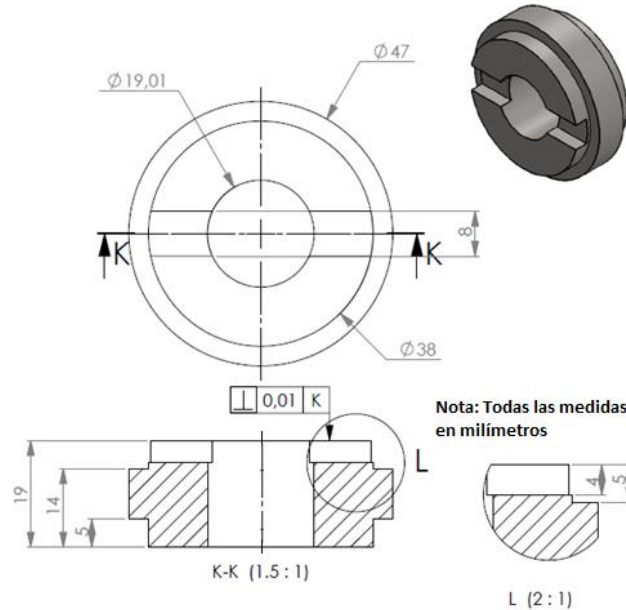


Figura 3-2: Proceso de corte y obtención de probetas de rueda. Modificada de [65].



Finalmente, como se observa en la **Figura 3- 1** y **Figura 3- 2**, después de obtener las arandelas de diámetro 2" y espesor 20 mm, se fabricaron las probetas para la experimentación con las dimensiones finales según se muestra en la **Figura 3- 3**.

Figura 3-3: Dimensiones finales probetas de experimentación.



3.1.2 Caracterización química y microestructural

Las probetas seleccionadas tanto para los esmerilados como para los ensayos de fatiga de contacto en el tribómetro disco-disco fueron extraídas de ruedas y rieles suministrados por el Metro de Medellín; se utilizaron rieles con designación R400HT y ruedas con designación E8 según especificaciones UNE-EN 13674 y UNE-EN 13262:2004 respectivamente.

La caracterización microestructural de los aceros de rueda y riel se llevó a cabo usando un microscopio óptico (LOM). Para el análisis metalográfico las muestras fueron cortadas y desbastadas con papeles abrasivos hasta granulometría 2000, después se realizó pulido en paño con partículas abrasivas de alúmina de 12.5 μm y de diamante de 1 μm (Norma ASTM – E3 “Pulido de muestras metalográficas”). En las muestras pulidas se llevó a cabo análisis de inclusiones no metálicas según norma ASTM E45-13 y después se realizó un ataque químico con el reactivo Nital al 2%. Las imágenes de luz reflejada fueron adquiridas con un microscopio NIKON serie ECLIPSE LV100.

Se procedió a caracterizar los materiales de los rieles y la rueda de la siguiente forma:

48 Influencia de las condiciones de esmerilado sobre la aparición de capa blanca en rieles tipo R400HT para uso en el Metro de Medellín

A. Caracterización rueda E8

La composición química de la rueda E8 se muestra en la **Tabla 3- 1**. Para el análisis se empleó un espectrómetro de emisión óptica Shimadzu modelo OES 5500 instalado en la Universidad de Antioquia.

En la **Tabla 3- 1** se puede observar la composición química de las ruedas E8, dicha clasificación se confirma con la normativa que la soporta: UNE-EN 13262:2004 “Aplicaciones ferroviarias. Ejes montados, bogíes y ruedas. Requisito de producto” [67], Ver **Tabla 3- 2**.

Tabla 3-1: Composición química % en peso, rueda E8. Espectrometría de emisión óptica UdeA.

Elemento	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo	Cu
Rueda	0.54	0.232	0.745	0.004	0.014	0.114	0.172	0.05	0.225

Tabla 3-2: Composición química para rueda ER8 según la norma UNE-EN 13262:2004 [67].

Steel grade	Maximum content in % ^a										
	C	Si	Mn	P ^b	S ^{bc}	Cr	Cu	Mo	Ni	V	Cr + Mo + Ni
ER6	0,48	0,40	0,75	0,020	0,015	0,30	0,30	0,08	0,30	0,06	0,50
ER7	0,52	0,40	0,80	0,020	0,015	0,30	0,30	0,08	0,30	0,06	0,50
ER8	0,56	0,40	0,80	0,020	0,015	0,30	0,30	0,08	0,30	0,06	0,50
ER9	0,60	0,40	0,80	0,020	0,015	0,30	0,30	0,08	0,30	0,06	0,50

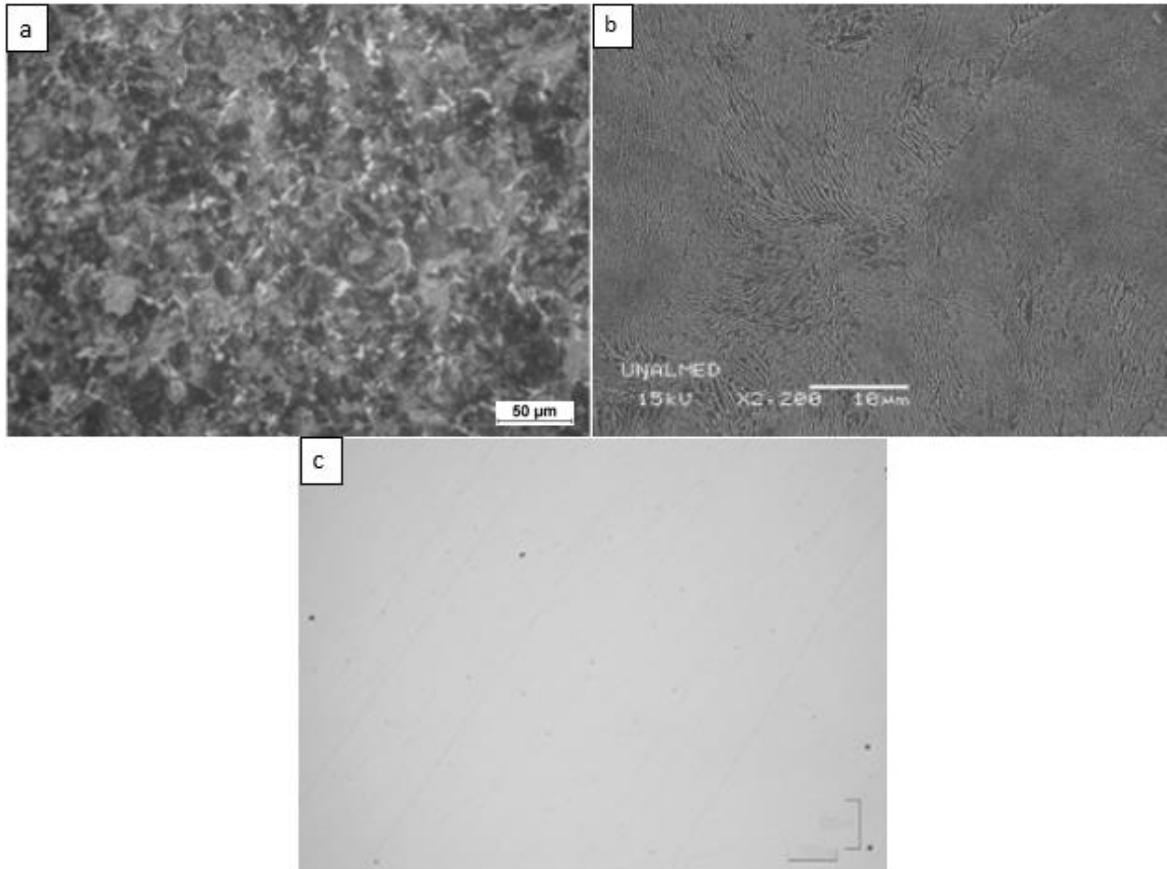
^a For special applications, variations within the maximum limit of these values may be agreed.

^b A maximum phosphorus content of 0,025% may be agreed at the time of enquiry and the order.

^c A minimum sulfur content may be agreed at the time of enquiry and the order according to the steelmaking process in order to safeguard against hydrogen cracking.

El análisis de inclusiones reveló la presencia de óxidos globulares, ver la **Figura 3- 4 (a)**. En la micrografía mostrada en la **Figura 3- 4 (b)** se alcanza a percibir una microestructura perlítica con granos ferríticos proeutectoides (regiones más claras en la imagen), lo que es acorde al contenido de carbono que se especificó en el análisis químico del material. En la micrografía mostrada en la **Figura 3- 4 (c)** se observa las láminas de perlita. Esta microestructura alcanza una dureza promedio de 245 ± 1 HV a una carga de 31.25 kgf y con una desviación estándar de 9.7

Figura 3-4: Imágenes rueda E8. (a) Microestructura de la rueda pulida con ataque químico. LOM. (b) Láminas de perlita. SEM. (c) Aspecto de la muestra pulida sin ataque químico. LOM.



B. Caracterización riel R400HT

La composición química del riel R400HT se muestra en la **Tabla 3- 3**. Para este análisis, se empleó un espectrómetro de emisión óptica BRUKER Q8 MAGELLAN instalado en la Universidad de Antioquia.

Tabla 3-3: Composición química % en peso, riel R400HT. Espectrometría de emisión óptica - UdeA.

Elemento	% en peso	Elemento	% en peso
Carbono (C)	0.931	Cobalto (Co)	0.0050
Silicio (Si)	0.251	Niobio (Nb)	0.0038
Manganeso (Mn)	1.269	Plomo (Pb)	0.00046
Fósforo (P)	0.0095	Antimonio (Sb)	0.0034
Azufre (S)	0.022	Estaño (Sn)	0.0028
Cromo (Cr)	0.275	Tantalio (Ta)	0.0090
Molibdeno (Mo)	0.0068	Titanio (Ti)	0.0024
Níquel (Ni)	0.015	Vanadio (V)	0.0035

50 **Influencia de las condiciones de esmerilado sobre la aparición de capa blanca en rieles tipo R400HT para uso en el Metro de Medellín**

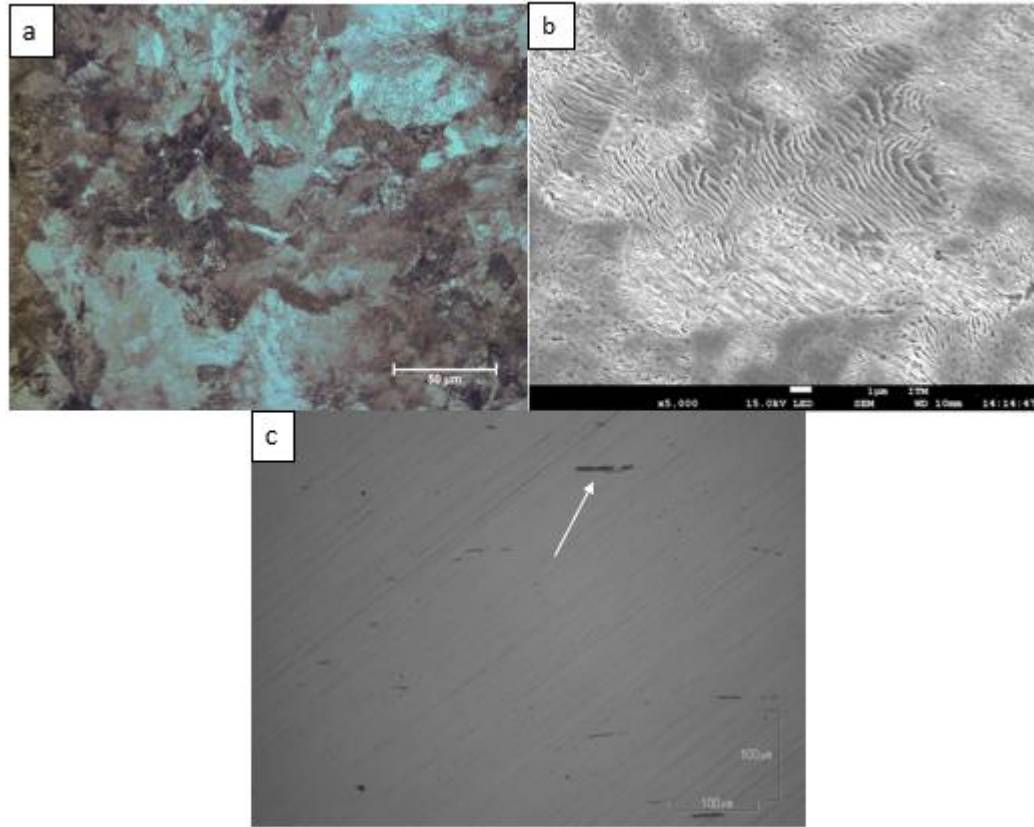
Cobre (Cu)	0.017	Tungsteno (W)	0.150
Aluminio (Al)	<0.00020	Zirconio (Zr)	<0.00050
Arsénico (As)	0.0037	Calcio (Ca)	0.0022
Boro (B)	0.00053		

Tabla 3-4: Composición química para riel R400 HT según la norma UNE-EN 13674-1 [66].

Grado		% en masa								
Acero	Muestra	C	Si	Mn	P máx.	S máx.	Cr	Al máx.	V máx.	N máx.
R200	Líquido	0,40 a 0,60	0,15 a 0,58	0,70 a 1,20	0,035	0,035	≤ 0,15	0,004	0,030	0,009
	Sólido	0,38 a 0,62	0,13 a 0,60	0,65 a 1,25	0,040	0,040	≤ 0,15	0,004	0,030	0,010
R220	Líquido	0,50 a 0,60	0,20 a 0,60	1,00 a 1,25	0,025	0,025	≤ 0,15	0,004	0,030	0,009
	Sólido	0,48 a 0,62	0,18 a 0,62	0,95 a 1,30	0,030	0,030	≤ 0,15	0,004	0,030	0,010
R260	Líquido	0,62 a 0,80	0,15 a 0,58	0,70 a 1,20	0,025	0,025	≤ 0,15	0,004	0,030	0,009
	Sólido	0,60 a 0,82	0,13 a 0,60	0,65 a 1,25	0,030	0,030	≤ 0,15	0,004	0,030	0,010
R260Mn	Líquido	0,55 a 0,75	0,15 a 0,60	1,30 a 1,70	0,025	0,025	≤ 0,15	0,004	0,030	0,009
	Sólido	0,53 a 0,77	0,13 a 0,62	1,25 a 1,75	0,030	0,030	≤ 0,15	0,004	0,030	0,010
R320Cr	Líquido	0,60 a 0,80	0,50 a 1,10	0,80 a 1,20	0,020	0,025	0,80 a 1,20	0,004	0,18	0,009
	Sólido	0,58 a 0,82	0,48 a 1,12	0,75 a 1,25	0,025	0,030	0,75 a 1,25	0,004	0,20	0,010
R350HT	Líquido	0,72 a 0,80	0,15 a 0,58	0,70 a 1,20	0,020	0,025	≤ 0,15	0,004	0,030	0,009
	Sólido	0,70 a 0,82	0,13 a 0,60	0,65 a 1,25	0,025	0,030	≤ 0,15	0,004	0,030	0,010
R350LHT	Líquido	0,72 a 0,80	0,15 a 0,58	0,70 a 1,20	0,020	0,025	≤ 0,30	0,004	0,030	0,009
	Sólido	0,70 a 0,82	0,13 a 0,60	0,65 a 1,25	0,025	0,030	≤ 0,30	0,004	0,030	0,010
R370CrHT	Líquido	0,70 a 0,82	0,40 a 1,00	0,70 a 1,10	0,020	0,020	0,40 a 0,60	0,004	0,030	0,009
	Sólido	0,68 a 0,84	0,38 a 1,02	0,65 a 1,15	0,025	0,025	0,35 a 0,65	0,004	0,030	0,010
R400HT	Líquido	0,90 a 1,05	0,20 a 0,60	1,00 a 1,30	0,020	0,020	≤ 0,30	0,004	0,030	0,009
	Sólido	0,88 a 1,07	0,18 a 0,62	0,95 a 1,35	0,025	0,025	≤ 0,30	0,004	0,030	0,010

Los porcentajes suministrados en la **Tabla 3- 3** confirman la clasificación del material usado en los ensayos tribológicos, según la norma UNE-EN 13674 “Aplicaciones ferroviarias. Vías y Carriles” [66], ver **Tabla 3- 4**. En la **Figura 3- 5** (a) se muestran zonas representativas de las inclusiones presentes en el acero del riel R400HT. En la muestra analizada se visualizan inclusiones de sulfuros de serie delgada tipo A con severidad 2.0. No se observaron inclusiones tipo silicatos o aluminatos.

Figura 3-5: Imágenes del riel R400HT. (a) Aspecto general de la microestructura del riel R400HT. LOM, (b) Detalle de las láminas de perlita. SEM, (c). Detalle de inclusiones no metálicas tipo sulfuros en el riel R400HT. LOM



La microestructura del acero de riel R400HT, mostrada en la **Figura 3- 5** (b), está compuesta por perlita fina (regiones oscuras) y ferrita (regiones claras). **Figura 3- 5** (c), se observan colonias de perlita sin una orientación preferencial, de igual manera la ferrita presentó una distribución aleatoria, sin preferencia para la formación de redes intergranulares ni agregados de gran tamaño. En términos generales, esta microestructura presenta una dureza promedio de 444 ± 1 HV a una carga de 31.25 kgf y con una desviación estándar de 12.2.

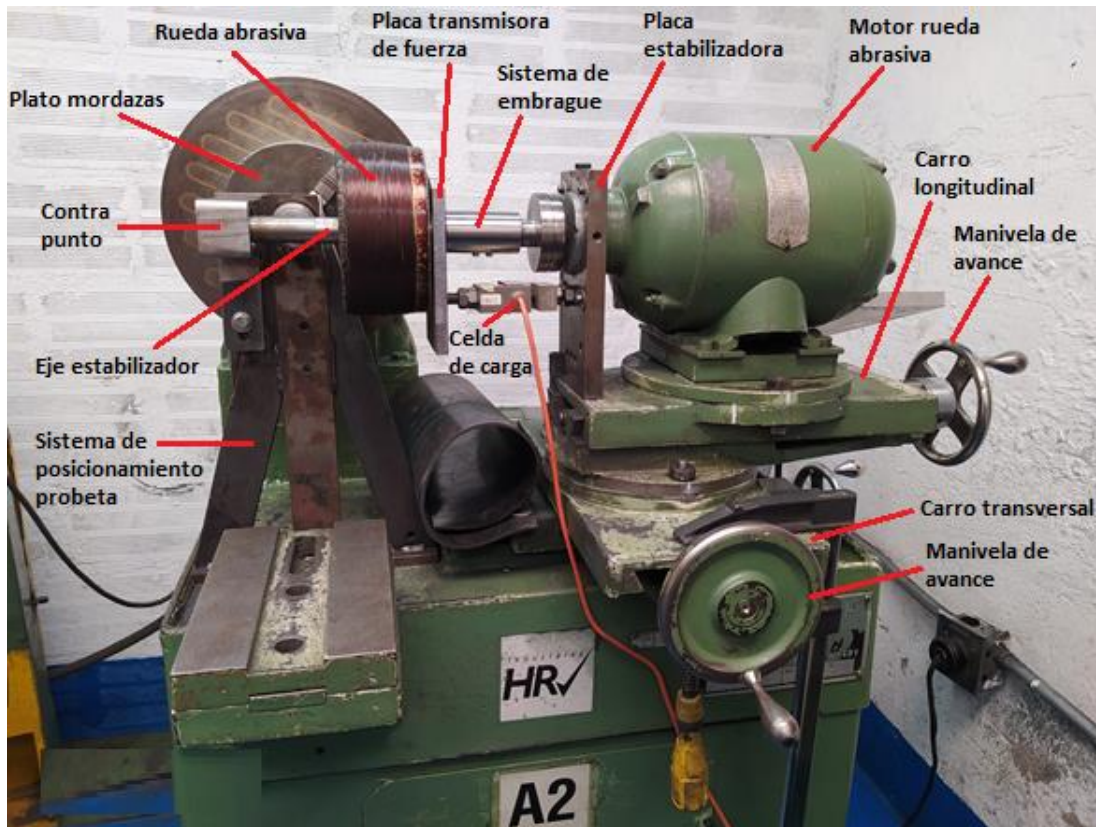
3.2 Pruebas de esmerilado

3.2.1 Procedimiento general de esmerilado

Los ensayos de esmerilado en las probetas que representan el riel se realizaron en el montaje mostrado en la **Figura 3- 6**. La máquina de ensayos está instalada en la empresa Industrias HRV S.A.S en Medellín – Antioquia.

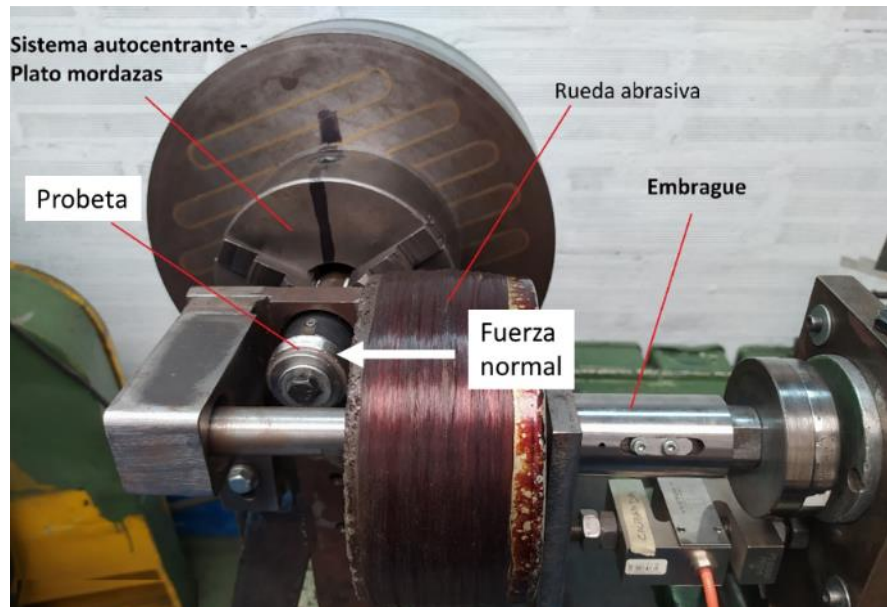
52 Influencia de las condiciones de esmerilado sobre la aparición de capa blanca en rieles tipo R400HT para uso en el Metro de Medellín

Figura 3-6: Aspecto general de la máquina utilizada para las pruebas de esmerilado.

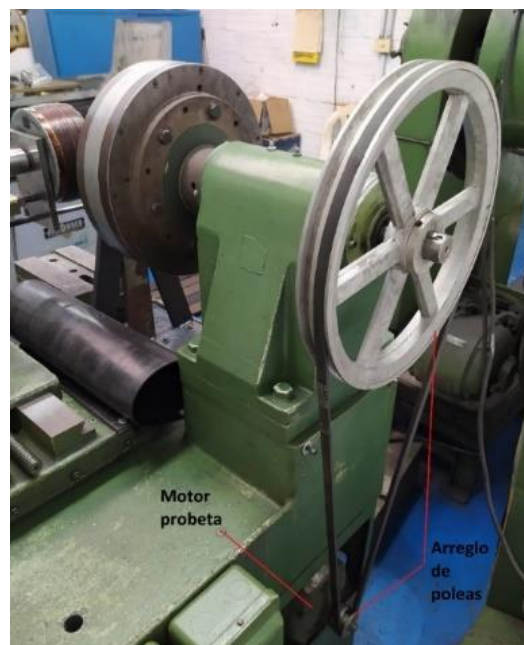


La probeta es posicionada en un sistema autocentrante (Plato de mordazas) similar al de un torno, mientras que la rueda abrasiva suministrada por el Metro de Medellín se acopla al eje del motor eléctrico por medio de un dispositivo que permite mantener el movimiento rotacional, así como un movimiento axial al mismo tiempo (Embrague), ver **Figura 3- 7**.

La rueda abrasiva es la misma utilizada por el metro de Medellín, con diámetro exterior de 150 mm, diámetro interior de 50 mm y espesor de 80 mm. El material abrasivo de la rueda se compone de óxido de aluminio con granulometría de 16 partículas por cm^2 , la unión es tipo resinoide. Las ruedas abrasivas tienen un número de estructura de 12. El grado de la rueda abrasiva se considera como una medida de la resistencia de la unión a la ruptura (y la posterior liberación de granos abrasivos) en las operaciones de esmerilado y para este caso específico es (S).

Figura 3-7: Sistema autocentrante y embrague.

El eje de la probeta a ensayar es perpendicular al eje de la rueda abrasiva y ambos tienen un movimiento rotativo independiente. La velocidad de rotación del motor que sostiene la piedra abrasiva es constante a 3600 RPM, mientras la velocidad de rotación de la probeta se puede variar de acuerdo al arreglo de poleas que están entre el motor y el plato autocentrante, como se puede observar en la **Figura 3-8**.

Figura 3-8: Sistema de transmisión de velocidad angular probeta (Arreglo de poleas).

54 Influencia de las condiciones de esmerilado sobre la aparición de capa blanca en rieles tipo R400HT para uso en el Metro de Medellín

El sistema donde se acopla la probeta solo permite que tenga un movimiento rotacional a diferencia del sistema donde se monta la rueda abrasiva, ya que el motor está acoplado a una mesa que puede tener movimiento transversal, rotacional y longitudinal, este último permite aplicar la profundidad de corte por medio de un sistema manual de tornillo y manivela, ver **Figura 3- 9**.

Una vez se establece una profundidad de corte se mide la fuerza aplicada a la probeta por la rueda abrasiva. Esta medición se hace por medio de una celda de carga ubicada entre el motor y la rueda abrasiva, los valores obtenidos se visualizan en el visor dispuesto para dicho montaje que conectado a un computador brinda la posibilidad de guardar los datos de fuerza en función del tiempo. Además, se obtienen de forma indirecta datos de tiempo con el uso de un reloj digital y la velocidad angular de la probeta por medio de un tacómetro, ver **Figura 3-10** y **Figura 3- 11**.

Figura 3-9: Sistema aplicación de profundidad de corte a la probeta.



Figura 3-10: Sistema toma de medidas.**Figura 3-11:** Conexión del computador portátil al display de la celda de carga.

3.2.2 Diseño del experimento

Para definir los parámetros y variables de esmerilado a utilizar en el laboratorio se verificaron las condiciones del esmerilado en campo. Por lo tanto, en la fase de exploración experimental, los ensayos se realizaron simulando 4 condiciones de esmerilado, donde se variaron las RPM de acuerdo con las velocidades lineales seleccionadas de 1.5 km/h y 5 km/h, teniendo así dos primeras condiciones, para las otras condiciones se fijaron dos valores de fuerza las cuales fueron 7 kgf y 10 kgf. Una vez seleccionados los factores se determinó un conjunto de 2 niveles para cada factor, obteniendo un arreglo de experimentos 2^2 , con dos réplicas (ver **Tabla 3- 5**). Las condiciones generales del experimento realizado se muestran esquemáticamente en la **Figura 3- 1**. Por lo tanto, se definieron las cuatro condiciones para realizar la experimentación: esmerilado con alta velocidad (5 km/h) y alta aplicación de fuerza (10 kgf) (HV-HL), esmerilado de alta velocidad (5 km/h) y baja aplicación de fuerza (7 kgf) (HV-LL), esmerilado

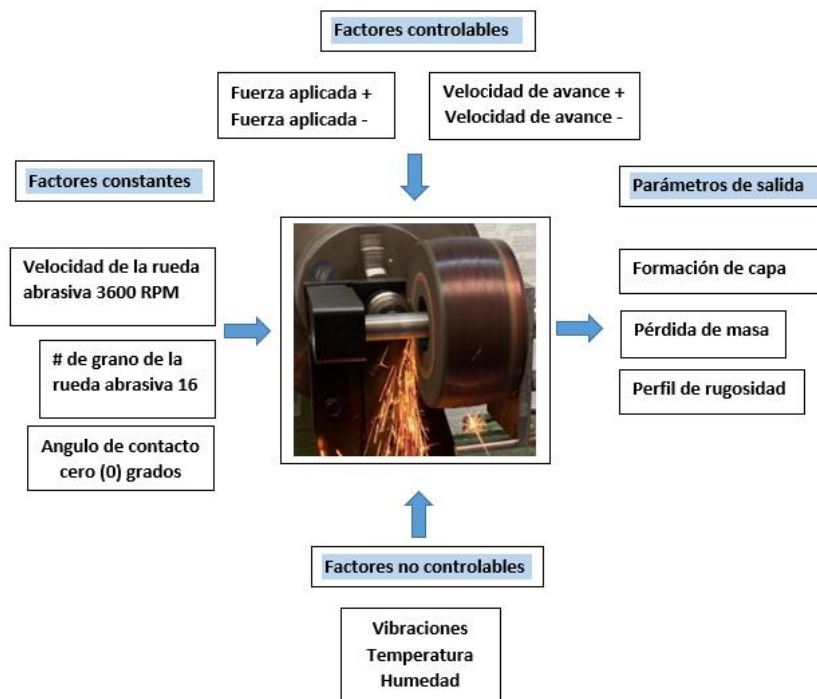
56 Influencia de las condiciones de esmerilado sobre la aparición de capa blanca en rieles tipo R400HT para uso en el Metro de Medellín

con baja velocidad (1.5 km/h) y alta aplicación de fuerza (10 kgf) (LV-HL) y esmerilado con baja velocidad (1.5 km/h) y baja aplicación de fuerza (7 kgf) (LV-LL).

Tabla 3-5: Factores considerados en la exploración experimental.

Factores	Dominio Experimental	
	Nivel (-)	Nivel (+)
Velocidad lineal	1.5 km/h	5 km/h
Fuerza aplicada	7 kgf	10 kgf

Figura 3-12: Condiciones generales del experimento de esmerilado.



3.2.3 Caracterización de las muestras

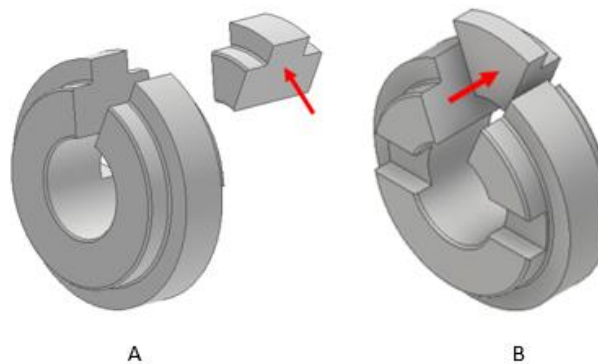
Al final de la etapa anterior se obtuvieron las probetas con las condiciones iniciales para las pruebas de esmerilado con la geometría indicada según la **Figura 3- 3**. En la fase de experimentación se realizaron los ensayos con los parámetros propuestos para dicha fase, ver **Tabla 3- 5**. Todo esto con el único fin de identificar la existencia o no de capa blanca. Una vez que fue garantizada la existencia de la capa blanca con los parámetros usados, se sigue con la experimentación de fatiga de contacto donde las probetas esmeriladas sirven como insumo para las pruebas en el tribómetro tipo disco-disco.

Una vez realizados los esmerilados descritos en la **Tabla 3- 5**, se hicieron los cortes como lo muestra la **Figura 3- 13**, esto con el fin de realizar el análisis metalográfico en las direcciones mostradas por las flechas, el procedimiento se realizó según la norma ASTM – E3 “Pulido de muestras metalográficas” siguiendo el proceso descrito en el numeral 3.1.1. Antes de comenzar el pulido las muestras se limpiaron con ultrasonido durante 5 minutos en un baño de alcohol.

A cuatro muestras que representan las variables utilizadas en las pruebas de esmerilado, ósea una por cada condición, se les realizaron mediciones de microdureza bajo la superficie, estas mediciones se llevaron a cabo en un microdurómetro SHIMADZU serie M con una resolución de 0.5 μm y con una carga de 0.05 kgf y sostenidas 10 s siguiendo los lineamientos de la norma ASTM E-384-09.

En la experimentación se tomaron tres perfiles de rugosidad de 4 muestras que representan las variables utilizadas en las pruebas, ósea una por cada condición. Cabe anotar que se hizo antes y después de cada ensayo, para ello se utilizó la estación de rugosidad marca Mitutoyo SurfTest SV 3000. Además, para los esmerilados realizados se tomaron medidas de peso a cada probeta antes y después de cada ensayo, esto con el fin de calcular la pérdida de masa obtenida por el esmerilado.

Figura 3-13: Obtención de muestra para análisis metalográfico transversal(A) y longitudinal(B).



3.3 Ensayos tribológicos

3.3.1 Procedimiento general tribómetro disco-disco

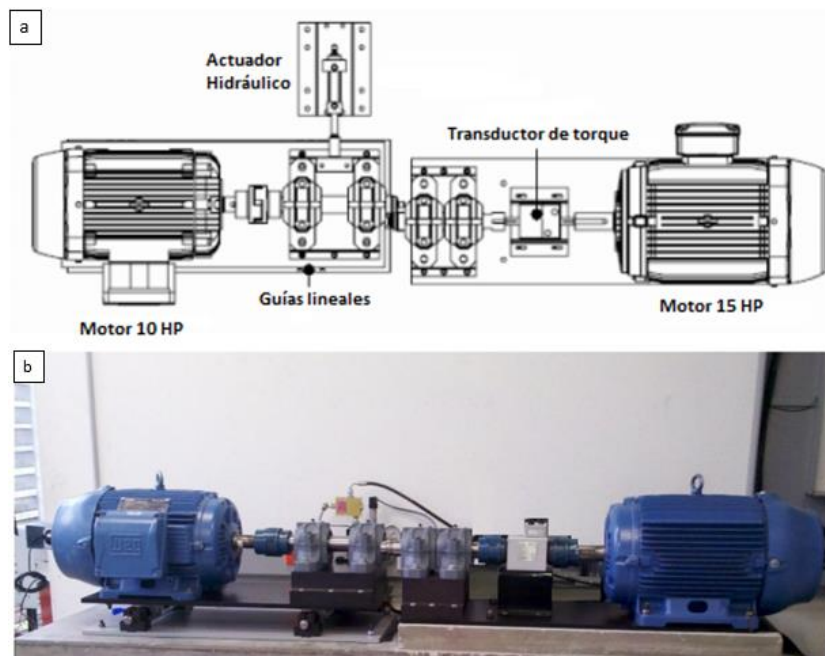
Los ensayos de fatiga de contacto se realizaron en un tribómetro del tipo disco-disco disponible en el laboratorio de Tribología y Superficies de la Facultad de Minas de la

58 Influencia de las condiciones de esmerilado sobre la aparición de capa blanca en rieles tipo R400HT para uso en el Metro de Medellín

Universidad Nacional de Colombia, el cual se muestra en las **Figura 3- 14 (a)** y **Figura 3- 14 (b)**. En la **Figura 3- 14 (a)** se detalla la posición de los motores, del sistema hidráulico, del sistema de guías lineales y del transductor de torque de este dispositivo; en la **Figura 3- 14 (b)** se muestra la imagen real del dispositivo.

Los ejes de las probetas a ensayar son paralelos entre sí y tienen un movimiento rotativo independiente. Las revoluciones son dadas por dos motores de 10 Hp y 15 Hp. Cada uno de los motores posee un variador vectorial que permite controlar la velocidad angular de cada uno de ellos; el motor de menor potencia mecánica está acoplado a una mesa móvil soportada sobre dos guías lineales que permiten el movimiento para aplicar la presión de contacto. En la misma mesa móvil está fijo un actuador hidráulico, con el que se aplica la carga entre las probetas hasta un valor de 1000 kgf. Esta medición se hace por medio de una celda de carga ubicada al final del vástago y su valor se visualiza en el computador que fue adaptado para tal fin. El otro motor está anclado a una mesa fija, sobre el eje de dicho motor está acoplado un transductor de torque con el que se mide la fuerza de tracción y los datos son almacenados en línea en el computador anteriormente mencionado.

Figura 3-14: (a) Esquema máquina disco sobre disco. (B) Imagen real del dispositivo.



3.3.2 Diseño del experimento

Para definir las condiciones tribológicas se hicieron pruebas experimentales en sistemas rueda-riel bajo condiciones controladas en laboratorio. En operación rutinaria el Metro de Medellín puede alcanzar presiones de contacto elevadas en la intercara rueda-riel, en algunos casos por encima de 1 GPa, con estos datos fue posible definir cuál era la forma idónea de realizar los ensayos que contiene esta investigación, llegando a la conclusión que se describe a continuación.

La duración total de los ensayos fue 20k ciclos, repartidos de la siguiente forma: 8k ciclos en seco + 12k ciclos con agua desionizada a una tasa de 0,125 g por segundo, para buscar una presurización del sistema y así "acelerar" la fatiga. El esfuerzo aplicado en el ensayo tribológico fue 1.1 GPa, y el porcentaje de deslizamiento fue 1%, para alcanzar dicho valor de deslizamiento, se utilizó una velocidad de rotación de la rueda de 400 RPM y una velocidad de rotación del riel de 396 RPM.

Estos ensayos permiten evaluar la respuesta a la fatiga de las probetas de forma acelerada mediante el uso del mecanismo de presurización con agua con el fin de evitar la realización de ensayos de larga duración (más de 100k ciclos) que son tediosos, muy demandantes para la máquina de ensayos y frecuentemente generan resultados con mucha dispersión. La carga utilizada se definió a partir de las presiones de contacto presentes en el sistema ferroviario de la ciudad de Medellín que están en un valor entre 0.8 GPa y 1.1 GPa. Considerando el área de contacto de los cuerpos de prueba, la carga de 360 ± 5 kgf que es la requerida para alcanzar 1.1 GPa.

Para definir el diseño experimental fue necesario identificar los factores que intervenían en el proceso de desgaste en el contacto rueda riel, tanto fijos como variables. Se definió de manera exploratoria un total de un factor para la experimentación en pruebas de laboratorio: Riel R400HT, y una vez seleccionado el factor se determinó un conjunto de 2 niveles, con capa blanca y sin capa blanca, cabe notar que el nivel de capa blanca proviene de un arreglo experimental de 2^2 dado por la experimentación previa de esmerilado que suministra las probetas para los ensayos de fatiga de contacto en la de disco-disco. Ver **Tabla 3- 6**.

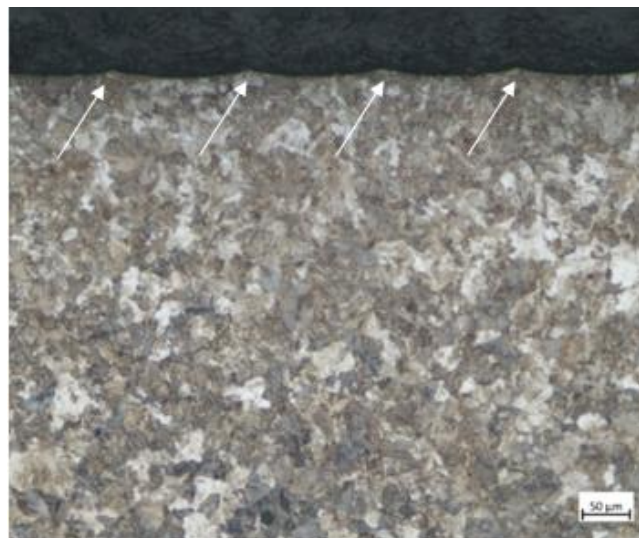
60 Influencia de las condiciones de esmerilado sobre la aparición de capa blanca en rieles tipo R400HT para uso en el Metro de Medellín

Tabla 3-6: Factores considerados en el diseño experimental.

Factores	Dominio Experimental	
	Nivel (-)	Nivel (+)
Riel R400HT	Sin capa blanca	Con capa blanca

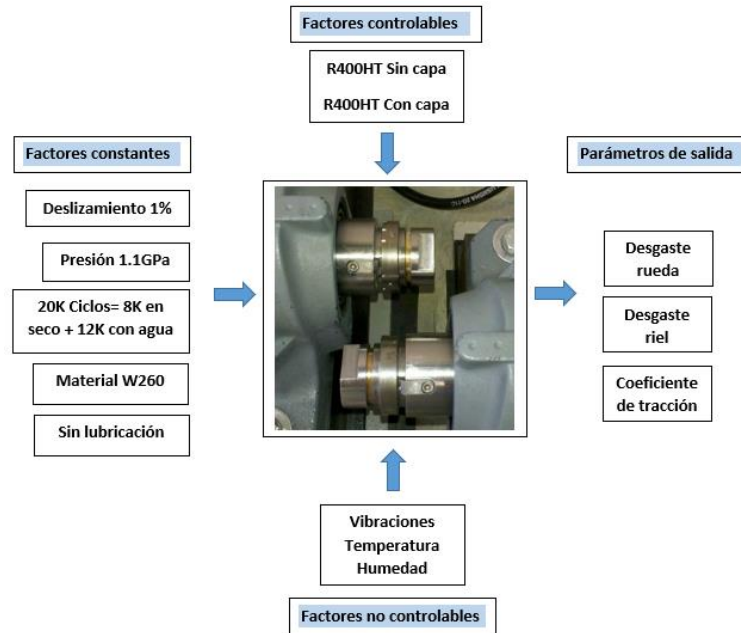
Las probetas que tienen capa blanca fueron obtenidas con las condiciones de esmerilado dadas en la **Tabla 3- 5**. Por otro lado, las probetas sin capa blanca fueron torneadas, se verificó mediante análisis metalográfico que no existe capa blanca en su superficie, ver **Figura 3- 15**. La **Figura 3- 15** muestra la estructura perlítica típica del acero R400HT después del proceso de torneado con el cual se extraen las probetas que se utilizaron en los experimentos propuestos para el presente trabajo. La imagen fue tomada desde un microscopio óptico (LOM) a 50X. En dicha imagen se evidencian crestas propias del proceso de torneado, ver flechas blancas, no se evidencia presencia de capa blanca en la superficie que fue torneada, por lo tanto, se concluye que ese tipo de mecanizado no promueve la aparición de capa blanca en el riel R400HT.

Figura 3-15: Riel R400HT después de un proceso de torneado. Imagen tomada en microscopio óptico (LOM).



Las condiciones generales del experimento realizado se muestran esquemáticamente en la **Figura 3- 16**.

Figura 3-16: Condiciones generales del experimento tribológico.



Para desarrollar los ensayos se establecieron los parámetros de carga, porcentaje de deslizamiento y velocidad angular en el tribómetro según los parámetros y variables definidos en el diseño de experimentos como se muestra en la **Tabla 3- 7**.

Tabla 3-7: Definición de los parámetros fijos y variables del ensayo.

Parámetros fijos	
Porcentaje de deslizamiento	1%
Presión de contacto	1.1 GPa.
Numero de ciclos	20k (8k en seco +12k con agua)
Material rueda	Rueda E8
Variables	
Material del riel	R400HT sin capa R400HT con capa

3.3.3 Caracterización de las muestras

Luego de tener las probetas con las condiciones necesarias para realizar las pruebas en el tribómetro disco-disco, se procedió a verificar las condiciones ambientales (humedad y temperatura) seguido del establecimiento de los parámetros de carga, porcentaje de deslizamiento y velocidad angular en dicho tribómetro.

62 Influencia de las condiciones de esmerilado sobre la aparición de capa blanca en rieles tipo R400HT para uso en el Metro de Medellín

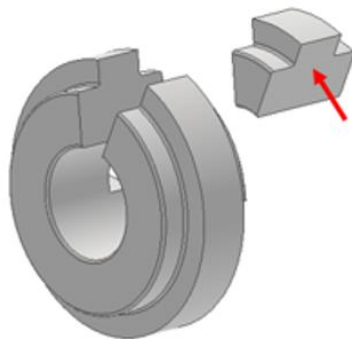
Cuando la probeta fue ensayada hasta el número de ciclos de interés, se le realizó una limpieza con ultrasonido durante 5 minutos en un baño de alcohol con el fin de desprender virutas y suciedades que hicieran parte de la misma. La pérdida de masa se midió en una balanza con una resolución (1/10000) g marca CP225D Sartorius.

La medición de torque se hizo para cada una de las pruebas ya definidas durante los 20K ciclos de duración de las mismas, esto fue posible por medio de un transductor de torque y con estos datos se determinó el valor del coeficiente de tracción (COT).

Cambios microestructurales: Cada muestra metalográfica extraída de las probetas de ensayo se analizó en cortes longitudinal y transversal con respecto a la dirección de giro, ver **Figura 3- 13**, con el propósito de identificar los inicios de la falla y su evolución en el tiempo, para esto se usó microscopio estereoscópico Leica GZ6, microscopio NIKON serie ECLIPSE LV100 con cámara digital adaptada a éste (Digital Sight DS-2Mv) y el microscopio electrónico de barrido JEOL JSM 5910LV instalados en el Laboratorio de Tecnología y Diseño de Materiales y en el de Microscopía Avanzada respectivamente, buscando establecer relaciones entre mecanismos de desgaste y fallas en la microestructura, vale aclarar que la preparación metalográfica fue igual a la realizada para el análisis de las microestructuras iniciales del ensayo de esmerilado.

Microdureza bajo la superficie: En este trabajo se realizaron mediciones de microdureza bajo la superficie, en un corte longitudinal con respecto a la dirección de giro (**Figura 3- 17**), estas mediciones se llevaron a cabo en un microdurómetro SHIMADZU serie M con una resolución de 0.5 μm y con una carga de 0.05 kgf sostenida 10 segundos, siguiendo los lineamientos de la norma ASTM E-384-09.

Figura 3-17: Obtención de muestra para la realización de mediciones de microdureza.



4. Capítulo 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis de las muestras esmeriladas

4.1.1 Calidad superficial

De acuerdo a la metodología propuesta en el capítulo 3, los ensayos se realizaron simulando 4 condiciones de esmerilado ver **Tabla 4- 1**.

Tabla 4-1: Descripción de condiciones de experimentación en el esmerilado.

Material	Velocidad lineal	Fuerza aplicada	Condición
R400HT	1.5km/h	7kgf	LV-LL
R400HT	1.5km/h	10kgf	LV-HL
R400HT	5km/h	7kgf	HV-LL
R400HT	5km/h	10kgf	HV-HL

La **Figura 4- 1** muestra la curva de fuerza en el tiempo durante el esmerilado y el aspecto típico de la superficie del disco después del esmerilado. La **Figura 4- 2** muestra los valores obtenidos de fuerza y tiempo con su respectiva desviación estándar. Como se observa en la **Figura 4- 1**, para cada condición se obtuvieron graficas de fuerza versus tiempo. A pesar de que la aplicación de la fuerza se realizó de forma manual los resultados están muy próximos a los valores planteados para cada experimentación como lo indica la **Figura 4- 2** y se puede concluir que se trata de unidades experimentales que poseen diferencias significativas en la fuerza aplicada.

64 Influencia de las condiciones de esmerilado sobre la aparición de capa blanca en rieles tipo R400HT para uso en el Metro de Medellín

Figura 4-1: Resultados de fuerza y acabado superficial para condición de esmerilado.

Condición 1 - R400HT (LV-LL)		
Velocidad 1.5 km/h	Fuerza aplicada 7 Kgf	Tiempo 15.4s
Condición 2 - R400HT (LV-HL)		
Velocidad 1.5 km/h	Fuerza aplicada 10 Kgf	Tiempo 15s
Condición 3 - R400HT (HV-LL)		
Velocidad 5 km/h	Fuerza aplicada 7 Kgf	Tiempo 14.5s
Condición 4 - R400HT (HV-HL)		
Velocidad 5 km/h	Fuerza aplicada 10 Kgf	Tiempo 15.3s

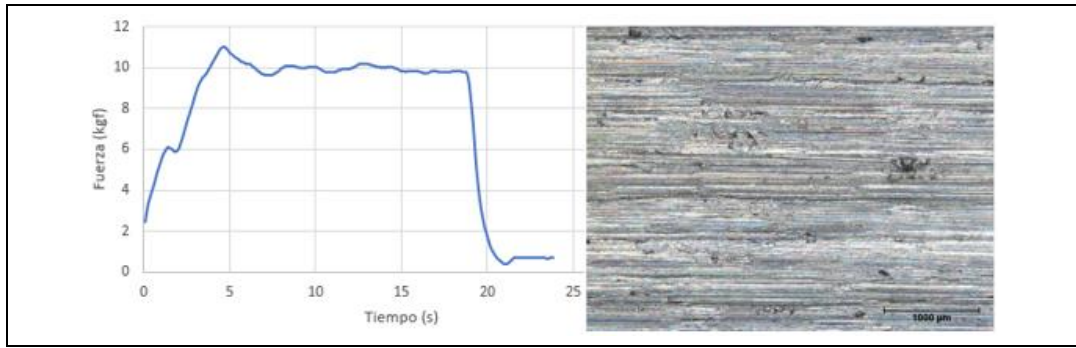
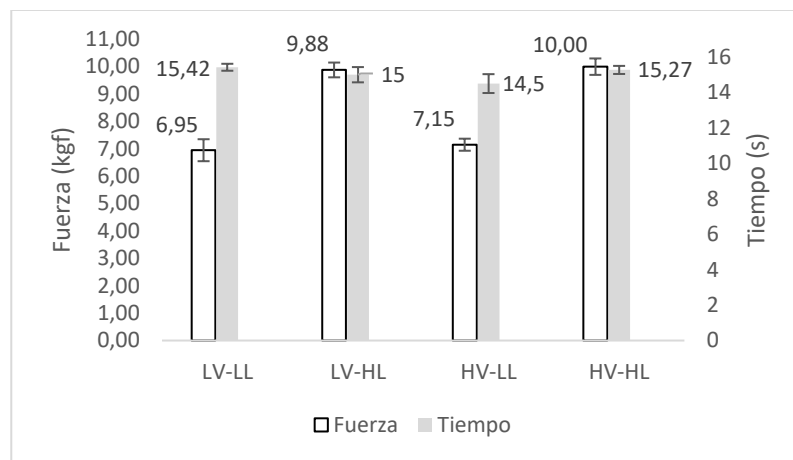


Figura 4-2: Valores obtenidos de fuerza y tiempo con su respectiva desviación estándar.



Como se muestra en la **Figura 4- 1**, el acabado superficial obtenido para cada condición fue muy similar y uniforme en toda su longitud. En todas las muestras inspeccionadas se perciben superficies desgastadas que muestran el micro corte como principal mecanismo de desgaste.

En la **Figura 4- 3** se observan las mismas superficies, pero en el microscopio electrónico de barrido (SEM), donde se puede identificar deformaciones plásticas producidas por el arado, ver flechas blancas. Este resultado está en concordancia con Wang et al [68], quienes muestran que es normal que aparezcan ranuras (arado) en la superficie del riel a lo largo de la muestra en la dirección del esmerilado, esto debido al micromecanizado realizado por las partículas de la rueda abrasiva. En la **Figura 4- 4** se observa la misma superficie, también en el microscopio electrónico de barrido donde se puede observar defectos superficiales asociados a las picaduras, ver flechas blancas. Esto está en concordancia a lo reportado por Wang et al [68], quien encontró que entre más pequeños son los granos de las ruedas abrasivas (#12 y #16),

66 **Influencia de las condiciones de esmerilado sobre la aparición de capa blanca en rieles tipo R400HT para uso en el Metro de Medellín**

estos pueden provocar defectos superficiales como picaduras más fácilmente que con granos de mayor tamaño.

Figura 4-3: Imágenes por SEM de las superficies esmeriladas para cada condición: A(LV-LL), B(LV-HL), C(HV-LL) y D(HV-HL).

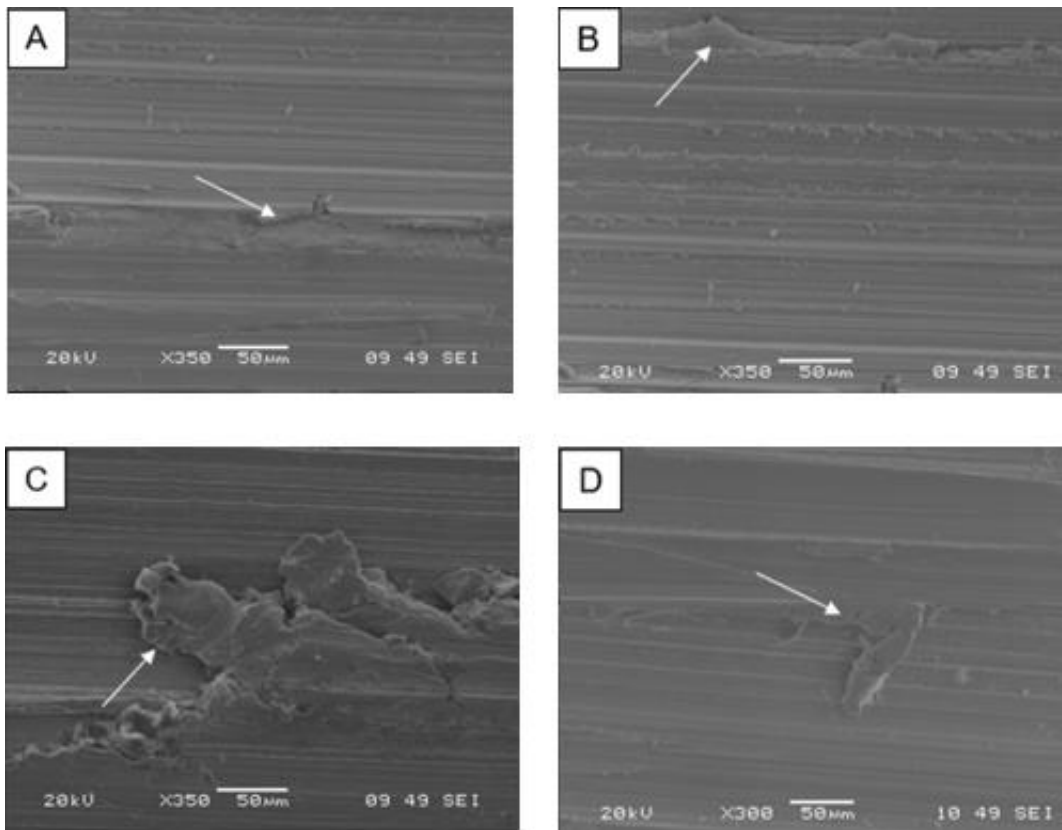
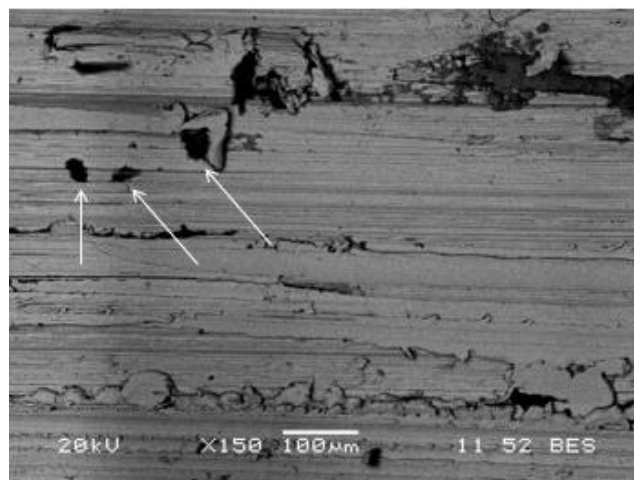


Figura 4-4: Imagen por SEM de la superficie esmerilada para cada la condición: (HV-LL).

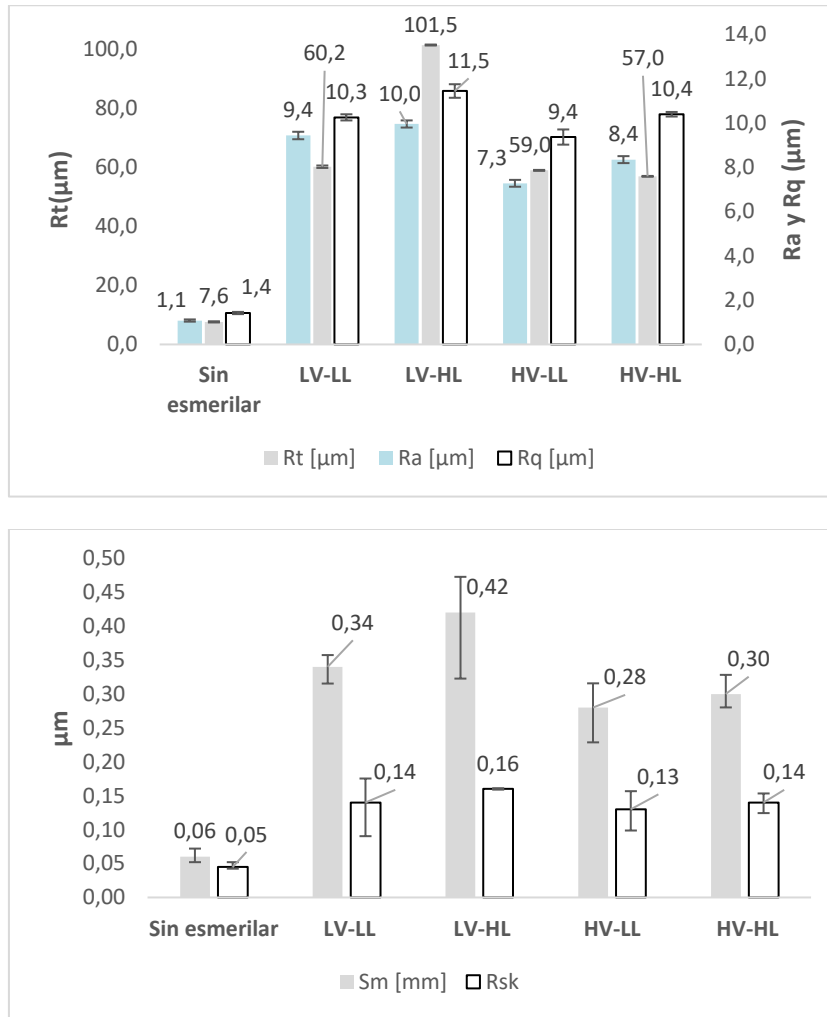


La **Figura 4- 5** muestra algunos parámetros de rugosidad y de espaciamiento entre picos para los diferentes niveles experimentales planteados. De acuerdo a la **Figura 4- 5**, es concluyente que el proceso de esmerilado tiene una gran influencia en la calidad de la superficie. Parámetros como Ra (rugosidad promedio) indican un aumento en la rugosidad promedio de hasta 9 veces comparado con la muestra sin esmerilar. El parámetro Rt (altura máxima pico-valle) indica un aumento de la altura del pico y la profundidad del valle alrededor de 13 veces para las muestras esmeriladas. El parámetro Rq (desviación cuadrática media) indica una desviación estándar moderada de la altura del pico y la profundidad del valle en comparación con Ra en todas las condiciones; sin embargo, la relación Ra/Rq para muestras esmeriladas y no esmeriladas son similares. El parámetro Sm (espaciado medio entre picos) indica que no sólo la rugosidad es mayor, sino que también es aproximadamente 7 veces más ancha la media aritmética del paso que comprende crestas y valles adyacentes en las muestras esmeriladas.

Por último, el parámetro Rsk (skewness) que indica la asimetría de la distribución de alturas, muestra que la asimetría de la muestra no esmerilada es hasta cuatro veces menor que para las muestras esmeriladas, pero se encontró una distribución más simétrica para las muestras esmeriladas. En ambos casos la asimetría es positiva y, por lo tanto, se podría esperar la altura máxima es mayor que la altura mínima, indicando esto que la superficie del acero tiene más crestas que valles. Se observa que para la condición de baja velocidad y alta carga se obtuvieron los valores de rugosidad más altos en comparación con las otras condiciones.

En general, los parámetros de rugosidad reportados son mayores para las muestras esmeriladas que para las muestras no esmeriladas lo que indica que las superficies esmeriladas son más rugosas y asimétricas. Esto puede tener un impacto negativo en las propiedades de resistencia al desgaste, ya que, en algunos casos, una mayor rugosidad puede aumentar el desgaste por fatiga de contacto debido a que las asperezas en las superficies pueden actuar como concentradores de tensiones, lo que aumenta la probabilidad de que se inicien grietas y se produzca un desgaste más rápido. En términos generales la mayor rugosidad fue obtenida con la condición LV-HL.

Figura 4-5: Parámetros de rugosidad de las muestras de rieles no esmeriladas y esmeriladas.



4.1.2 Pérdida de masa

En la **Figura 4- 6** se muestra la pérdida de masa de las probetas de riel esmeriladas por unidad de longitud para cada condición de experimentación después del esmerilado. En esta figura se observa que para la condición de baja velocidad se tuvo mayor pérdida de masa, siendo mayor para la condición de baja velocidad y alta carga (LV-HL), este resultado está en concordancia con la **Figura 4- 3** donde se observa que para esa condición hay un mejor corte en el material. Esta condición comparada con las condiciones de alta velocidad presentó casi siete veces mayor pérdida de masa. Cabe notar que, para las condiciones de alta velocidad, aunque se

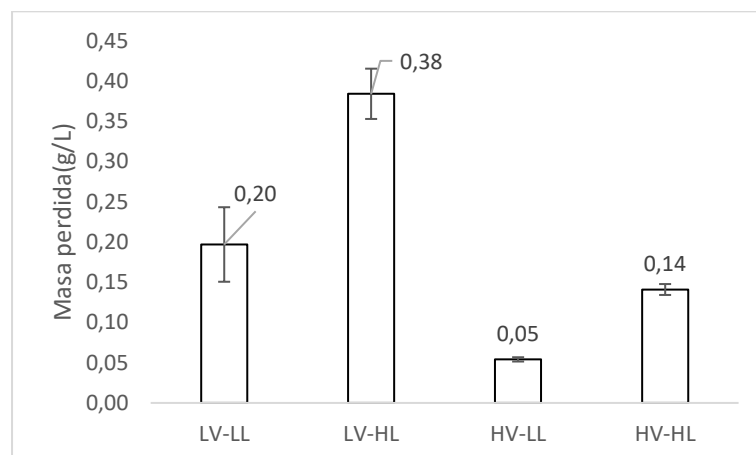
tuvieron dos regímenes de carga diferentes las pérdidas de masa fueron mayores para la condición donde se aplicó mayor carga.

En términos prácticos, la mayor remoción de material se obtuvo para bajas velocidades y altas cargas (LV-HL), al tener una baja velocidad en la rueda de esmerilar y una mayor carga, esta combinación promueve mayor cantidad de material removido, ya que la rueda de esmerilar pasa más veces por el mismo sitio; la baja velocidad permite que la herramienta tenga un contacto más prolongado con la pieza de trabajo, lo que facilita la acción de desbaste. Además, la mayor carga ejercida sobre la rueda aumenta la presión de contacto, mejorando la eficiencia del proceso de esmerilado.

Para el proceso de esmerilado el área de sección transversal de metal removido puede tomarse como constante; hay que tener en cuenta que la extracción de metal es realmente una medida volumétrica. A menudo se define como el peso (o volumen, para materiales de densidad uniforme) del material eliminado durante un período de tiempo fijo y es considerado igual al ancho de la banda de contacto multiplicado por la profundidad del metal eliminado, si esta operación se realiza con una velocidad de avance constante, se puede suponer que el área de metal removida de la sección transversal de la cabeza del riel es invariable.

Este enfoque de baja velocidad y alta carga es particularmente útil en tareas donde se busca una remoción de material más agresiva, como en procesos de desbaste inicial o cuando se trabaja con materiales más duros. [7]

Figura 4-6: Pérdida de masa por unidad de longitud para cada condición de esmerilado.

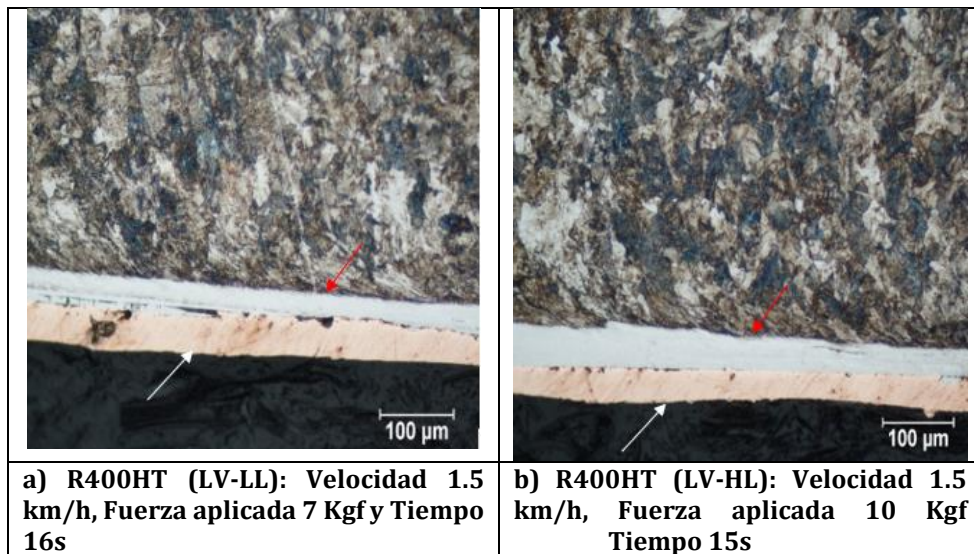


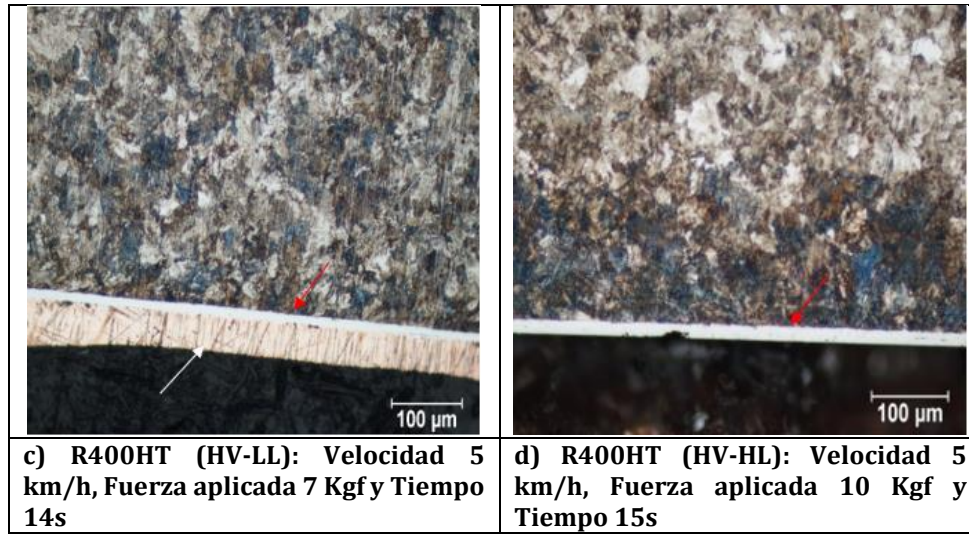
4.1.3 Microestructura

Posterior a los esmerilados realizados, se extrajeron probetas según el procedimiento planteado en el capítulo 3 con el fin de verificar la presencia de capa blanca para cada condición de experimentación. Los resultados se observan de forma resumida en la **Figura 4- 7**. Las metalografías mostradas en la **Figura 4- 7** exponen la microestructura del riel después del esmerilado. Cabe notar en algunas de las muestras se visualiza una capa de color rojo claro adyacente a la capa blanca, dicha capa es un sistema de protección realizado con cinta de cobre (ver flechas blancas). Esta protección se utilizó con el fin de evitar el desprendimiento de la capa blanca al momento de pulir la probeta.

En las micrografías se puede observar una capa blanca continua que varía en espesor según la condición de la prueba realizada, ver las flechas rojas en la **Figura 4- 7**. Se evidencia una capa deformada debajo de la capa blanca causada por los altos esfuerzos ejercidos por la rueda de esmerilar. La presencia de esta capa deformada indica que la sub-superficie sufrió deformación plástica en la microestructura perlítica, ver detalle en **Figura 4- 8**.

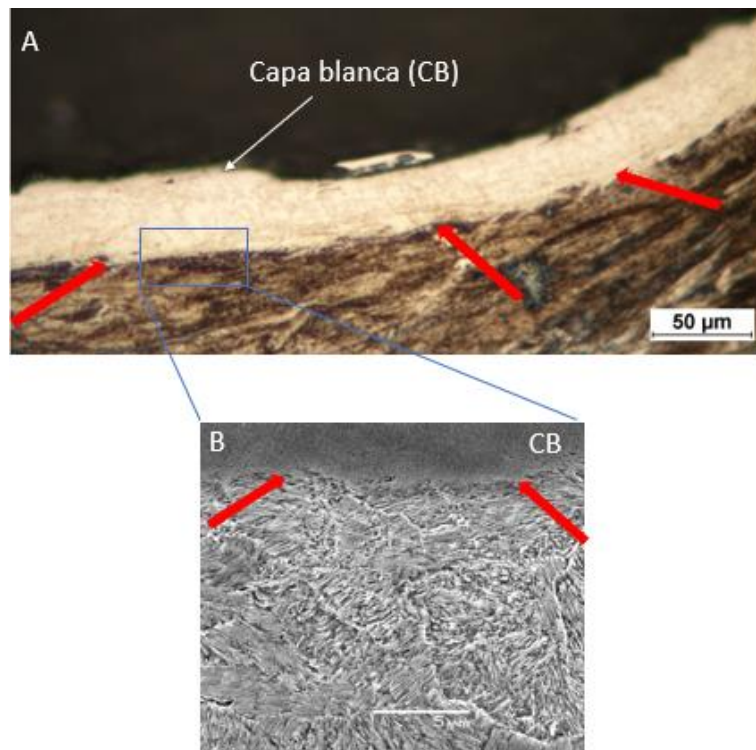
Figura 4-7: Capa blanca obtenidas para cada condición de experimentación.





La **Figura 4- 8** muestra la capa deformada justo debajo de la capa blanca, en la parte (A) vista desde un microscopio óptico (LOM) a 50X y la parte (B) vista desde un microscopio electrónico de barrido (SEM) a 5000X. Se evidencia la aparición de la capa deformada debajo de la capa blanca para las muestras esmeriladas.

Figura 4-8: Capa deformada justo debajo de la capa blanca. (A) vista desde un microscopio óptico (LOM) a 50X. (B) vista desde un microscopio electrónico de barrido (SEM) a 5000X.



72 Influencia de las condiciones de esmerilado sobre la aparición de capa blanca en rieles tipo R400HT para uso en el Metro de Medellín

La **Tabla 4- 2** muestra un resumen de los parámetros cuantitativos obtenidos después de realizar el análisis de las secciones de las muestras. De acuerdo con los resultados descritos en la **Tabla 4- 2**, se observa que el porcentaje de capa blanca encontrado en la longitud de la sección transversal de las probetas está por encima del 90% de la longitud total de las mismas; para la obtención de dicho porcentaje se midió en el microscopio óptico la longitud de la capa blanca hallada y se comparó con la longitud total de la probeta utilizada. Además, se identifica que para la condición de baja velocidad se obtuvieron los valores más altos de espesor, tanto en el promedio como en los máximos, siendo los más altos para la condición de baja velocidad (LV) y alta carga (HL).

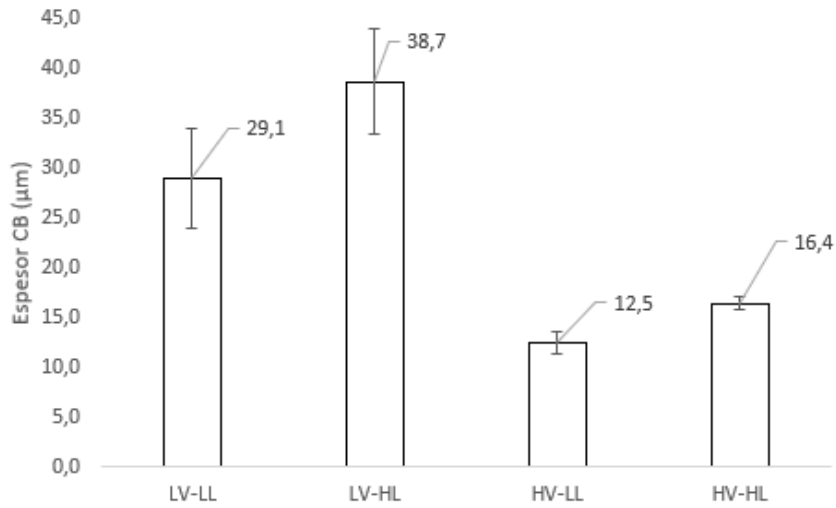
Estos resultados van en la misma línea de los encontrados por Zhou et al [69] quienes encontraron una capa blanca de 32.4 μm con una velocidad de avance de 1 km/h y un espesor de 4.2 μm para una velocidad de 4 km/h. Por lo tanto, a menor velocidad lineal se obtuvieron mayores espesores de capa blanca y al aumentar la velocidad se disminuyó el espesor para ambos experimentos.

Tabla 4-2: Características de la capa blanca obtenida para cada condición de experimentación.

Material	Condición	Longitud total sección transversal (μm)	Longitud transversal con capa blanca (μm)	Porcentaje con capa blanca en la sección transversal (%)	Promedio de espesor de capa blanca (μm)	Espesor máximo de capa blanca (μm)
R400HT-1	(1.5km/h-7kgf) LV-LL	9000 \pm 10	8356	92,8	29.05 \pm 5	30.5
R400HT-2	(1.5km/h-10kgf) LV-HL	9000 \pm 10	8539	94.9	38.7 \pm 5.3	45
R400HT-3	(5km/h-7kgf) HV-LL	9000 \pm 10	8125	90.3	12.5 \pm 1.1	14.3
R400HT-4	(5km/h-10kgf) HV-HL	9000 \pm 10	8423	93.6	16.4 \pm 0.6	18

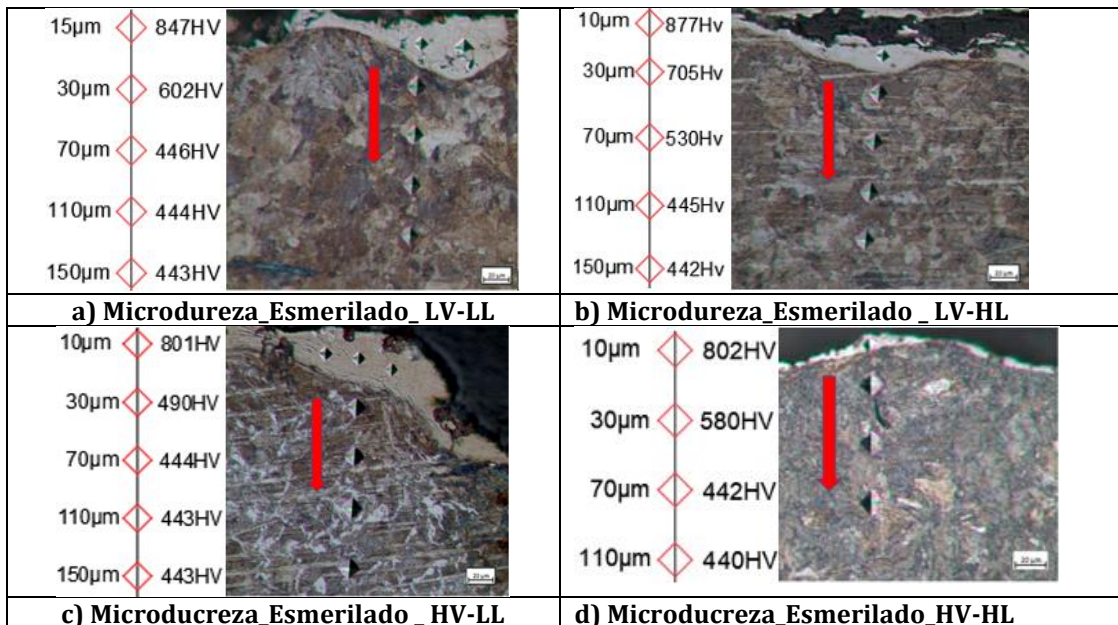
La **Figura 4- 9** muestra los valores promedio del espesor de la capa blanca (CB) con sus respectivas desviaciones estándar para cada condición de esmerilado.

Figura 4-9: Valores promedio del espesor de la capa blanca.



Los resultados de las medidas de microdureza de las muestras esmeriladas se presentan en la **Figura 4- 10**.

Figura 4-10: Perfil de microdureza en probetas esmeriladas para cada condición de experimentación.

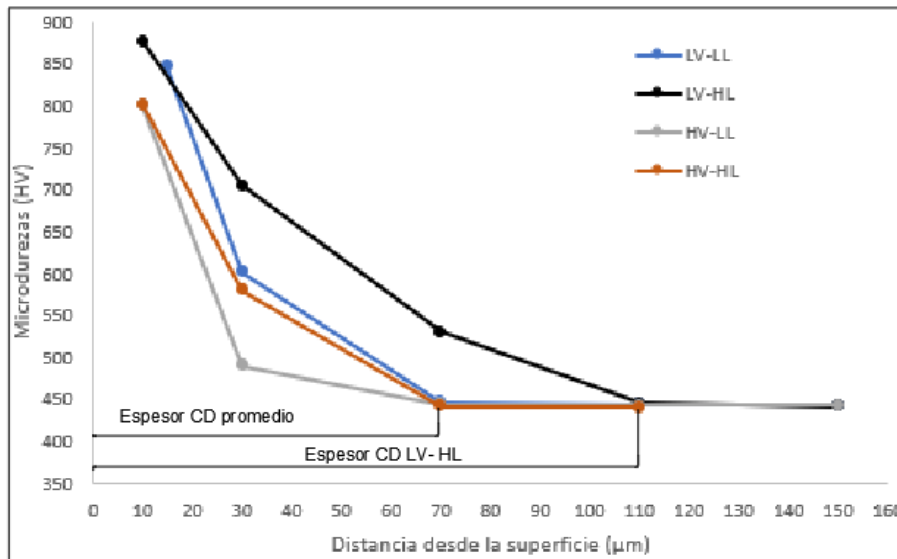


La **Figura 4- 10** muestra la microdureza para cada condición de experimentación en función de la distancia desde la superficie. Se observa que para las condiciones LV-LL, HV-LL y HV-HL

74 Influencia de las condiciones de esmerilado sobre la aparición de capa blanca en rieles tipo R400HT para uso en el Metro de Medellín

la capa deformada se encontró aproximadamente a 70 μm desde la superficie y para la condición HV-HL se evidencia un espesor de capa deformada de aproximadamente 110 μm .

Figura 4-11: Variación de la microdureza de muestras esmeriladas en función de la distancia desde la superficie para cada condición de experimentación.



La **Figura 4- 11** muestra la variación de la microdureza de las muestras esmeriladas en función de la distancia desde la superficie para cada condición de experimentación, estas mediciones se realizaron hasta llegar a la matriz perlítica del material, la cual tuvo un promedio de dureza de 443 HV lo cual concuerda con el valor de dureza reportado en la caracterización del riel en el apartado 3.1.2.

En la **Figura 4- 10** y **Figura 4- 11** se observa como la capa blanca tuvo valores de dureza por encima de 800 HV, siendo la mayor para la condición de baja velocidad y alta carga (LV-HL), la cual alcanzó un valor de 877 HV. El perfil de dureza muestra que desde la capa blanca se produjo una capa deformada con una longitud que varió entre 70 y 110 μm para las diferentes condiciones de experimentación.

Estos resultados de microdureza en la capa blanca están en concordancia con lo reportado por Zhou et al [69] al cual fue de 798.6 HV a una carga de 0.05 Kgf. Los mismos autores reportaron una relación inversa del espesor de capa deformada con respecto a la velocidad de avance, es decir, a medida que aumenta la velocidad de avance disminuye el espesor de la capa deformada. Esto va en la misma línea de los resultados encontrados en este trabajo, ya que en

la condición de baja velocidad y alta carga (LV-HL) se encontró un espesor de capa deformada mayor que en las demás condiciones. Se observa además que, para las condiciones de baja velocidad se obtuvieron los mayores espesores de capa blanca, la mayor pérdida de masa y los mayores valores de dureza, por lo tanto, se puede ver una relación entre la condición de baja velocidad y la mayor formación de capa blanca.

4.2 Efecto de la presencia de la capa blanca sobre la respuesta tribológica en ensayos disco-disco

4.2.1 Pérdida de masa

Las pérdidas de masa promedio para las probetas de rueda y riel después de las pruebas de fatiga por contacto se muestran en la **Figura 4- 12**. Se evidencia que la mayor pérdida de masa se observó para las muestras de rueda y está en una proporción de 7 veces comparada con las muestras de riel. La mayor pérdida de masa que se dio en riel se registró para la condición (LV-HL), éstas están en una proporción de 3 veces en comparación con riel sin esmerilar, ver **Figura 4- 13**.

Figura 4-12: Pérdida de masa en los pares rueda-riel en el ensayo en la máquina disco-disco.

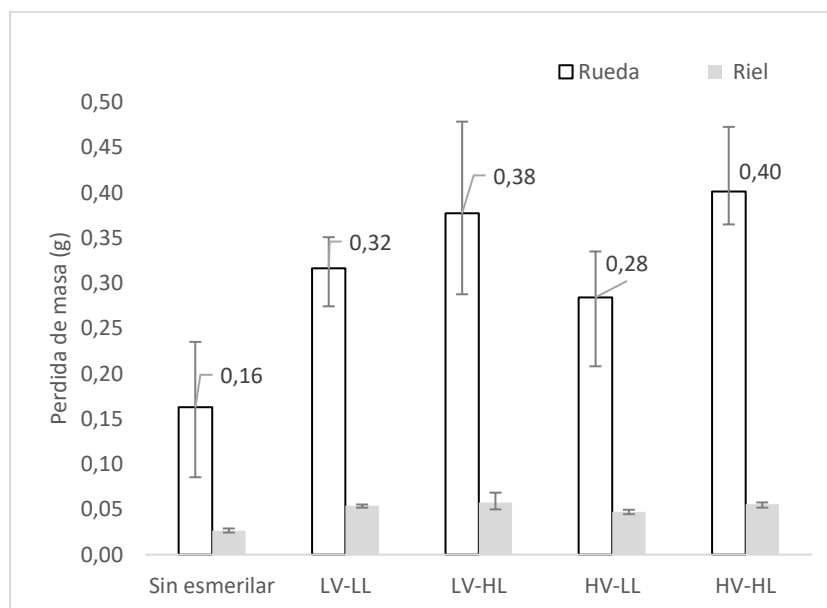
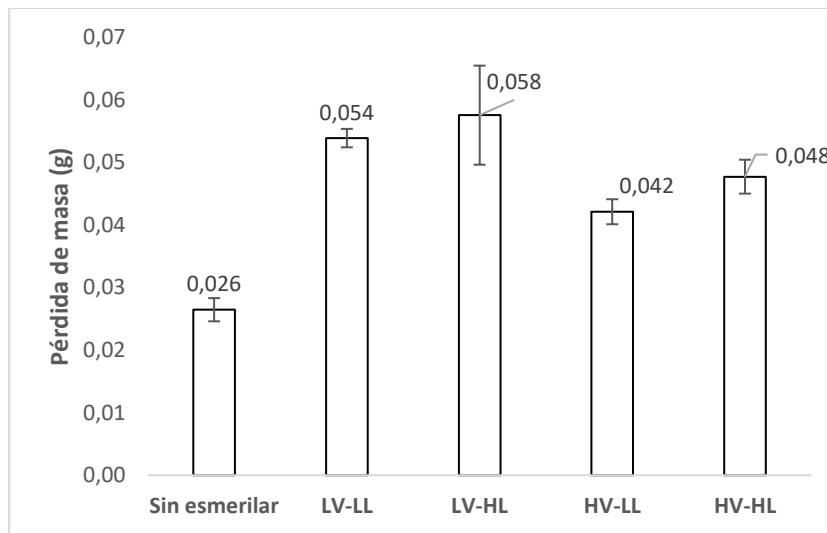


Figura 4-13: Pérdida de masa en los rieles después del ensayo en la máquina disco-disco



Se observa en la **Figura 4- 13** que las muestras de riel esmeriladas tuvieron una mayor pérdida de masa para cada condición de experimentación que las muestras de riel sin esmerilar. De acuerdo con este resultado, se puede concluir que la capa blanca interviene como acelerador de desgaste debido a la diferencia de su dureza con respecto a la dureza base del riel. En este caso, la presencia de la capa blanca podría actuar como nucleador de grietas promoviendo una mayor pérdida de masa. Además, su fragilidad puede provocar un desprendimiento temprano, aumentando la pérdida de masa en las primeras etapas de las pruebas, hasta que la capa blanca se haya eliminado por completo.

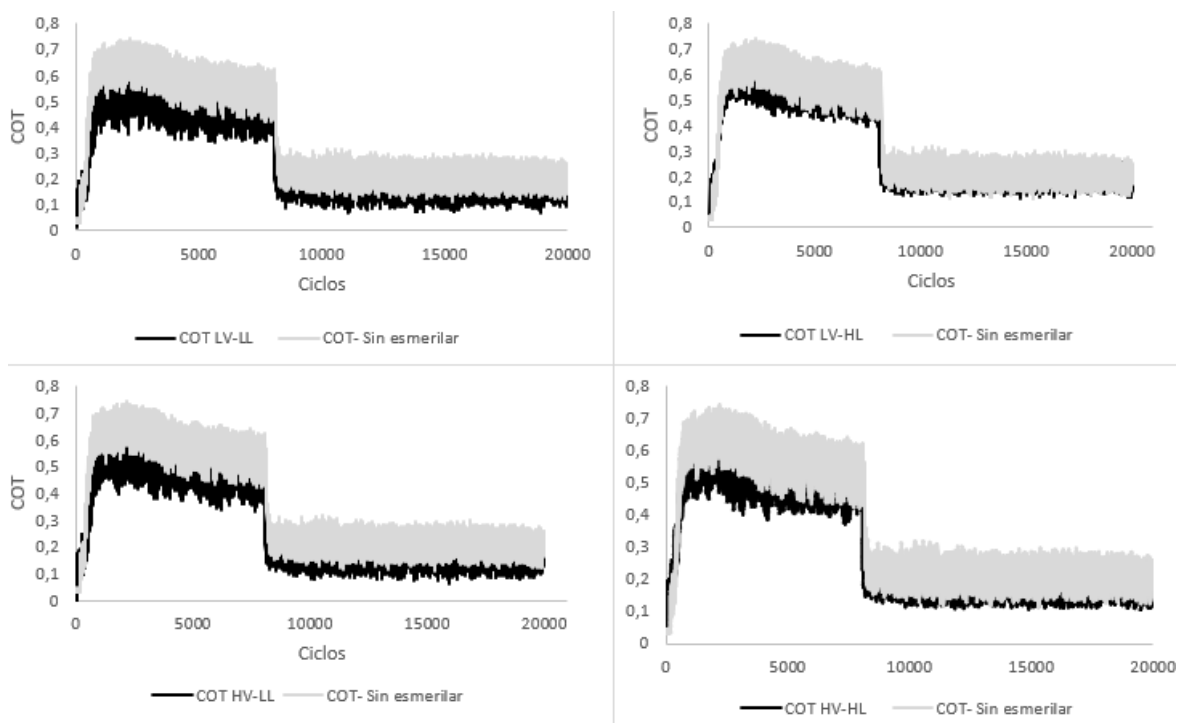
Teniendo en cuenta la posible ocurrencia del mecanismo de presurización de grietas por efecto de la presencia de agua en la zona de contacto, se esperaría que el daño superficial en las muestras analizadas en este trabajo fuera significativo. Sin embargo, los resultados de pérdida de masa encontrados son 6 veces inferiores comparados con los resultados previos reportados por Santa et al [70] para condiciones similares de experimentación. Esto podría indicar que para estas condiciones de contacto las grietas no alcanzaron la longitud crítica durante los 8K ciclos iniciales en seco, por lo que el agua cumplió una función más relevante como lubricante que como acelerador del crecimiento de las grietas entre los 8K ciclos y los 20 K ciclos.

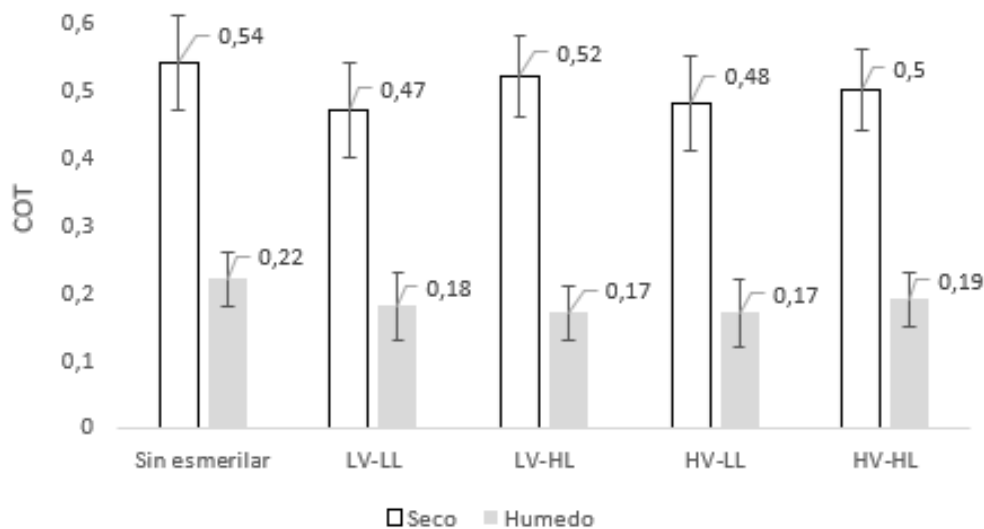
4.2.2 Coeficiente de tracción

El coeficiente de tracción (COT) promedio para cada condición en todas las pruebas se muestra en la **Figura 4- 14**. Todas las pruebas se realizaron con las mismas condiciones de contacto y

se observa que el coeficiente de tracción fue muy similar, ver **Figura 4- 14(A)(B)**. En los primeros 8K ciclos en seco el COT tiende a 0.5 y en los 12K ciclos con agua el COT tiende a 0.2 tanto para muestras esmeriladas como para las no esmeriladas. El mismo resultado se obtuvo incluso aunque los parámetros de rugosidad tenían grandes diferencias entre las muestras no esmeriladas y las esmeriladas. Se debe mencionar que la única diferencia entre los resultados de las muestras esmeriladas y las no esmeriladas fue que, aquellas con capa blanca lograron un estado estable alrededor de un valor de COT de 0.5 en seco más rápidamente. Cabe notar que el valor de COT de 0.5 fue reportado por Santa et al [70] bajo el mismo método (8K ciclos en seco + 12K ciclos con agua) para probetas de riel R400HT sin esmerilar ensayadas contra probetas de rueda E8.

Figura 4-14: Coeficiente de tracción para los pares rueda-riel en la máquina disco-disco (A)Tendencia por ciclo, (B)Desviación por condición.







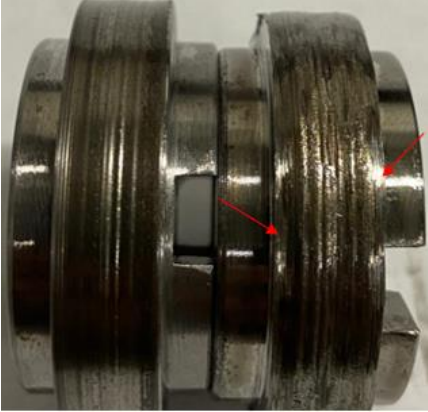

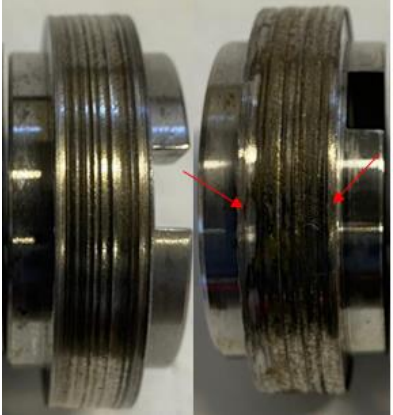
4.2.3 Calidad superficial

La **Figura 4- 15** muestra las superficies desgastadas de probetas de rueda y riel luego de los ensayos disco-disco. Se observa en el par tribológico que las superficies tuvieron un desgaste homogéneo en cada espécimen.

En los pares tribológicos se observa que los especímenes de rueda copiaron la geometría generada por el esmerilado en las probetas de riel. En algunos surcos de las probetas de rueda y riel no se evidenció el fenómeno de fatiga por contacto, ya que las muestras esmeriladas mostraron surcos tan profundos que no promovieron un contacto homogéneo entre las partes, ver flechas rojas. El daño en las muestras de rieles procede principalmente por Ratchetting, es decir, por acumulación de deformación plástica en la superficie y sub-superficie, mientras que en las muestras de ruedas el Spalling fue el mecanismo predominante.

Esto está en concordancia con lo reportado por Santa et al [70] en ensayos en la máquina disco-disco bajo la misma metodología de trabajo. Por otro lado, si se comparan las superficies de las probetas de riel entre sí, las que provienen de la condición de baja velocidad y alta carga (LV-HL) presentan un aspecto de mayor daño comparadas con las demás condiciones. Esto es consistente con las mediciones de pérdida de masa, las cuales fueron mayores para para la condición de baja velocidad y alta carga en el esmerilado.

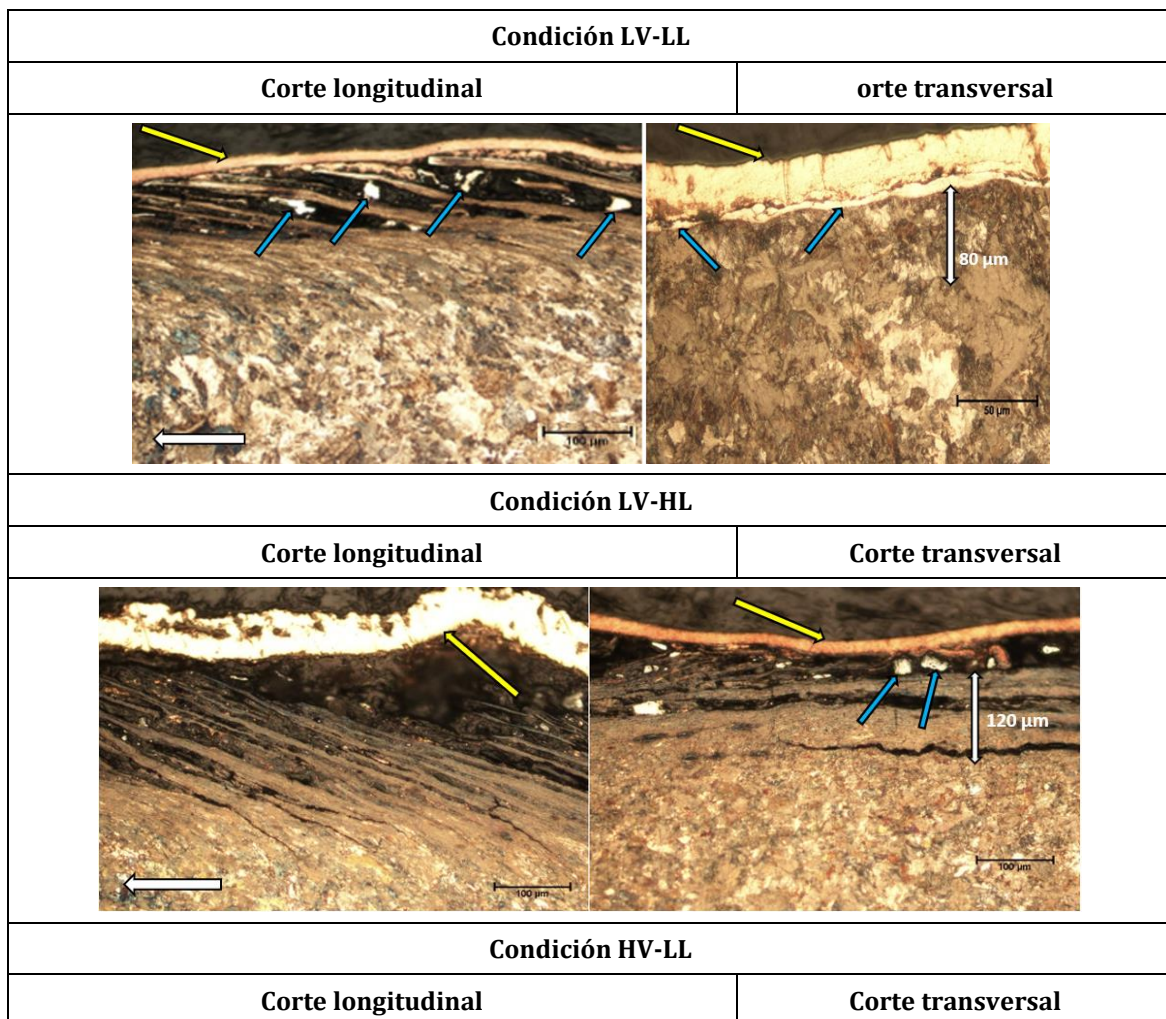
Figura 4-15: Aspecto de las superficies desgastadas de rueda R260 y riel R400HT respectivamente, después de los ensayos tribológicos de acuerdo a las condiciones de experimentación usadas.

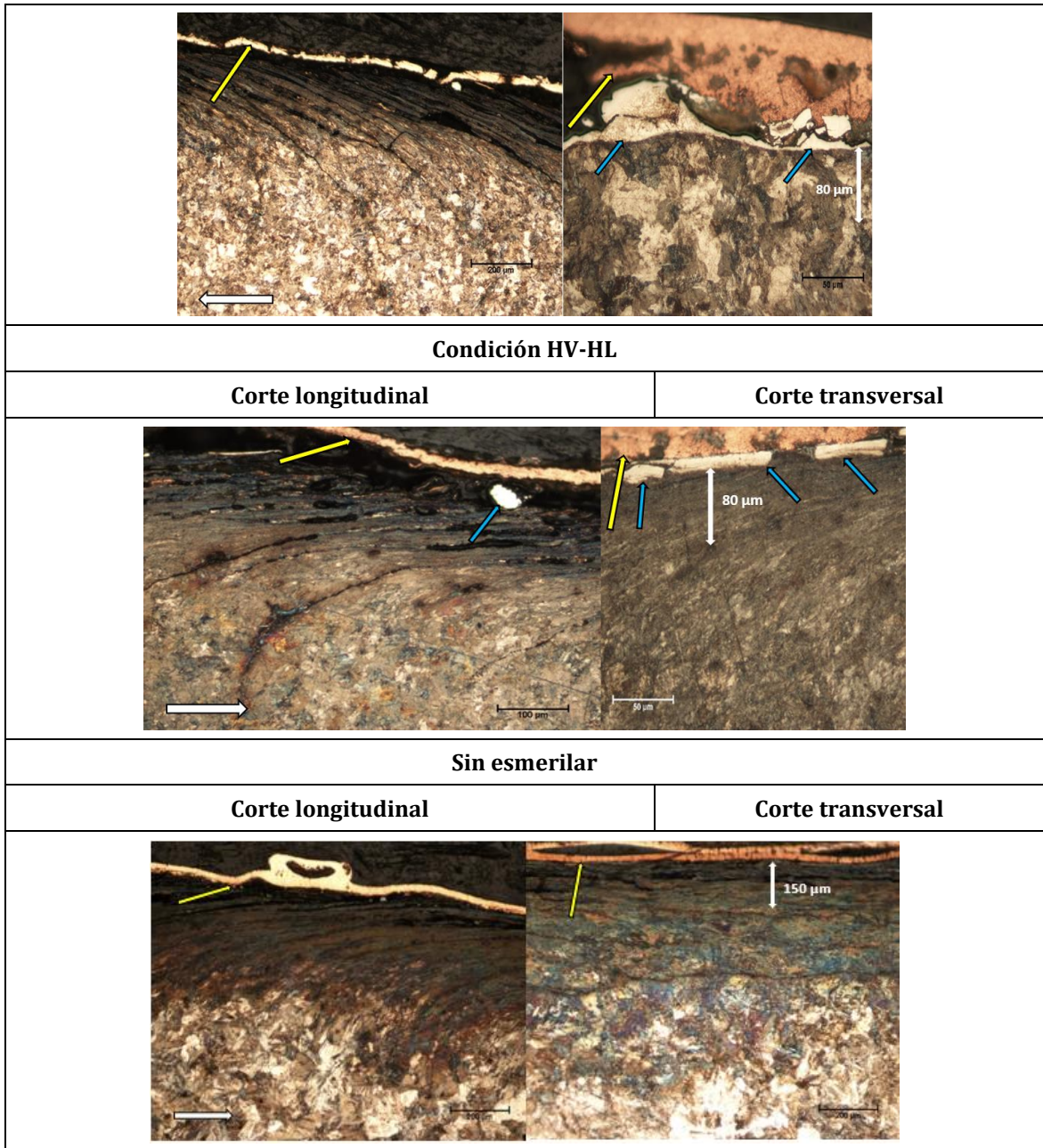
<p>1%,1. 1GPa, 20k ciclos(8KD+12W) (Rueda-Riel sin esmerilar)</p>	<p>%,1. 1GPa, 20k ciclos (8KD+12W) (Rueda - Riel LV-LL)</p>
	
<p>1%,1. 1GPa, 20k ciclos (8KD+12W) (Rueda - Riel LV-HL)</p>	<p>%,1. 1GPa, 20k ciclos (8KD+12W) (Rueda - Riel HV-LL)</p>
	
<p>1%,1. 1GPa, 20k ciclos (8KD+12W) (Rueda - Riel HV-HL)</p>	
	

4.2.4 Microestructura

La **Figura 4- 16** muestra imágenes de LOM de la microestructura de las secciones longitudinales y transversales de las muestras después de los ensayos de fatiga de contacto en el tribómetro disco-disco para 20K ciclos de experimentación (compuestos por 8K ciclos en seco y 12K ciclos húmedos). En cada imagen, las flechas en la esquina inferior izquierda indican la dirección de deslizamiento, en la parte superior se muestra el espesor de la capa deformada causada por el contacto rodante-deslizante.

Figura 4-16: Metalografía de las muestras después de las pruebas disco-disco, hasta 20K ciclos (8K secos + 12K húmedos). Para las condiciones LV-LL, LV-HL, HV-LL, HV-HL y Sin esmerilar.



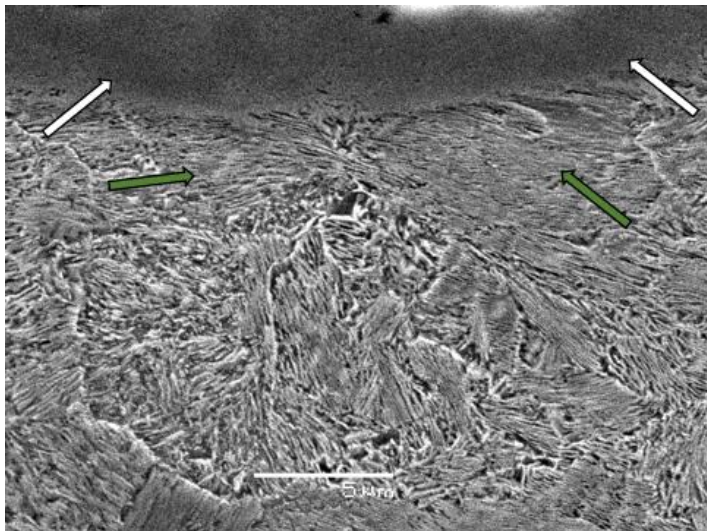


Como se había aclarado antes, en las micrográficas se visualiza una capa de color rojo claro adyacente a las muestras (ver flechas amarillas), la cual corresponde a cinta de cobre utilizada con el fin de evitar el desprendimiento de la capa blanca al momento de pulir la probeta. Las imágenes muestran que para la condición LV-HL no se encontró una capa blanca continua en la superficie de las muestras, sólo se identificaron residuos de capa blanca particulados y desprendidos de la misma, a diferencia de las demás condiciones donde se muestra una capa blanca más conservada, ver flechas azules. Para esta condición se aprecia nucleación de grietas

en la subsuperficie de la muestra y una deformación mayor que para las demás condiciones de experimentación.

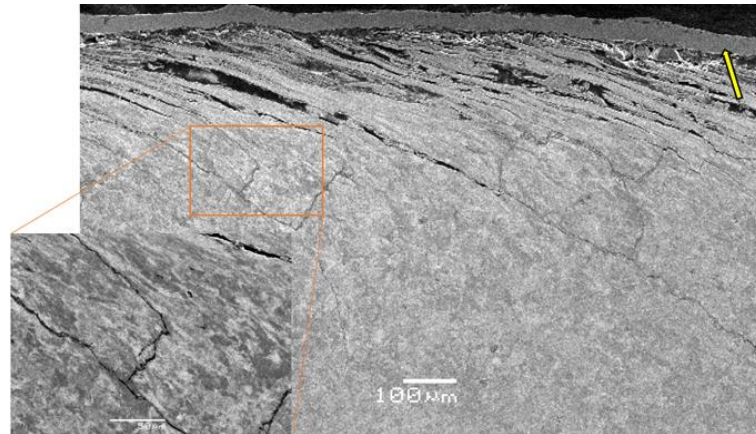
En las imágenes de SEM de la **Figura 4- 17** se muestra en detalle la interfaz entre la capa blanca y la capa deformada después de pruebas por fatiga de contacto, se observa como la capa blanca aparece como una estructura compacta, alineada en sentido paralelo a la superficie de contacto, ver flechas blancas. Las flechas verdes indican granos altamente deformados con una orientación preferencial paralela a la superficie.

Figura 4-17: Interfaz capa blanca y capa deformada después de pruebas por fatiga de contacto. SEM a 5000X.



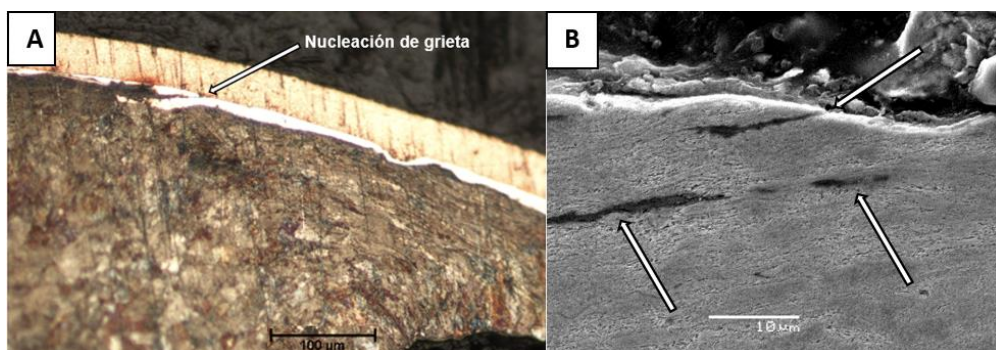
En la **Figura 4- 16** y **Figura 4- 18** se pueden identificar que para todas las condiciones en los cortes longitudinales se encontró alta densidad de grietas. La **Figura 4- 18** muestra una zona con alta densidad de grietas para la condición LV-HL. En la **Figura 4- 24**, se muestra el número de grietas por unidad de longitud y evidencia que para la condición LV-HL donde se encontraron hasta 7 grietas por cada 500 μm .

Figura 4-18: Zona con alta densidad de grietas para la condición LV-HL. SEM anterior a 100X y posterior a 500X.



La **Figura 4- 19** muestra la nucleación de una grieta en la interfaz de la capa blanca y la capa endurecida, así con la nucleación de grietas en las zonas superficiales y subsuperficiales. En la **Figura 4- 19 (A)**, se observa claramente que la interfaz entre la capa blanca y la perlita se convierte en un lugar propenso para el inicio y el crecimiento de grietas. En la zona deformada también se evidencia la nucleación de grietas superficiales y subsuperficiales ver **Figura 4- 19 (B)**. Cuando se origina una grieta, la capa blanca y las regiones adyacentes a ella se desprenden, lo que conlleva a una mayor pérdida de masa y la creación de una superficie irregular que puede convertirse en un sitio propicio para el inicio de nuevas grietas. Además, según lo señalado por Steenbergen y Rasmussen [10][49], las grietas generadas por la capa blanca pueden propagarse en el interior del material, dando lugar a la formación de defectos como Squats y Shelling en las ruedas ferroviarias e incluso a fracturas en los rieles en condiciones de servicio.

Figura 4-19: (A) Nucleación de grieta en el interfaz de la capa blanca y la capa endurecida. LOM (B) Nucleación de grieta zona superficial y subsuperficial. SEM.



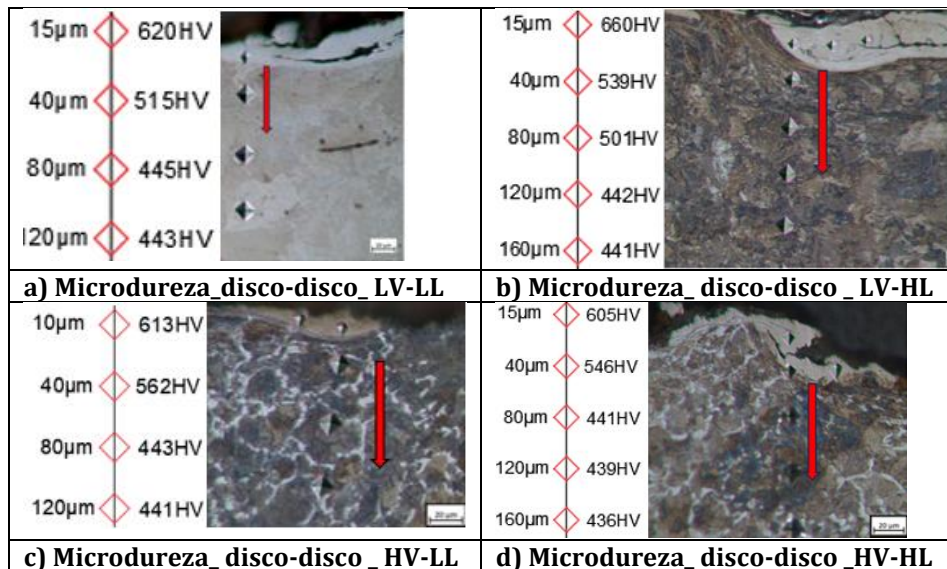
84 Influencia de las condiciones de esmerilado sobre la aparición de capa blanca en rieles tipo R400HT para uso en el Metro de Medellín

También se realizaron tomas de microdureza a una carga de 0.05 kgf y sostenidas 10s para las muestras ensayadas a fatiga de contacto en el tribómetro disco-disco en las cuales se obtuvieron los resultados mostrados en la **Figura 4- 20**.

La **Figura 4- 20** muestra el perfil de microdureza en probetas después de las pruebas de contacto de fatiga en el tribómetro disco-disco para cada condición de experimentación. Se observa como la capa blanca tuvo valores de dureza por encima de 600 HV, siendo la mayor para la condición de baja velocidad y alta carga (LV-HL), la cual alcanzó un valor de 660 HV, el perfil de dureza muestra que por debajo de la superficie desgastada se produjo una capa deformada que varió entre 80 y 150 μm entre las diferentes condiciones de experimentación.

La **Figura 4- 21** muestra la variación de la microdureza de las muestras después de las pruebas de fatiga de contacto en función de la distancia desde la superficie desgastada para cada condición de experimentación, estas mediciones se realizaron hasta llegar a la matriz perlítica del material, la cual tuvo un promedio de dureza de 443 HV, este dato está en concordancia con el valor de dureza reportado en la caracterización del riel en el apartado 3.1.2 del capítulo 3.

Figura 4-20: Perfil de microdureza en probetas después de pruebas de contacto de fatiga en el tribómetro disco-disco para cada condición de experimentación.



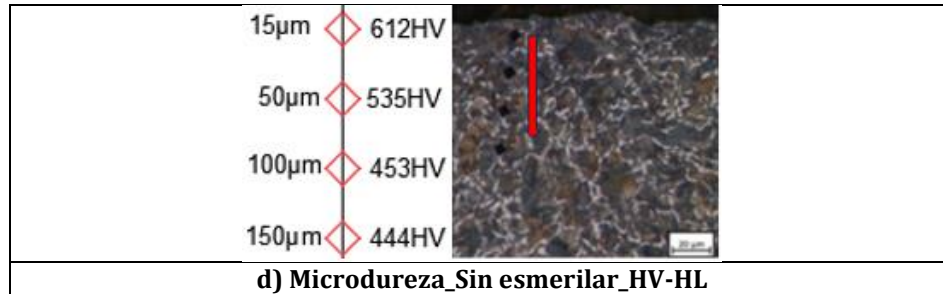
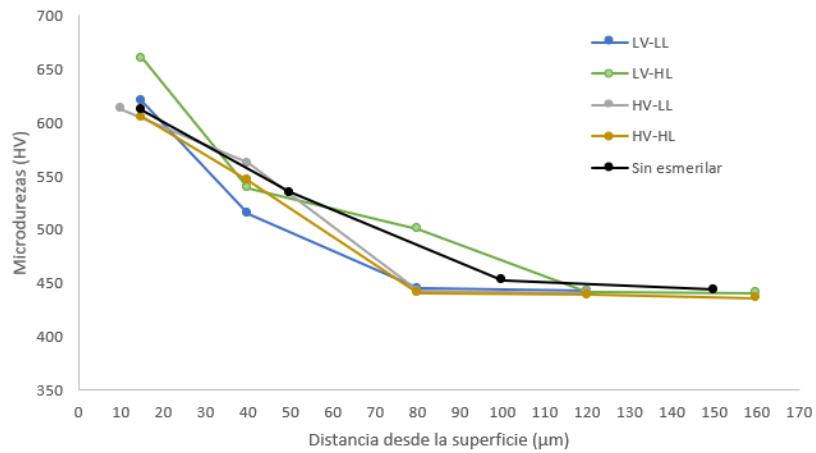


Figura 4-21: Variación de la microdureza de muestras después de las pruebas de fatiga de contacto en función de la distancia desde la superficie desgastada para cada condición de experimentación.



Los espesores de las capas deformadas después del esmerilado mostradas en la **Tabla 4- 3**, están en concordancia con lo reportado por Al-Juboori et al [11] que encontraron espesores de capas deformadas desde la superficie hasta el material base de 120 µm. Se evidencia que el espesor aproximado de la capa deformada después del proceso de esmerilado para todas las condiciones fue menor en proporción a 10 µm con respecto al espesor de la capa deformada después de las pruebas de fatiga de contacto en el tribómetro disco-disco. Estos datos muestran que el material se siguió deformando plásticamente por debajo de la superficie de trabajo. Por otro lado, se observa una disminución en la dureza de la capa blanca en las muestras después de las pruebas de fatiga de contacto de aproximadamente 200 HV en comparación a la capa blanca después del esmerilado, esto se puede dar por la desconsolidación y fragmentación de dicha capa, lo cual tiene gran influencia al momento de hacer las mediciones.

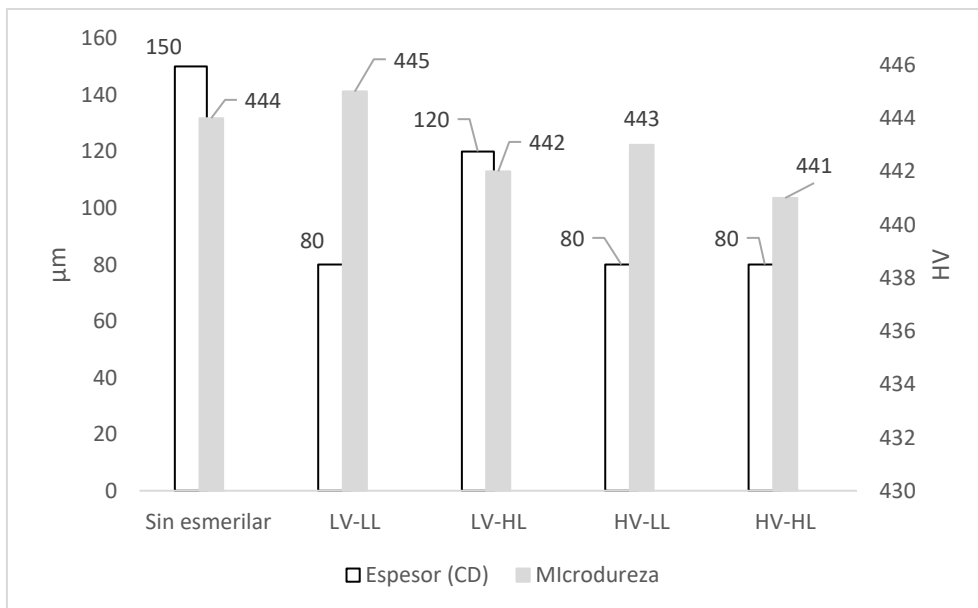
86 Influencia de las condiciones de esmerilado sobre la aparición de capa blanca en rieles tipo R400HT para uso en el Metro de Medellín

Tabla 4-3: Espesor de la capa deformada y microdureza obtenidas después de experimentación de esmerilado y disco-disco.

Condición	Esmerilado			Después de ensayos disco-disco		
	Espesor aproximado capa deformada (μm)	Microdureza (HV) Matriz perlítica	Microdureza (HV) Capa blanca	Espesor aproximado capa deformada (μm)	Microdureza (HV) matriz perlítica	Microdureza (HV) Capa blanca
LV-LL	70	446	847	80	445	620
LV-HL	110	445	877	120	442	660
HV-LL	70	444	801	80	443	613
HV-HL	70	442	802	80	441	605
Sin esmerilar	N/A	N/A	N/A	150	444	N/A

La **Figura 4- 22** muestra la microdureza y el espesor de la capa deformada después de las pruebas de fatiga de contacto en el tribómetro disco-disco. Se evidencia una reducción de hasta 70 μm en el espesor de la capa deformada de las muestras esmeriladas comparadas con las muestras sin esmerilar después de los ensayos de la disco-disco. De acuerdo con los resultados anteriores, se plantea la hipótesis de que una reducción en el espesor de la capa deformada en las muestras que han sido sometidas a esmerilado se debe al desgaste inicial del material durante las fases iniciales de las pruebas.

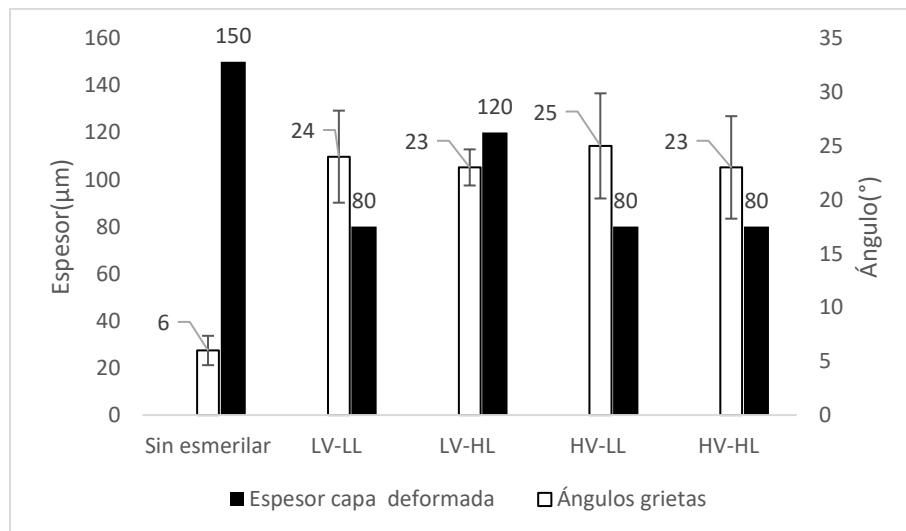
Figura 4-22: Microdureza y espesor de la capa deformada después de las pruebas de fatiga de contacto en el tribómetro disco-disco.



La **Figura 4- 23** muestra la variación de ángulos de las grietas con respecto a la superficie y la profundidad de la capa deformada para cada condición de experimentación después de las pruebas de fatiga de contacto. En la **Figura 4- 23** se evidencia que en las condiciones de esmerilado se obtuvieron ángulos entre 23° y 25° teniendo una variación de $\pm 1^\circ$ entre dichas condiciones, por lo tanto, no se evidenció una variación considerable en función del espesor de capa deformada. No obstante, se observa una diferencia de hasta 4 veces entre los ángulos de las grietas encontrados en las muestras esmeriladas con respecto a las no esmeriladas, esta diferencia entre los ángulos se podría dar, ya que, los materiales más duros en este caso se dan en las muestras esmeriladas, tienden a experimentar una fractura más frágil, donde la propagación de grietas se produce sin una deformación plástica significativa del material circundante. Esto puede resultar en grietas que avanzan en ángulos más agudos.

Cabe notar que en Santa et al [70] reportaron para las mismas condiciones de experimentación en el tribómetro disco-disco para rieles R400HT sin esmerilar que para un espesor de capa deformada de aproximadamente 200 μm se obtuvo un ángulo medio de grietas de 5°, estos datos están en concordancia con los valores de 150 μm y ángulo medio de 6° reportados en este trabajo.

Figura 4-23: Variación de ángulos de las grietas con respecto a la superficie y profundidad de la capa deformada para condición de experimentación.

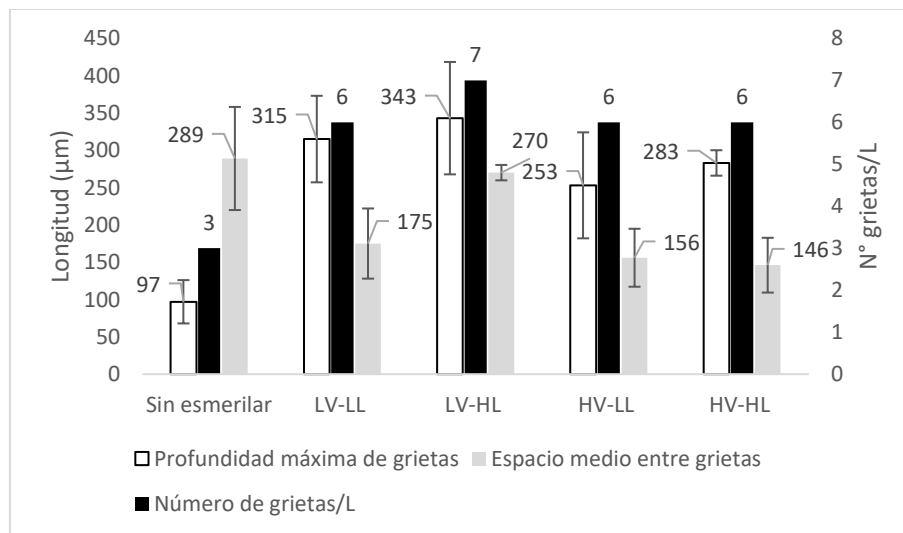


La **Figura 4- 24** muestra el análisis de las grietas después de las pruebas fatiga de contacto para cada condición de experimentación. Se observa que las grietas fueron menos profundas en la condición sin esmerilar con un valor de 97 μm , este dato está en concordancia con el valor que reportaron Santa et al [70] para las mismas condiciones de experimentación en el tribómetro disco-disco para rieles R400HT sin esmerilar el cual fue de 85 μm . La profundidad máxima y el mayor número de grietas se dio para la condición de LV-HL con unos valores de 343 μm y 7 respectivamente. Se observa que el espaciamiento medio de grietas fue de 289 μm para la muestra sin esmerilar está por encima de los valores encontrados para las muestras esmeriladas y está por encima 1.07 veces de la condición LV-HL.

Se evidencia además que el número de grietas por unidad de longitud estuvo entre 6 y 7 por cada 500 μm para las muestras esmeriladas, por lo tanto, el promedio de dichas grietas no tuvo una variación significativa para las condiciones de esmerilado. No obstante, el número de grietas de las muestras sin esmerilar está 2 veces por debajo del valor encontrado en las muestras esmeriladas.

De acuerdo a los datos obtenidos en la **Figura 4- 24** se evidencia que un aumento tanto en la profundidad de las grietas y el número de grietas provoca mayor pérdida de masa en los ensayos de fatiga por contacto para cada condición de experimentación, esto se puede constatar en la **Figura 4- 13**.

Figura 4-24: Análisis grietas después de las pruebas fatiga de contacto para cada condición de experimentación.



Los autores Stock y Pippan [71] encontraron que la relación entre el espaciamiento superficial de las grietas y la profundidad de la deformación plástica era prácticamente un valor fijo independientemente del grado del riel, con un valor de aproximadamente 2. En este trabajo, los valores de dicha relación se pueden ver en la **Tabla 4- 4**. La **Tabla 4- 4** muestra la relación de espaciamiento superficial de grietas y el espesor de capa deformada para todas las condiciones de experimentación después de las pruebas de fatiga de contacto, en ella se evidencia que para todas las condiciones el valor de dicha relación está muy próxima a 2, así como lo plantea Stock y Pippan [71]

Tabla 4-4: Relación de espaciamiento superficial de grietas y espesor de capa deformada para todas las condiciones de experimentación después de las pruebas de fatiga de contacto.

Condición de experimentación	Espacio medio entre grietas (μm)	Espesor capa deformada (μm)	Espaciamiento superficial /Espesor CD
Sin esmerilar	289	150	1,93
LV-LL	175	80	2,19
LV-HL	270	120	2,25
HV-LL	156	80	1,95
HV-HL	146	80	1,83

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- El estudio del proceso de esmerilado de rieles mediante el uso de una máquina de rectificado convencional adaptada para este propósito logró reproducir de manera exitosa los cambios microestructurales en los materiales bajo investigación. La combinación específica de velocidad lineal y fuerza normal empleadas en la experimentación generó, para cada condición, la formación de una capa blanca superficial, seguida por una deformada en la sub-superficie. La presencia de la capa blanca en la superficie de las muestras esmeriladas confirma el esmerilado como un mecanismo generador de dicha capa, resaltando la necesidad de optimizar este proceso en campo para prevenir o reducir su aparición.
- Las probetas de riel esmeriladas a baja velocidad tuvieron mayor pérdida de masa, siendo mayor para la condición de baja velocidad y alta carga (LV-HL). Este resultado está en concordancia con lo evidenciado en el análisis superficial de las muestras donde se observa que para esa condición hay un mejor corte en el material promoviendo esto una mayor pérdida de masa, esta última comparada con las condiciones de alta velocidad presentó casi siete veces mayor pérdida de masa. Cabe notar que, para las condiciones de alta velocidad, aunque se tuvieron dos regímenes de carga diferentes, las pérdidas de masa fueron mayor para la condición donde se aplicó una carga más alta.
- Se observó que la capa blanca está presente en aproximadamente el 90% de la longitud de contacto evaluada en la sección transversal de las probetas. Además, se destaca que, en la condición de baja velocidad se registraron los valores más elevados tanto en el promedio como en los máximos espesores de capa blanca, siendo especialmente pronunciados en la condición de baja velocidad (LV) y alta carga (HL). En consecuencia, a velocidades lineales más bajas se obtienen mayores espesores de capa blanca, lo cual se correlaciona con una mayor pérdida de

masa. En contraste, al aumentar la velocidad, se observa una disminución en el espesor de la capa blanca.

- Se llevaron a cabo pruebas de laboratorio en máquina disco-disco con el objetivo de evaluar la fatiga de contacto en diversas condiciones experimentales. Se observó que los materiales que presentaban capa blanca en su superficie mostraron una menor resistencia al desgaste en comparación con las muestras sin dicha capa. Esta diferencia se refleja claramente en los resultados de pérdida de masa, donde se registra una mayor pérdida en los materiales con capa blanca, destacándose especialmente en la condición de baja velocidad y alta carga (LV-HL). Se postula que la capa blanca puede desempeñar un papel como acelerador del desgaste dada su diferencia de fragilidad y dureza en comparación con la dureza base del riel, lo que genera una región sub-superficial susceptible a la formación de grietas por fatiga de contacto.
- Todas las pruebas de fatiga de contacto se llevaron a cabo bajo las mismas condiciones y se observó que el coeficiente de tracción fue muy similar tanto para las muestras esmeriladas como para las no esmeriladas. Este fenómeno se mantuvo constante a pesar de las notables diferencias en los parámetros de rugosidad entre las muestras no esmeriladas y las esmeriladas. En los primeros 8k ciclos en seco, el coeficiente de tracción tiende a 0.5, mientras que, en los 12k ciclos con agua, tiende a 0.2.
- La ausencia de evidencia de daños superficiales significativos en las muestras de riel y la similitud en la pérdida de masa para las condiciones de rieles esmerilados después de las pruebas de fatiga de contacto sugieren que la aplicación de agua no necesariamente conduce a una mayor pérdida de masa por ciclo, pues la propagación acelerada de las grietas por efectos de presurización solamente ocurre si las grietas han superado una longitud crítica. Para incrementar la tasa de desgaste es necesario extender el tiempo de las pruebas en seco hasta que el descascarado causado por las grietas emerja en la superficie, lo cual representa un problema más significativo a largo plazo. Por otro lado, si las grietas no alcanzan la longitud crítica, el agua simplemente lubricará y no se podrá observar el efecto de la presurización.
- La caracterización a través de microscopía óptica y electrónica de barrido permitió describir la forma e impacto de los diversos cambios microestructurales asociados al fenómeno de fatiga de contacto, tanto en la superficie como debajo de ella. Se logró medir los espesores tanto de

la capa blanca como de las capas deformadas plásticamente para todas las condiciones experimentales. Se observó que las muestras expuestas a cargas más elevadas presentaron mayores deformaciones plásticas.

- Después de llevar a cabo las pruebas de fatiga de contacto, se encontró que el espesor de las capas deformadas variaba entre 80 y 150 μm para los diferentes materiales del riel. Las longitudes promedio de las grietas oscilaban entre 97 μm y 343 μm , con ángulo promedios que varían de 6° a 25°. Se evidenció además que el número de grietas por unidad de longitud estuvo entre 6 y 7 por cada 500 μm para las muestras esmeriladas. La condición de LV-HL mostró la profundidad máxima promedio y el mayor número de grietas, mientras que las muestras no esmeriladas presentaron las grietas más pequeñas. Además, se observó una correlación entre el espesor de la capa deformada y las pérdidas de masa registradas durante los ensayos.

5.2 Recomendaciones

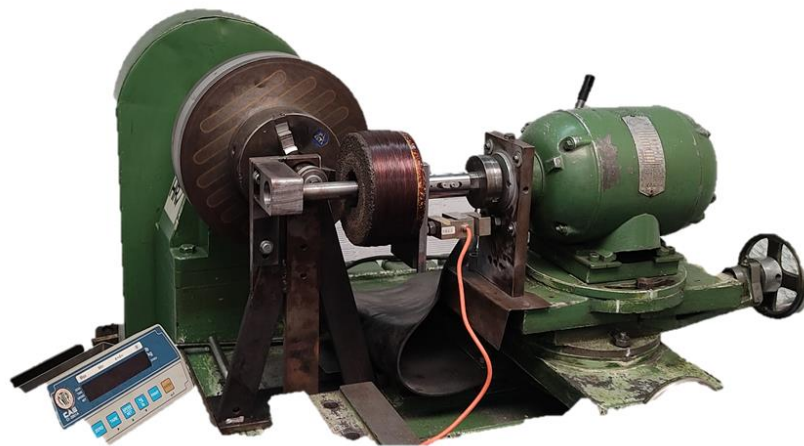
En el proceso de esmerilado de rieles resulta fundamental mantener un control preciso sobre la presión ejercida por la rueda abrasiva sobre el riel. Este factor determina la cantidad de material eliminado por unidad de volumen, subrayando la importancia de rediseñar o crear desde cero un dispositivo destinado a esmerilar probetas de riel a escala de laboratorio. Dicho dispositivo debe permitir la regulación de la presión de contacto entre la rueda abrasiva y el material a ensayar, así como la capacidad de variar el ángulo de contacto entre ambos elementos. Este enfoque posibilitaría una simulación más precisa del proceso de esmerilado llevado a cabo en condiciones reales, contribuyendo significativamente a ampliar la gama de resultados obtenidos en el laboratorio. Estos resultados, a su vez, jugarían un papel clave en la toma de decisiones relacionadas con el mantenimiento de vías.

Mirando hacia el futuro, se busca obtener una comprensión más profunda del comportamiento de los rieles esmerilados en relación con la carga aplicada y las altas velocidades de avance del tren. Asimismo, se pretende investigar la temperatura de contacto entre las intercaras del riel y la rueda abrasiva mediante mediciones de laboratorio.

No menos crucial es continuar explorando el comportamiento de la fatiga de contacto por rodadura (RFC) en los rieles esmerilados. En este sentido, se recomienda llevar a cabo ensayos

de fatiga de contacto de larga duración, abarcando desde 100 mil hasta 200 mil ciclos, y contrastar estos resultados con los obtenidos en ensayos de baja duración realizados en este estudio. Este enfoque permitirá una evaluación más exhaustiva y robusta del desempeño de los rieles esmerilados en condiciones de fatiga, aportando valiosa información para futuras decisiones y mejoras en el mantenimiento ferroviario.

A. Anexo: Máquina esmerilado; Manual de usuario y memorias de diseño



Máquina esmeriladora

Manual de usuario y memorias de diseño

A. Componentes del dispositivo

Figura 1: Componentes del dispositivo.



Anexo A. Máquina esmeriladora; Manual de usuario y memorias de diseño.

B. Herramientas necesarias para el ensamble

Tabla 1: Herramientas requeridas para el ensamble de la máquina esmeriladora.

Imagen	Especificación
	<p>Llave de ajuste de tornillos del plato de mordazas</p>
	<p>Llave Ratchet $\frac{3}{8}$ + Copa 14 mm $-\frac{3}{8}$</p>
	<p>Mazo de goma</p>
	<p>Llave inglesa $\frac{3}{4}$ " Llave inglesa $\frac{9}{16}$"</p>

98 **Influencia de las condiciones de esmerilado sobre la aparición de capa blanca en rieles tipo R400HT para uso en el Metro de Medellín.**

	<p>Escuadra metálica</p>
	<p>Llave de expansión</p>
	<p>Destornillador modificado</p>
	<p>Comparador de caratula</p>
	<p>Llave boca fija grande.</p>

Anexo A. Máquina esmeriladora; Manual de usuario y memorias de diseño.

C. Implementos de seguridad personal

Durante la secuencia de ensamble es importante utilizar guantes de seguridad con el fin de evitar lesiones con elementos metálicos expuestos, además es indispensable el uso de botas de seguridad, completado el ensamble y previo a comenzar las pruebas es indispensable el uso de gafas de seguridad y de protector de oídos.

Tabla 2: Implementos de seguridad requeridos para la realización de pruebas en la máquina.

Imagen	Especificaciones
	Gafas de seguridad
	Protector de oídos
	Guantes de seguridad

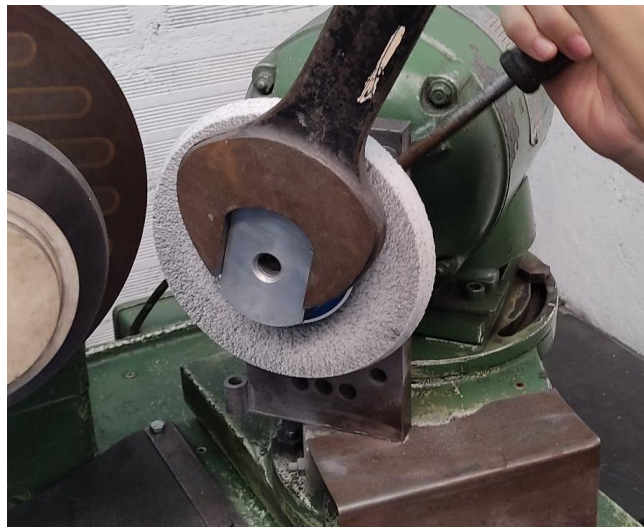
10C **Influencia de las condiciones de esmerilado sobre la aparición de capa blanca en rieles tipo R400HT para uso en el Metro de Medellín.**



D. Secuencia de ensamble

1. Desmontar los elementos que se encuentran en la configuración usada de manera regular en el taller (Afiladora de cuchillos) como se muestra en la **Figura 2**.

Figura 2: Desmontaje de configuración regular utilizada en el taller HRV.



2. Ubicar el carro longitudinal de forma perpendicular al plato de mordazas como se muestra en la **Figura 3**. Para esto, posicionar el lado 2 de la escuadra de forma coincidente con la cara plana del plato de mordazas, mientras que se ajusta la posición del carro longitudinal haciendo coincidir la cara plana del acople del motor, el posicionamiento del carro longitudinal se logra al desapretar los tornillos (Ver **Figura 4. A-B**) de la base y mover manualmente el carro hasta obtener la configuración indicada previamente.

Anexo A. Máquina esmeriladora; Manual de usuario y memorias de diseño.

Figura 3. Posicionamiento del carro longitudinal



Figura 4: (A) Tornillo de ajuste de posición del Carro longitudinal. (B) Alineación del carro longitudinal



A



Marcas de
alineación

B

3. Ubicar el sistema de posicionamiento de probetas como se muestra en la **Figura 5-A**, de tal forma que el eje quede dentro de las mordazas y así posteriormente apretar las mordazas como se muestra en la **Figura 5-B**, posteriormente presentar los tornillos de la base, luego de ser presentados los cuatro tornillos de apriete de la base del sistema de posicionamiento de probetas dar un apriete final utilizando el **Ratchet y la copa de 14 mm** como se muestra en la **Figura 6**.

102 Influencia de las condiciones de esmerilado sobre la aparición de capa blanca en rieles tipo R400HT para uso en el Metro de Medellín.

Figura 5: (A) Instalación del sistema de posicionamiento de probetas. (B) Apriete de tornillos.

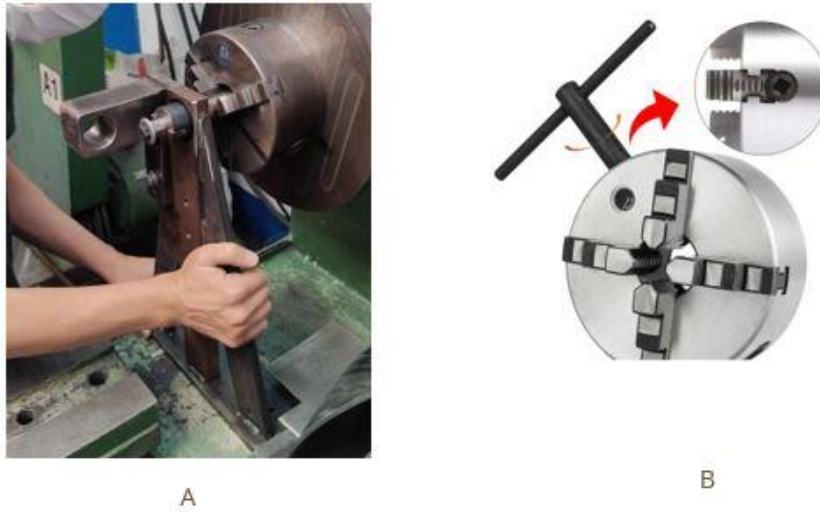
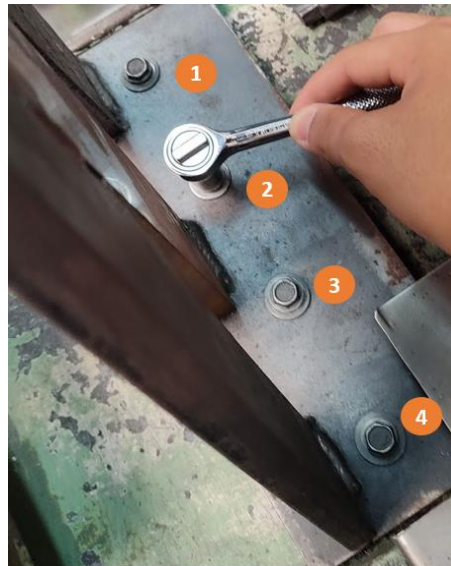


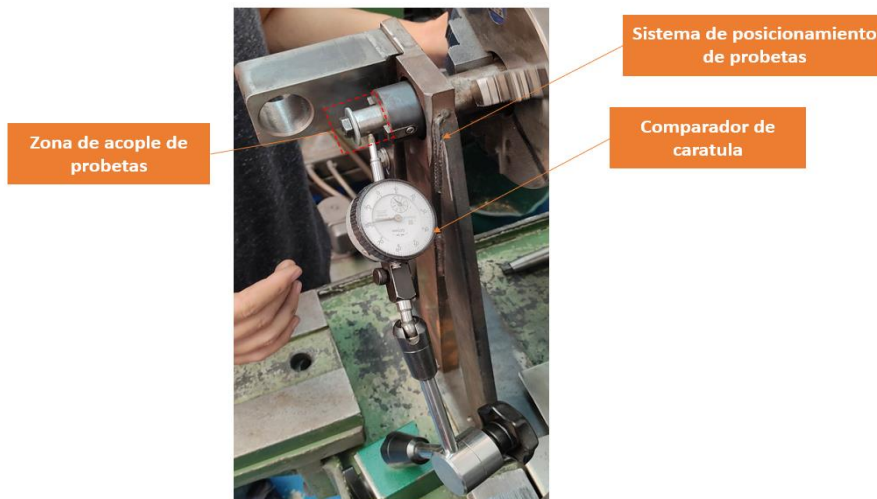
Figura 6: Apriete de tornillos de la base del sistema de posicionamiento de probetas.



4. Verificar el centrado del eje de soporte de probetas mediante un comparador de carátula como se muestra en la **Figura 7**, girar lentamente el plato de mordazas, al dar una vuelta completa identificar los puntos que sobrepasan la tolerancia $\pm 0.01\text{mm}$, mediante un **mazo de goma** realizar golpes suaves con el fin de corregir la desalineación, realizar un nuevo giro del plato de mordazas verificando que ningún punto sobrepase el rango de tolerancia $\pm 0.01\text{mm}$.

Anexo A. Máquina esmeriladora; Manual de usuario y memorias de diseño.

Figura 7: Verificación la desalineación del eje porta probetas.



5. Instalación del sistema de posicionamiento de rueda abrasiva: Ubicar el sistema con la piedra abrasiva previamente instalada en el acople del motor, el cual va roscado y debe ser apretado como se muestra en la **Figura 8**. Introducir la palanca en el orificio ubicado en el extremo fijo (Lado del motor), luego ubicar una llave de expansión en el cuadrante del extremo del sistema de posicionamiento de la rueda abrasiva, gire la llave de expansión en sentido horario mientras se opone resistencia con la otra mano la cual debe estar sosteniendo la palanca.

Figura 8: Apriete de sistema de posicionamiento de rueda abrasiva.



6. Mover el carro longitudinal de forma que se pueda verificar que, al introducir el rodamiento en sistema de apoyo del eje estabilizador, la pista externa del rodamiento

interfiera con dicho soporte generando posibles desalineaciones, ver **Figura 9**. En caso que el rodamiento no ingrese correctamente al soporte y presente desalineaciones en el eje Y, puede ajustar la posición del soporte mediante los tornillos 1 y 2 (**Llave 9/16"**) de la **Figura 10-A**, en caso de que la desalineación sea en el eje x, puede ajustar el carro longitudinal mediante la volante que se muestra en la **Figura 10-B**

Figura 9: Aproximación del rodamiento al soporte del eje estabilizador.

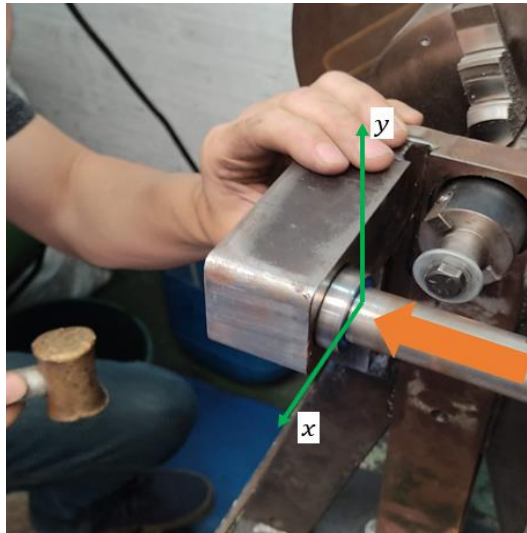
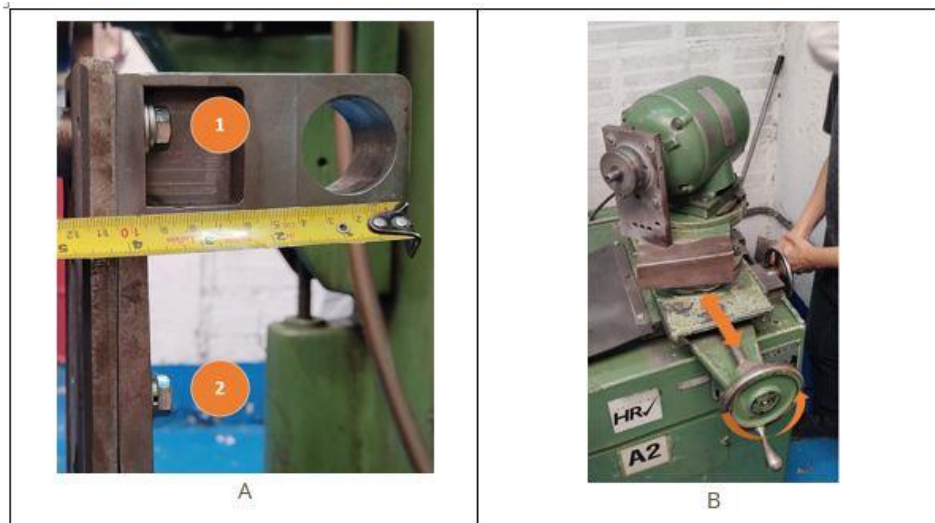


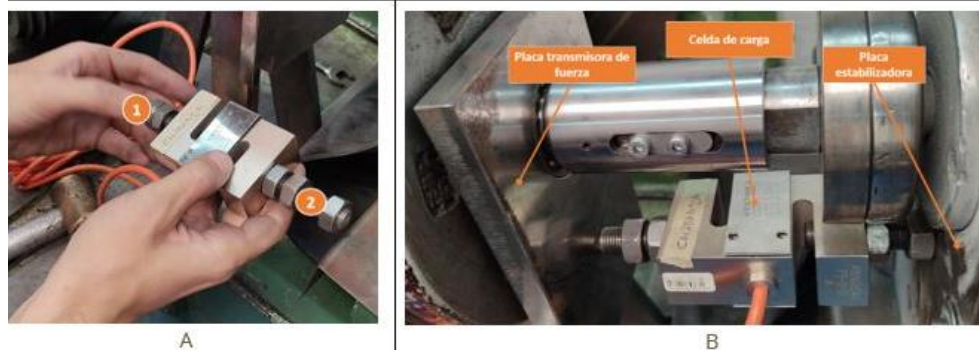
Figura 10: (A) Tornillos de sujeción de soporte de eje estabilizador. (B) Volante de movimiento del carro longitudinal en dirección X.



7. Instalación de la celda de carga: El extremo 2 (Ver **Figura 11-A**) se debe sujetar a la placa estabilizadora mediante dos tuercas que deben ser apretadas con la **llave inglesa 9/16"**, el extremo 1 es libre por tanto sólo tiene contacto con la placa transmisora de fuerza. (Ver **Figura 11-B**).

Anexo A. Máquina esmeriladora; Manual de usuario y memorias de diseño.

Figura 11: (A) Celda de carga libre. (B) Celda de carga instalada en el montaje.

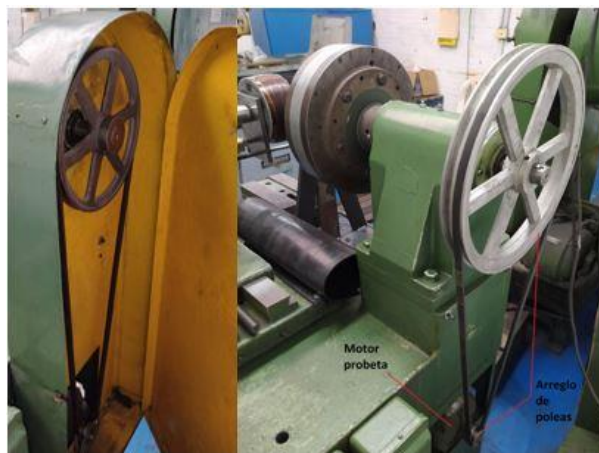


8. Instalación de la combinación correcta de poleas: Retirar la carcasa (Ver **Figura 12**) que protege al sistema de poleas con el fin de dar espacio para instalar alguna de las configuraciones que se muestran en la **Tabla 3**.

Tabla 3: Configuraciones para las velocidades requeridas.

Diámetro polea conducida (d) -[in]	Diámetro polea conductora(D) -[in]	Referencia de la correa	Velocidad (km/h)
13	1.5	A-79	1.5
4	1.5	A-69	5

Figura 12: Carcasa de protección del sistema de poleas



9. Instalación de indicadores visuales: En el soporte destinado para soportar estos indicadores instalar: 1. Tacómetro digital 2. Display celda de carga 3. Cronómetro. Ver **Figura 13**.

10. **Figura 13:** Soporte con indicadores visuales instalados.



E. Verificaciones pre funcionamiento

▪ Medición de velocidad angular

La medición de la velocidad angular se realiza ubicando el haz de luz infrarroja que emite el tacómetro digital de forma perpendicular a la marca blanca ubicada en el diámetro externo del plato de mordazas como se muestra en la **Figura 14**. Posteriormente se pone en movimiento el sistema y se lee la medida de la velocidad angular en RPM mostrada en el Display del tacómetro, esta medida se compara con la que se muestra en la **Tabla 4**.

Tabla 4: Velocidades angulares de referencia.

Velocidad lineal deseada[km/h]	Velocidad angular[rpm]
3	169
10	564

Anexo A. Máquina esmeriladora; Manual de usuario y memorias de diseño.

Figura 14: Instrucciones para el posicionamiento del tacómetro digital con respecto al plato de mordazas.

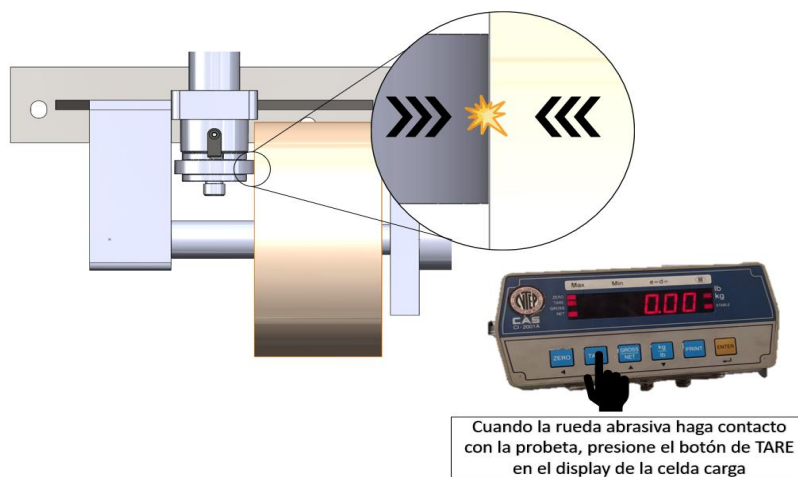


▪ Medición de carga

La medición de carga se debe realizar de la siguiente manera:

1. Acercar la piedra abrasiva hasta que se establezca contacto con la probeta. Ver **Figura 15**.
2. Cuando se establezca el contacto se debe tarar la celda de carga de modo que marque el cero de la medición. Ver **Figura 15**.
3. Controlar el avance mediante la volante del carro longitudinal, de forma que se avance 6 décimas en total, las cuales pueden leerse en el dial de la volante ver **Figura 16**. Ó de forma alternativa se puede establecer y mantener manualmente un valor de carga en el Display de la celda de carga y así realizar los ensayos.

Figura 15: Procedimiento para configurar el cero de la medición de la celda de carga.



108 Influencia de las condiciones de esmerilado sobre la aparición de capa blanca en rieles tipo R400HT para uso en el Metro de Medellín.

Figura 16: Sistema aplicación de profundidad de corte a la probeta.



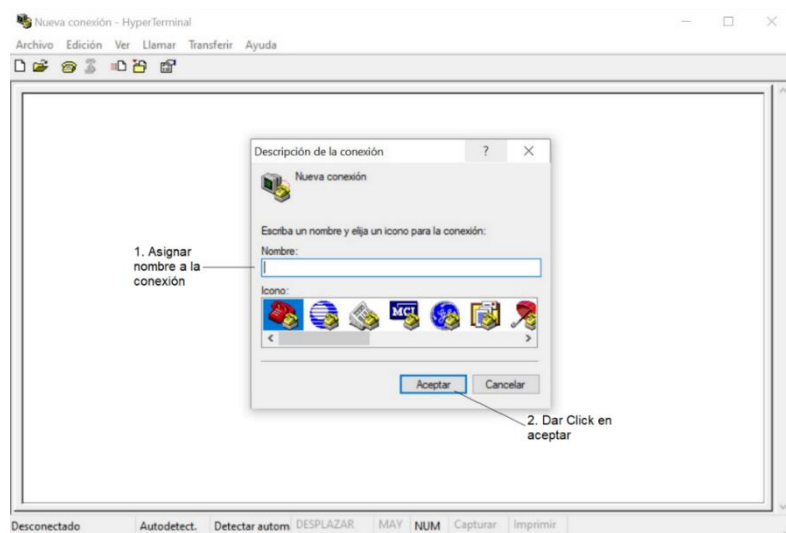
4. Conectar el computador portátil al Display de la celda de carga, por medio de un conector USB a un Serial de nueve (9) pines RS-232, esto con el fin de guardar la información de la carga aplicada en función del tiempo, Ver **Figura 17**.
5. Verificar por medio de la aplicación HyperTerminal que la conexión entre el Display y el computador este activa y se esté dando transmisión de datos, lo primero es asignarle un nombre a la conexión y dar Click en aceptar. Ver **Figura 18**.

Figura 17: Conexión del computador portátil al Display de la celda de carga.



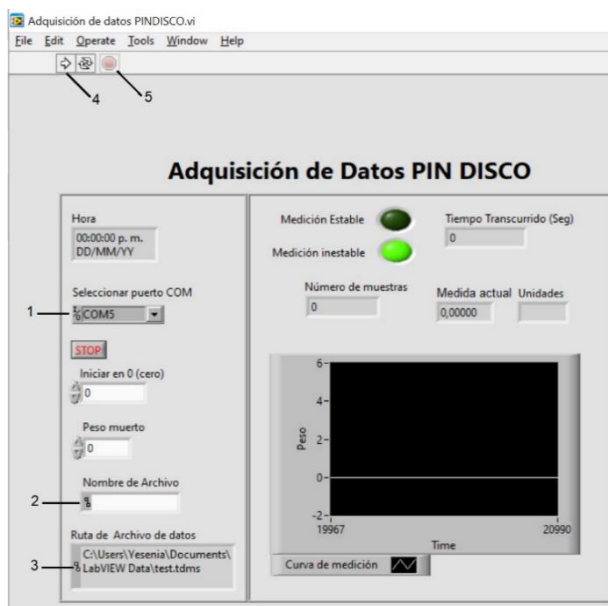
Anexo A. Máquina esmeriladora; Manual de usuario y memorias de diseño.

Figura 18: Interfaz HyperTerminal; configuración inicial.



6. Configura la aplicación de adquisición de datos, ver **Figura 19**.
 - 1. Seleccionar el puerto
 - 2. Asignar un nombre al archivo
 - 3. Asignar una ruta para guardar el archivo
 - 4. Arrancar el conteo
 - 5. Finalizar el conteo

Figura 19: Interfaz adquisición de datos; configuración inicial.



F. Modelos 3D y planos de taller

▪ Modelos 3D

Figura 20: Sistema completo explosionado.

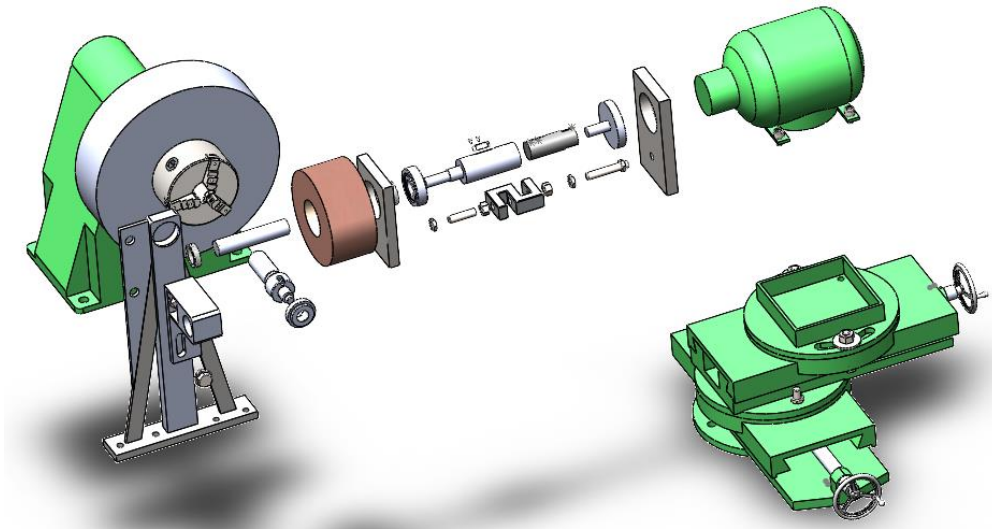
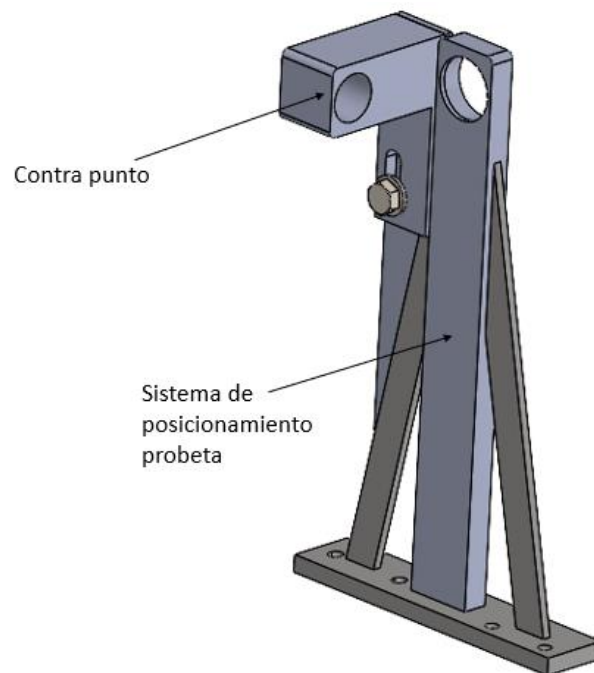
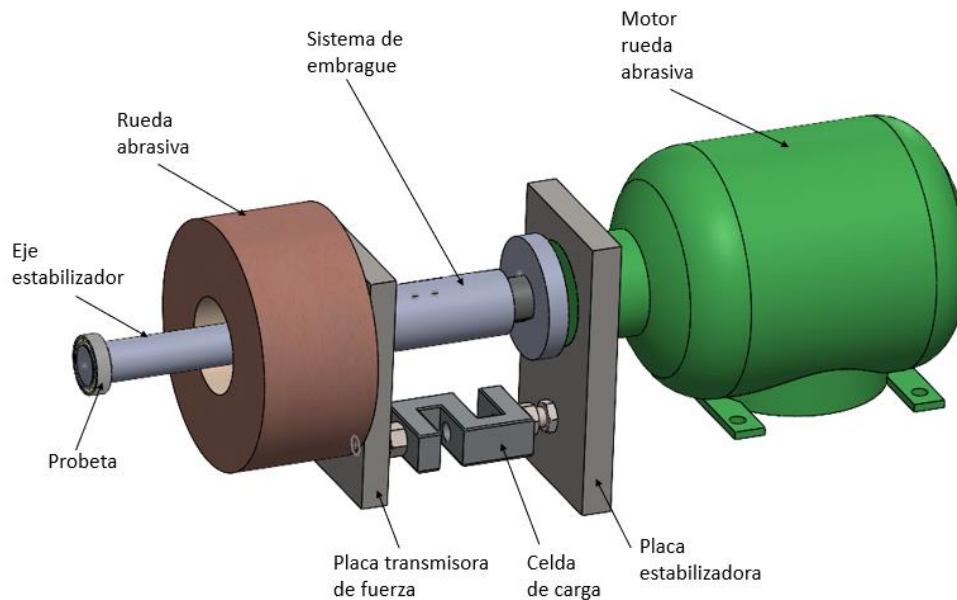


Figura 21: Sistema de posicionamiento de probeta y contra punto.



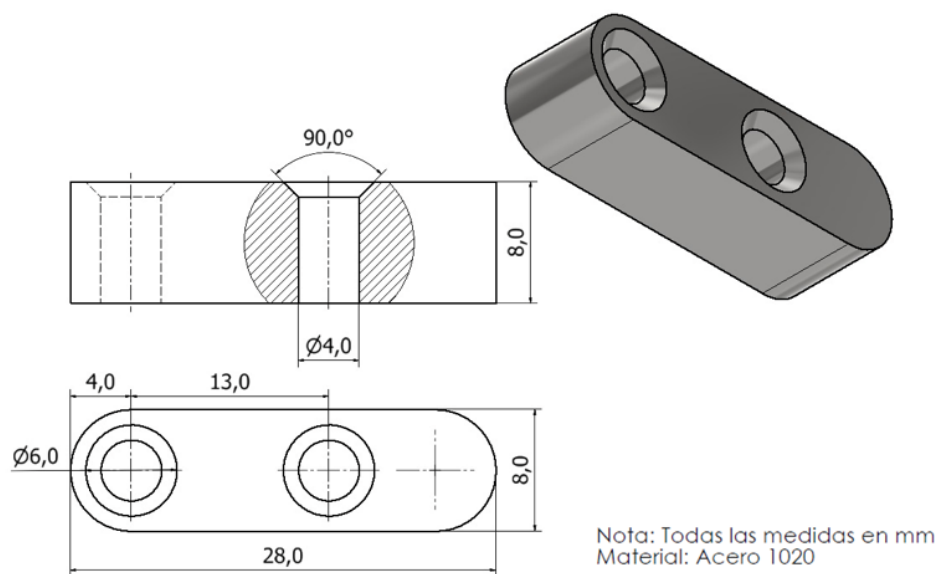
Anexo A. Máquina esmeriladora; Manual de usuario y memorias de diseño.

Figura 22: Sistema de transmisión.



▪ Planos elementos fabricados

Figura 23: Chaveta - Sistema de transmisión.



Anexo A. Máquina esmeriladora; Manual de usuario y memorias de diseño.

Figura 26: Extensor motor - Sistema de transmisión.

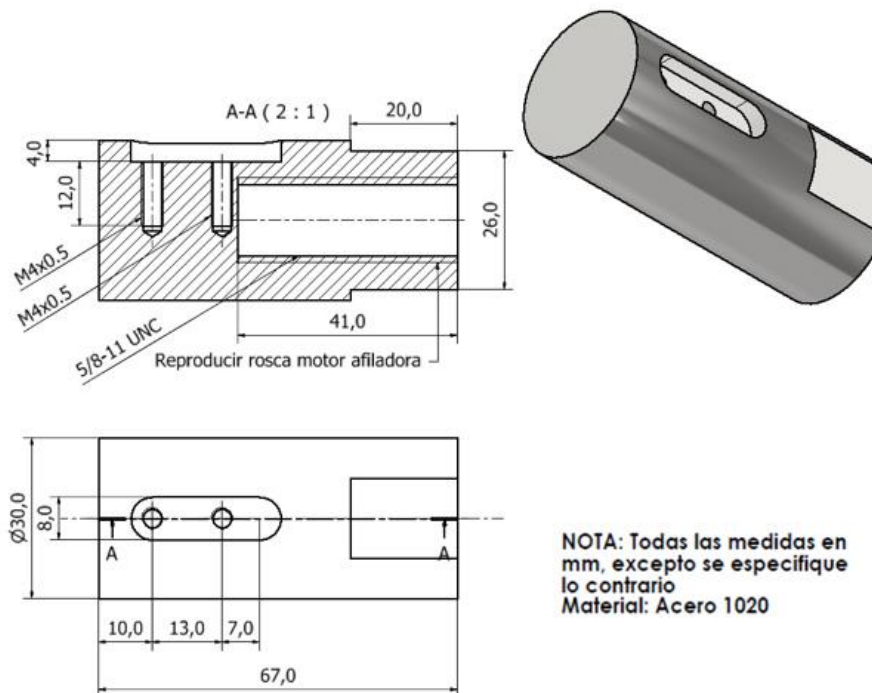
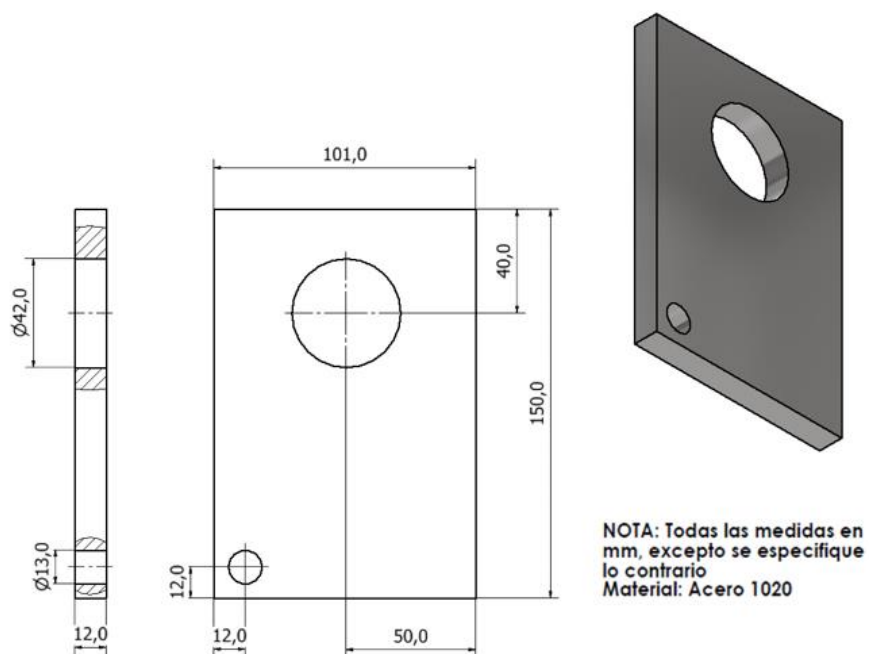
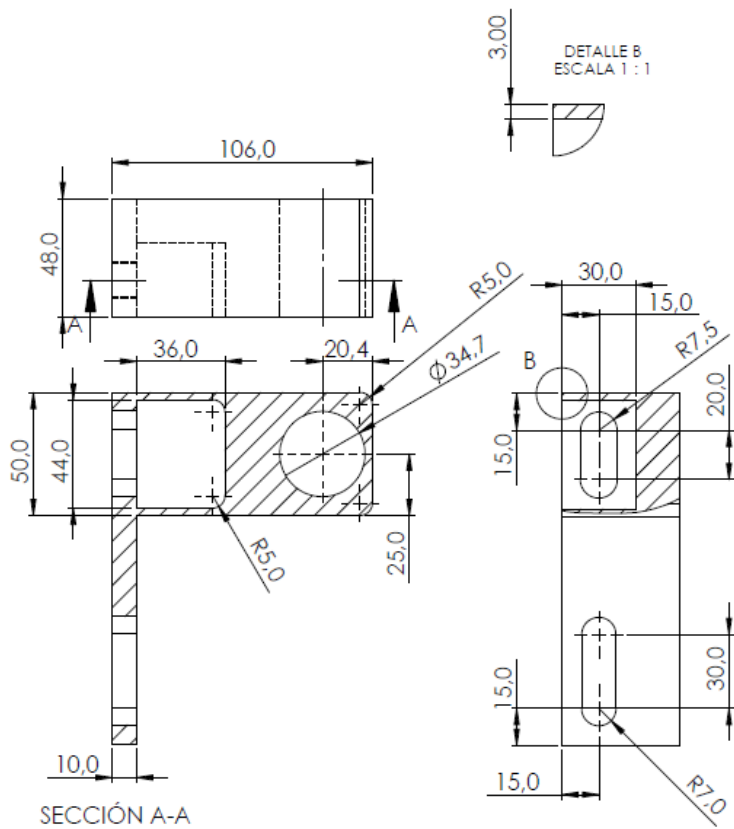


Figura 27: Placa transmisora de fuerza - Sistema de transmisión.



114 **Influencia de las condiciones de esmerilado sobre la aparición de capa blanca en rieles tipo R400HT para uso en el Metro de Medellín.**

Figura 28: Contra punto - Sistema posicionamiento de probeta.



Nota: Todas las medidas en mm, excepto se especifique lo contrario.

Material: Acero 1020

Bibliografía

- [1] C.R Ferguson, A.T Kirkpatrick, Motores de combustión interna (2^a ed.) John Wiley, Nueva York (2001).
- [2] W. Jamison, Wear of steel in combined rolling and sliding, ASLE Trans., 25 (1) (1980), pp 71-78. W.K. Chen, Linear Networks and Systems (Book style). Belmont, CA: Wadsworth, 1993, pp. 123-135.
- [3] V. Reddy, G. Chattopadhyay, P.O. Larsson, D. J. Hargreaves, Modelling and analysis of Rail maintenance cost. Production Economics, 105 (2007), pp 475-482.
- [4] A. Valencia, J.L. Rendón, El problema del desgaste ondulatorio en las vías férreas: la metalurgia de un caso real, Dyna 144 (2004) 29-38.
- [5] F.J. Franklin, G.J. Weeda, A. Kapoor, E.J.M. Hiensch, Rolling contact fatigue and wear behaviour of the infrastar two-material rail, Wear vol 258, pag 10481054, 2005.
- [6] V. Reddy, G. Chattopadhyay, P.O. Larsson-Kraik, and T. Allahmanli, Evaluation of technical vs economic decisions in rail grinding. 2008 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 2008, pp. 496-500.
- [7] A. Zarembski. The art and science of rail grinding. Simmons-Boardman Bokks, Inc. 2005.
- [8] P. A. Cuervo. Análisis experimental del efecto del proceso de reperfilado sobre el desgaste y fatiga por contacto de rodadura de riel en el sistema rueda-riel en el Metro de Medellín, Trabajo de Grado. Universidad Nacional de Colombia, Medellín 2014.
- [9] D. Zapata, J.F. Santa, J. Sanchez, J. Gonzalez, A .Toro, Effect of Rail Grinding Conditions on Sub-Surface. Microstructure and Surface Roughness of Fatigued Rails. 1st. International Brazilian Conference on TribologyTriboBr-2010, Rio de Janeiro, Brasil. November 2010.
- [10] M. Steenbergen. Rolling contacts fatigue in relation to rail grinding, Wear 356-357, 2016, pp. 110-121. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2016.03.015>.
- [11] A. Al-Juboori, H. Zhu, D. Wexler, H. Li, C. Lu, A. McCusker, J. McLeod, S. Pannila. Characterization of White Etching Layers formed on rails subjected to different traffic conditions, Wear 436-437, 2019.

- [12] S. Zakharov. Wheel/Rail Performance. En Guidelines to Best Practice for Heavy Haul Railway Operations: Wheel and Rail Interface Issues (págs. 1-86). Virginia Beach, Virginia, USA: International Heavy Haul Association, 2001.
- [13] Venzario (2009), Mantenimiento ferroviario. Amolado de carriles, <https://venzario.wordpress.com/2009/11/13/mantenimiento-ferroviario-amolado-de-carriles/> (Revisado Dicieimbre 8, 2023)
- [14] W. J. Harris Jr, W. Ebersöhn, J. Lundgren, H. Tournay, y S. Zakharov, Guidelines to Best Practices for Heavy Haul Railway Operations: Wheel and Rail Interface Issues, First Edition. International Heavy Haul Association (IHHA), 2001.
- [15] The Railway Educational Bureau. The Basics of Railroad Wheels and Wheel Inspection (3rd Edition ed.). Omaha, Nebraska, United States of America, 2013.
- [16] A. Kapoor, F.J. Franklin. Tribological layers and the wear of ductile materials. Wear 245. 204–215, 2000
- [17] M. Schargott, V.L. Popov, A.I. Dmitriev, S.G. Psakhie. Development of surface topography for the rail–wheel contact. Wear, 2008.
- [18] J.W. Ringsberg, M. Loo-Morrey, B.L. Josefson, A. Kapoor, J.H. Beynon. Prediction of fatigue crack initiation for rolling contact fatigue. International Journal of Fatigue, Ed.22, p.205-215, 2000.
- [19] R. Lewis y U. Olofsson. Wheel-rail interface handbook, 1.a ed. Boca Raton; Oxford: CRC Press ; Woodhead Pub, 2009.
- [20] X.S. Jin, W.H. Zhang, J. Zeng, Z.R. Zhou, Q.Y. Liu, Z.F. Wen. Adhesion experiment on a wheel/rail system and its numerical analysis. Proc Inst Mech Eng Part J J Eng Tribol;218:293–303, 2004.
- [21] Y. Areiza. Efecto de la fuerza de fricción en el contacto rueda-riel sobre el consumo medio de energía en operación del Metro de Medellín, Tesis de Maestría en ingeniería – materiales y procesos, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, 2014.
- [22] H. Harrison. The development of a low creep regime, hand-operated tribometer. Wear; 265:1526–31, 2008.
- [23] E. Magel, Y. Liu. Study of friction—measurement, analysis and practical implications for the wheel/rail contact. In: Proceedings of the eighth international conference on contact mechanics and wear of rail/wheel systems (CM2009), Firenze, Italy; September 15–18, 2009.
- [24] S.R. Lewis, R. Lewis, G. Evans, Buckley-Johnstone LE. Assessment of railway grease performance using a twin-disc tester. Wear;314:205–12, 2014.

- [25] D. Zapata, J. Jaramillo, H. Sierra, A. Toro. Desgaste de aceros bainíticos y perlíticos en el sistema rueda-riel. Memorias Tercer Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica y Primero de Ingeniería Mecatrónica. Bogotá, Colombia, 2006.
- [26] A. Kapoor, F.J. Franklin a, S.K. Wong a, M. Ishida. Surface roughness and plastic flow in rail wheel contact. *Wear*.Ed.253. p. 257-264, 2002.
- [27] The U.K.'s Rail Safety & Standards Board, <http://www.rssb.co.uk/>, Project T355: Management and understanding of Rolling Contact Fatigue
- [28] B. Bushan, *Modern Tribology Handbook*, V1, ISBN 0-8403-6, P 274-275,2001
- [29] F.A. Suárez. Análisis del Modelo de Archard para Desgaste por Deslizamiento en Seco. Trabajo de Grado. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. p. 64. 2002.
- [30] J.A.Williams. *Engineering Tribology*, Oxford University Press, Capitulo 11, 1994.
- [31] R. Rabinowicz. *Friction & Wear of Materials*. John Wiley & Sons.Ed.1.p. 125- 233,1965.
- [32] K.H. Zum Gahr.*Microstructure and Wear of Materials*. Elsevier. p. 351-524. 1987.
- [33] M. Soler, M. Gentile. *Tecnatura superior en material rodante ferroviario*, Universidad tecnológica nacional, 2005.
- [34] G. Girsch, N. Frank, P. Pointner, *New Rail Grades – a Technical Performance Overview*, 8th IHHA Conference, Rio de Janeiro, Brazil, 2005.
- [35] Y. Wang, T. Lei. Wear behavior of steel 1080 with different microstructures during dry sliding. *Wear*, 194, 44-53, 1996.
- [36] D. Zapata. Efecto de la microestructura sobre la resistencia al desgaste por rodadura - deslizamiento de aceros ferroviarios. Trabajo de Grado. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2011.
- [37] M. Hillert. The Formation Of Pearlite, Descomposition Of Austenite by Diffusional Process eds. H.I. Aaronson & V.F. Zackay, interscience, pp. 197-247, 1962.
- [38] F. P. García, R. W. Lewis, A. M. Tobias, and C. Roberts. Life cycle costs for railway condition monitoring. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 44, no. 6, pp. 1175–1187, Nov. 2008.
- [39] Metro de Medellín, Reporte interno: Actividades de mantenimiento de vía permanente y vehículos de pasajeros relevantes para implementar la norma uic-518 en el metro de Medellín ltda, 2005.
- [40] A. Toro, J.F. Santa, G. Idárraga y J. Sánchez. Identificación de mecanismos de desgaste en rieles de vía comercial del Metro de Medellín, *Revista Colombiana de Materiales* N. 5 pp. 72-77, 2013.

- [41] U. Olofsson and R. Lewis. Basic tribology of the wheel-rail contact. Wheel-rail interface handbook, First Edition. ISBN 978-1-84569-412-8, Cap 2, 2006.
- [42] D.I. Fletcher, F.J. Franklin, A. Kapoor. Rail surface fatigue and wear. Wheel-rail interface handbook, First Edition. ISBN 978-1-84569-412-8, Cap 9, 2006.
- [43] Z.Y. Zhang, W. Shang, H.H. Ding, J. Guo, H.Y. Wang, Q.Y. Liu, W.J. Wang, Thermal model and temperature field in rail grinding process based on a moving heat source, Appl. Therm. Eng. 106 (2016) 855–864, <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.06.071>.
- [44] J. Ahlström, B. Karlsson. Analytical 1D model for analysis of the thermally affected zone formed during railway wheel skid, Wear 232 (1999) 15–24, [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00167-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00167-2).
- [45] J. Kalousek, E. Magel, The “magic” wear rate, Railw. Track Struct. 50–52,1997.
- [46] R.I. Carroll, J.H. Beynon. Rolling contact fatigue of white etching layer Part 1 Crack morphology, Wear 262 (2007) 1253–1266, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2007.01.002>.
- [47] G. Baumann, H.J. Fecht, S. Liebelt. Formation of white-etching layers on rail treads, Wear 191 (1996) 133–140, [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(95\)06733-7](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(95)06733-7).
- [48] C.J. Rasmussen, X. Zhang, H.K. Danielsen, S. Fæster. Grinding induced martensite on the surface of rails, Risoe International Symposium on Materials Science. Proceedings 35439-446, 2014.
- [49] C. J. Rasmussen, S. Fæsterb, S. Dharb, J. V. Quaadeb, M. Binib, H. K. Danielsenb. Surface crack formation on rails at grinding induced martensite white etching layers, Wear 384–385 8-14, 2017.
- [50] R. Stock, W. Kubin, W. Daves, K. Six. Advanced maintenance strategies for improved squat mitigation. Wear 436-437, 2019.
- [51] A. Al-Juboori, D. Wexler, H. Li, H. Zhu, C. Lu, A. McCusker, J. McLeod, S. Pannil, Z. Wang. Squat formation and the occurrence of two distinct classes of white etching layer on the surface of rail steel. International Journal of Fatigue 104, pp. 52-60, 2017.
- [52] S. L. Grassie, D. I. Fletcher, E. A. Gallardo, P. Summers. Studs: a squat type defect in rails. Journal of Rail and Rapid Transit, pp. 243-256, 2012.
- [53] S. L. Grassie. Studs and squats; The evolving story. Wear 366-367, pp. 194-199, 2016.
- [54] Robel (2019). Maquinas Herramientas. <https://www.robels.com/es/maquinas-herramientas/esmerilar/> (Revisado Diciembre 8, 2023)
- [55] Klipartz (2019). Rieles ferroviarios. <https://www.klipartz.com/es/search?q=riel> (Revisado noviembre 18, 2023)
- [56] Ghh-bonatrans (2019). Ejes montados. <https://www.ghh-bonatrans.com/es/productos/ejes-montados/> (Revisado noviembre 18, 2023)

- [57] K. Hono, M. Ohnuma, M. Murayama, S. Nishida, A. Yoshie, and T. Takahashi. Cementite decomposition in heavily drawn pearlite steel wire. *Scr. Mater.*, vol. 44, pp. 977–983, 2001.
- [58] M. Masoumi, N. B. De Lima, G. Tressia, A. Sinatora, and H. Goldenstein. Microstructure and crystallographic orientation evolutions below the superficial white layer of a used pearlitic rail. *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 8, no. 6, pp. 6275–6288, 2019, doi: 10.1016/j.jmrt.2019.10.021.
- [59] J. Seo, S. Kwon, H. Jun, and D. Lee. Numerical stress analysis and rolling contact fatigue of White Etching Layer on rail steel. *Int. J. Fatigue*, vol. 33, no. 2, pp. 203–211, 2011, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2010.08.007.
- [60] D. T. Eadie et al. The effects of top of rail friction modifier on wear and rolling contact fatigue: Full-scale rail-wheel test rig evaluation, analysis and modelling. *Wear*, vol. 265, no. 9–10, pp. 1222–1230, 2008, doi: 10.1016/j.wear.2008.02.029.
- [61] S. Li, J. Wu, R. H. Petrov, Z. Li, R. Dollevoet, and J. Sietsma. Brown etching layer: A possible insight into the crack initiation of rolling contact fatigue in rail steels. *Eng. Fail. Anal.*, vol. 66, pp. 8–18, 2016, doi: 10.1016/j.engfailanal.2016.03.019.
- [62] A. K. Saxena, A. Kumar, M. Herbig, S. Brinckmann, G. Dehm, and C. Kirchlechner. Micro fracture investigations of white etching layers. *Mater. Des.*, vol. 180, p. 107892, 2019, doi: 10.1016/j.matdes.2019.107892.
- [63] I. Marinescu, M. Hitchiner, E. Uhlmann, W. Brian, R. Ichiro. *Handbook of Machining with Grinding Wheels*. Taylor & Francis Group, 2007.
- [64] W. Koenig, and F. Klocke. *Fertigungsverfahren Band 2. Schleifen, Honen, Läppen*. 3. Auflage, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 1996.
- [65] J. Jaramillo. Efecto del acabado superficial inicial y la lubricación en el desgaste aceros de perlíticos bajo condiciones rodante deslizantes. Tesis de Maestría en ingeniería – materiales y procesos, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, 2014.
- [66] AENOR, Norma UNE – EN 13674. Aplicaciones ferroviarias. Vías y carriles.
- [67] AENOR, Norma UNE – EN 13362. Aplicaciones ferroviarias. Ejes montados y Bogies. Ruedas. Requisitos de producto
- [68] W.J. Wang, K. Zhou, Q.Y. Liu et al. Influence of granularity of grinding Stone on grinding force and material removal in the rail grinding process. *Journal of Engineering Tribology* 1994-1996 (vols 208-210) · June 2018
- [69] K. Zhou, H. Ding, R. Wang, J. Yang, J. Guo, Q. Liu, W. Wang W. Experimental investigation on material removal mechanism during rail grinding at different forward speeds. *Tribology International* (2019), doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.106040>.
- [70] J.F. Santa, P. Cuervo, P. Christoforou, M. Harmon, A. Beagles, A. Toro, R. Twin disc assessment of wear regime transitions and rolling contact fatigue in R400HT – E8 pairs. *Wear* 432–433,102916, 2019.
- [71] R. Stock, R. Pippan. Rail grade dependent damage behaviour–Characteristics and damage formation hypothesis, *Wear* 314 (1–2), 44–50, 2014.

- [72] A. Kumar, G. Agarwal, R. Petrov, S.Goto, J. Sietsma, M. Herbig. Microstructural evolution of white and brown etching layers in pearlitic rail steels, *Acta Materialia* 171 (2019) 48 – 64, 2019.
- [73] H. Ding, J. Yang, W. Wang, Q. Liu, J. Guo, Z. Zhou. Wear mechanisms of abrasive wheel for rail facing grinding, *Wear* 504-505, 204421, 2022.
- [74] K. Zhou, H Ding, M, Steenbergen, W. Wang, J Guo, Q. Liu. Temperature field and material response as a function of rail grinding parameters, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 175, 121366, 2021.
- [75] P. Merino, S. Bouvier, S. Cazottes, J. Marteau, V. Lafil', Y. Berthier. How to reproduce a mechanical white etching layer (WEL) on rail surface thanks to a new experimental wheel-rail contact test bench, *Wear* 482-483, 203945, 2021.
- [76] B. Hieu, A. Al-Juboori, H. Zhu, Q. Zhu, H. Li, K. Tieu. Formation mechanism and evolution of white etching layers on different rail grades, *International Journal of Fatigue* 163, 107100, 2022.
- [77] L. Wilches, L. Wang, B. Mellor, A. Schwedt, J. Mayer, W. Holweger. Characterisation of white etching structures formed in annealed AISI 52100 through High Pressure Torsion (HPT), *Tribology International* 184, 108432, 2023.
- [78] L. Wilches, L Wang, B. Mellor, Y Huang. White etching structures in annealed 52100 bearing steel arising from high-pressure torsion tests, *Tribology International* 164, 10718, 2022.