



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL



**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
UNIDAD ZACATENCO**

**SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
UNIDAD ZACATENCO**

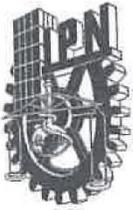
**“EVALUACIÓN TRIBOLÓGICA DE TEXTURAS GENERADAS
POR UN PROCESO DE REPERFILADO EN RIELES DE SISTEMAS
FERROVIARIOS”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
MECÁNICA**

**PRESENTA
IRVIN ALARI VÁSQUEZ CHACÓN**

CIUDAD DE MÉXICO, DICIEMBRE 2022.



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México siendo las 11:00 horas del día 14 del mes de diciembre del 2022 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Posgrado de: la sección de estudios de posgrado e investigación de la ESIME Zacatenco para examinar la tesis titulada:

Evaluación tribológica de texturas generadas por un proceso de reperfilado en rieles de sistemas ferroviarios.

del (la) alumno (a):

Apellido Paterno:	Vásquez	Apellido Materno:	Chacón	Nombre (s):	Irvin Alari
-------------------	---------	-------------------	--------	-------------	-------------

Número de registro: B 1 8 0 7 6 6

Aspirante del Programa Académico de Posgrado: Doctorado en ciencias en ingeniería mecánica

Una vez que se realizó un análisis de similitud de texto, utilizando el software antiplagio, se encontró que el trabajo de tesis tiene 3 % de similitud. **Se adjunta reporte de software utilizado.**

Después que esta Comisión revisó exhaustivamente el contenido, estructura, intención y ubicación de los textos de la tesis identificados como coincidentes con otros documentos, concluyó que en el presente trabajo SI NO SE CONSTITUYE UN POSIBLE PLAGIO.

JUSTIFICACIÓN DE LA CONCLUSIÓN: *(Por ejemplo, el % de similitud se localiza en metodologías adecuadamente referidas a fuente original)*
Dentro del trabajo presentado por el alumno no se localizan textos, metodologías o resultados que coincidan con otros trabajos existentes, las similitudes se encuentran debidamente referidas.

****Es responsabilidad del alumno como autor de la tesis la verificación antiplagio, y del Director o Directores de tesis el análisis del % de similitud para establecer el riesgo o la existencia de un posible plagio.**

Finalmente y posterior a la lectura, revisión individual, así como el análisis e intercambio de opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR** **SUSPENDER** **NO APROBAR** la tesis por **UNANIMIDAD** o **MAYORÍA** en virtud de los motivos siguientes:
Los resultados de este trabajo han sido publicados en revista JCR, además que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

COMISIÓN REVISORA DE TESIS

Dr. Ezequiel Alberto Gallardo Hernández
Director de Tesis

Dra. Marisa Moreno Ríos
Segundo vocal

Dr. Manuel Vázquez
Presidente

Dr. Germán Anibal Rodríguez Castro
Tercer vocal

Dr. Orlando Susarrey Huerta
Secretario

Dr. José Osorio
PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES



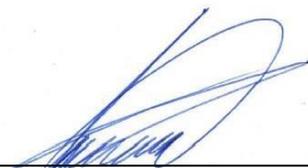
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA DE AUTORIZACIÓN DE USO DE OBRA PARA DIFUSIÓN

En la Ciudad de México el día 9 del mes de diciembre del año 2022, el (la) que suscribe Irvin Alari Vásquez Chacón alumno(a) del programa Doctorado en Ciencias en Ingeniería Mecánica con número de registro B180766, adscrito(a) a ESIME Zacatenco manifiesta que es autor(a) intelectual del presente trabajo de tesis bajo la dirección de Dr. Ezequiel Alberto Gallardo Hernández y cede los derechos del trabajo intitulado Evaluación tribológica de texturas generadas por un proceso de reperfilado en rieles de sistemas ferroviarios, al Instituto Politécnico Nacional, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expresado del autor y/o director(es). Este puede ser obtenido escribiendo a las siguiente(s) dirección(es) de correo. alari.chacon@gmail.com. Si el permiso se otorga, al usuario deberá dar agradecimiento correspondiente y citar la fuente de este.



Irvin Alari Vásquez Chacón

Resumen

El esmerilado o reperfilado de rieles como estrategia de mantenimiento juega un papel importante en el control de defectos en el riel producidos por el desgaste, defectos por manufactura o grietas generadas debido a la fatiga por contacto de rodadura, así como la reducción del ruido y el mantenimiento de la estabilidad del tren al mantener la geometría original del riel. Sin embargo, la rugosidad y la topografía de la superficie del riel resultante después de un proceso de reperfilado y su rendimiento a través del coeficiente de fricción y la tasa de desgaste durante el periodo de running-in no se ha estudiado de forma exhaustiva.

Este trabajo tiene como objetivo evaluar el proceso de running-in de diferentes texturas en especímenes de discos de material riel bajo diferentes parámetros de rugosidad: R_a , R_q , R_t , R_p , R_v , R_z , S_{sk} y S_{ku} . Las diferentes texturas se obtuvieron variando la cantidad de material removido y la velocidad de avance en el reperfilado, se utilizaron piedras comerciales con propiedades similares a las piedras abrasivas utilizadas en condición real. Las pruebas se realizaron utilizando un tribómetro perno sobre disco en condición seca y lubricada con grasa para curvas de sistemas ferroviarios. Los especímenes de perno se fabricaron a partir de una sección de rueda con rugosidad estándar.

Los resultados mostraron que, en condiciones secas, las probetas de riel con patrones superficiales más rugosos produjeron valores de coeficientes de fricción y tasas de desgaste altos. Por otra parte, en condiciones lubricadas, el lubricante no garantiza un coeficiente de fricción bajo, debido a que puede presentarse una incompatibilidad de las superficies con los aditivos del lubricante.

Adicionalmente, se realizó un análisis microestructural en la sección transversal de las probetas de riel y se tomaron imágenes de las huellas de desgaste para identificar los diferentes mecanismos de desgaste y cambios en la microestructura debido al proceso de reperfilado.

Abstract

Rail grinding as a maintenance strategy plays an important role in controlling rail defects caused by wear, manufacturing defects or cracks generated due to rolling contact fatigue, noise reduction and the stability of the train by reshaping the rail. However, the roughness and topography of the resulting rail surface after a grinding process and its performance through coefficient of friction and wear rate during the running-in period has not been extensively studied.

This work aims to evaluate the rolling process of different textures in rail material disk specimens under different roughness parameters: R_a , R_q , R_t , R_p , R_v , R_z , S_{sk} and S_{ku} . The different textures were obtained by varying the amount of material removed and the grinding work speed, commercial grinding wheels with properties similar to the grinding wheels used in real condition were used. The tests were carried out using a pin on disk tribometer in dry and grease-lubricated condition for rail system curves. The pin specimens were fabricated from a wheel section with a standard roughness.

The results showed that, under dry conditions, rail specimens with rougher surface patterns produced high values of coefficients of friction and wear rates. On the other hand, under lubricated conditions, the lubricant does not guarantee a low coefficient of friction, due to the incompatibility of the surfaces with the lubricant additives.

Additionally, a microstructural analysis was carried out on the cross section of the rail specimens and images of the wear tracks were taken to identify the different wear mechanisms and changes in the microstructure due to the grinding process.

Contenido

Resumen.....	2
Abstract	3
Simbología	10
Objetivo general.....	12
Objetivos particulares.....	12
Justificación	13
Introducción	15
Capítulo I: Marco Teórico.....	18
1.1. Sistemas ferroviarios	18
1.1.1. Red ferroviaria en México	19
1.1.2. Componentes básicos rueda y riel	20
1.1.3. Interfaz rueda-riel.	22
1.1.4. Fricción, adhesión y deslizamiento.	24
1.1.5. Contacto mecánico	27
1.1.6. Regímenes de desgaste	30
1.2. Defectos en rieles y métodos de detección	32
1.2.1. Fatiga por contacto de rodadura (Rolling contact fatigue)	35
1.2.2. Tasa mágica de desgaste.....	38
1.3. Reperfilado de rieles como medida de mantenimiento.	39
1.3.1. Reperfilado de rieles a través de los años	39
1.3.2. Conceptos básicos sobre reperfilado.....	42
1.3.3. Técnicas de reperfilado.....	43
1.3.4. Estrategias de reperfilado	45
1.3.5. Reducción de costos	49
1.3.6. Optimización del patrón de reperfilado	50
1.3.7. Materiales abrasivos utilizados en el reperfilado	52
1.3.8. Variables que afectan el proceso de reperfilado.....	52
1.3.9. Reperfilado de ruedas	58
1.4. Capa blanca (White etching layer)	59
1.5. Efecto de la rugosidad	60
1.5.1. Parámetros de medición de rugosidad	61
1.5.2. Parámetros de caracterización de textura superficial	63

1.5.3. Proceso de reacondicionamiento o running-in.....	64
1.6. Lubricación	65
Capítulo II: Metodología de experimentación	68
2.1. Preparación de probetas (pernos y discos).....	68
2.2. Parámetros de remoción de material	74
Capítulo III: Resultados	76
3.1. Evaluación de la rugosidad.....	76
3.2. Evaluación del running-in en condición seca.	79
3.2.1. Pernos en condición seca.....	82
3.3. Evaluación del proceso de running-in en condiciones lubricadas	83
3.3.1. Pernos en condición lubricada	86
3.4. Evaluación microestructural	87
Capítulo IV: Discusión de resultados	89
Conclusiones	92
Anexo A: Ecuaciones de contacto mecánico de Hertz para un contacto esfera-plano.	93
Anexo B: Área de contacto real, modelo de Greenwood – Williamson.	95
Anexo C: Ecuación de Archard para cálculo de la tasa y coeficiente de desgaste	97
Anexo D Ecuaciones de esmerilado (Grinding parameters)	98
Anexo E Artículos científicos publicados y participación en proyectos	102
Referencias.....	107

Índice de figuras

Fig. 1 Mapa de la infraestructura ferroviaria en México [8].	20
Fig. 2 Perfil y partes principales del riel.	21
Fig. 3 Perfil y partes principales de rueda.	22
Fig. 4 Regiones de contacto entre rueda y riel [10].	23
Fig. 5 Coeficientes de fricción deseables dependiendo el tipo de contacto rueda-riel [10]	24
Fig. 6 Fuerzas interactivas típicas de la rueda al riel en un bogie pasando por una curva [10].	26
Fig. 7 Curva y relación entre adhesión y deslizamiento en el contacto rueda riel[12].	26
Fig. 8 a) Distribución de presión de contacto simétricamente distribuida con un diámetro de 2a b) contornos de los esfuerzos cortantes en un contacto deslizante Hertziano, tracción es de izquierda a derecha [13].	29
Fig. 9 Contacto de dos superficies rugosas, todas las asperezas se asumen con la misma forma [20].	29
Fig. 10 Mapa de los diferentes valores de presión de contacto y velocidad de deslizamiento para diferentes zonas de contacto rueda-riel [21].	30
Fig. 11 Regímenes de desgaste y transiciones en aceros de rueda [25].	31
Fig. 12 Defectos en rieles a) shelling severo b) shelling vista transversal c) head checks en costado de riel d) ratcheting en riel asociado a FCR e) tache Ovale f) squat en superficie de rodadura [33].	34
Fig. 13 Tres etapas de crecimiento de grietas debido a la FCR [51].	36
Fig. 14 Respuesta del material a cargas cíclicas [53].	37
Fig. 15 Tasa mágica de desgaste [69].	39
Fig. 16. Efecto de la aplicación de pummel en la banda de rodadura de la rueda a) reperfilado sin pummel en el que se observa mucho desgaste en un solo punto de la rueda b) aplicación de pummel distribuyendo el desgaste a lo largo de la rueda [75].	41
Fig. 17 Carro de reperfilado equipado con ruedas abrasivas [82].	43
Fig. 18 Reperfilado por rueda abrasiva [84].	44
Fig. 19 Operación de fresado de rieles (milling) [86].	44
Fig. 20 Diagrama esquemático de esmerilado de riel por cinta abrasiva [90].	45
Fig. 21 Los patrones de reperfilado en rieles son descritos por el número relativo de ruedas abrasivas desplegadas en seis segmentos clave [69].	51
Fig. 22 Proceso de remoción de material y mecanismos de desgaste presentados en el proceso [116].	52

Fig. 23 Velocidad de rotación y velocidad lineal en piedra abrasiva [82].	53
Fig. 24 Proceso de reperfilado en ruedas [152].	58
Fig. 25 Marcas de reperfilado del lado exterior de un riel desgastado R350HT. Productos de oxidación (gris oscuro) y martensita (blanco) pueden ser vistos en la superficie. Corte a lo largo de la dirección de rodadura [153].	59
Fig. 26 Proceso de running-in de un riel recién reperfilado [96].	61
Fig. 27 Medidas de rugosidad convencionales en un perfil de superficie [175].	62
Fig. 28 Valores opuestos de skewness correspondientes a diferentes superficies [27].	63
Fig. 29 Diferentes valores de Kurtosis para diferentes superficies [27].	63
Fig. 30 Esquema del proceso de running-in para un material, en el cual se observa el periodo de reacondicionamiento, la estabilización y la transición al desgaste severo [179].	65
Fig. 31 Proceso de elaboración de probetas a utilizar en experimentación.	68
Fig. 32 Dimensiones de probetas.	69
Fig. 33 Reperfilado de rieles en campo a) Reperfiladora en rieles de Melbourne [189] b) Reperfiladora Speno RR 32 M-3 [190] c) Reperfiladora Kiefer-Cranes [191] d) Reperfiladora Ram [192] e) Superficie de riel después de proceso de reperfilado Speno International Group [193]f) Superficie de riel de transporte metropolitano después de proceso de reperfilado [194].	71
Fig. 34 Generación de texturas adaptando la piedra de esmeril a) y b) a una fresadora convencional, c) y d) a una fresadora CNC, e) y f) texturas generadas después de esmerilado.	72
Fig. 35 Esquema de máquina perno sobre disco.	73
Fig. 36 Micrografías de texturas obtenidas después del proceso de reperfilado.	77
Fig. 37 Topografía de las diferentes texturas obtenidas en el reperfilado de discos.	78
Fig. 38 Huella de desgaste en discos, condición seca.	79
Fig. 39 Proceso de running- in en condición seca para a) superficies menos rugosas b) superficies más rugosas c) tasa de desgaste de los pernos después de las pruebas en condición seca.	81
Fig. 40 Huellas de desgaste en pernos después de pruebas en condición seca.	82
Fig. 41 Huella de desgaste en discos después de las pruebas con grasa lubricante.	83
Fig. 42 Proceso de running- in en condición lubricada para a) superficies menos rugosas b) superficies más rugosas c) tasa de desgaste de los pernos después de las pruebas en condición lubricada.	85
Fig. 43 Huellas de desgaste en los pernos después de las pruebas en condición lubricada.	86

Fig. 44 a) Microestructura de textura 5, b) perfil de dureza correspondiente a textura 5, c) microestructura de textura 7, d) perfil de dureza de textura 7, e) microestructura completamente perlítica correspondiente al resto de texturas generadas.88

Índice de tablas

Tabla 1 Diferentes grados de aceros para riel [63].	38
Tabla 2 Ciclos de reperfilado preventivo en 2002 para tasas óptimas de remoción de material [81].	46
Tabla 3 Intervalos de reperfilado preventivo de una sola pasada recomendados [49].	48
Tabla 4 Comparación entre estrategias de reperfilado preventivo y correctivo para un sistema ferroviario Clase 1 en América del Norte [81].	48
Tabla 5 Parámetros de reperfilado utilizados en diferentes trabajos de investigación.	57
Tabla 6 Valores objetivo de coeficiente de fricción dependiendo la zona de contacto [187]......	67
Tabla 7 Composición química de los materiales a utilizar [32].	69
Tabla 8 Propiedades mecánicas de los materiales a utilizar [32] [188]......	69
Tabla 9 Parámetros de reperfilado para obtener las diferentes texturas.	70
Tabla 10 Parámetros de esmerilado para cada textura superficial.	75
Tabla 11 Parámetros de rugosidad.....	76

Simbología

Acu	Área de la sección transversal de la viruta (mm^2)
a_e	Profundidad de corte (mm)
b_w	Ancho de contacto de reperfilado (mm)
d	Distancia de deslizamiento (m)
d_e	Diámetro equivalente de la rueda abrasiva (mm)
F_N	Fuerza normal aplicada (N)
H	Dureza (MPa)
h_{eq}	Espesor de viruta equivalente (mm)
k	Coefficiente de desgaste
l_c	Longitud del contacto de reperfilado (mm)
Q	Tasa de remoción de material (mm^3/s)
Q_w	Tasa específica de remoción de material (mm^2/s)
R_a	Rugosidad promedio
R_p	Altura máxima del perfil
R_q	Media cuadrática
R_t	Máxima altura de los picos
R_y	Máxima profundidad de los valles
R_z	Altura diez puntos
S_{ku}	Kurtosis
S_{sk}	Skewness
V	Volumen de desgaste (mm^3)
V_w	Volumen de material removido (mm^3)
v_w	Velocidad de avance (m/s)
v_s	Velocidad de rueda abrasiva (m/s)

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Instituto Politécnico Nacional y primero que todo a mis padres que siempre me han apoyado no importando la situación, a mi hermana que ha estado siempre apoyándome, a mis abuelos y a todos mis familiares.

Quiero agradecer también a todas las personas que directa e indirectamente hicieron posible la realización de este trabajo, a mi asesor el Dr. Ezequiel A. Gallardo Hernández que me ha guiado en el camino de la investigación, profesores, personal administrativo y técnicos de la SEPI ESIME Zacatenco.

Al Dr. Jesús Godínez, profesor en ESIQIE por las facilidades brindadas en el uso de las instalaciones del laboratorio de microscopía, al CONACYT por el apoyo económico brindado.

Y, por último, pero no menos importante a mis compañeros del cubículo de tribología, con los cuáles superamos muchas dificultades en conjunto, gracias a todos.

Objetivo general

Evaluar tribológicamente texturas que reproducen el proceso de reperfilado en materiales de rueda y riel en un equipo perno sobre disco.

.

Objetivos particulares

Revisar literatura concerniente al proceso de reperfilado en rieles.

Cortar y manufacturar probetas de material de riel y material de rueda, utilizados comúnmente en los sistemas ferroviarios.

Obtener y generar texturas en discos de material de riel de acuerdo a procedimientos de reperfilado preparativo, preventivo y correctivo.

Evaluar texturas generadas en condición seca y lubricada.

Evaluar el proceso de acondicionamiento de la superficie (running-in) para las texturas generadas.

Obtener coeficiente de fricción y tasa de desgaste de los materiales en contacto.

Justificación

La importancia del reperfilado de rieles ha sido demostrado en diversos estudios en los cuáles una correcta estrategia de mantenimiento, así como su correcta aplicación se ve reflejada en el aumento de la vida útil del riel, la compatibilidad entre la rueda y el riel al modificar la geometría de ambos elementos, así como la disminución de los costos de mantenimiento. Sin embargo, una deficiente estrategia de reperfilado tiene implicaciones a ser consideradas. Una de ellas es la cantidad de material removido, ya que si se remueve demasiado material el riel presentará desgaste prematuro; y, por el contrario, si no se remueve suficiente material, las grietas superficiales no serán removidas y continuarán expandiéndose aumentando el riesgo de fractura del riel.

Otro efecto generado durante el proceso de esmerilado es el cambio microestructural de los rieles debido a los esfuerzos generados y las altas temperaturas alcanzadas durante el paso de las ruedas abrasivas en el riel generando una capa superficial endurecida. Esta capa, conocida como capa blanca (white etching layer) promueve la formación y rápido crecimiento de grietas. El análisis y comprensión de la formación de esta capa es importante ya que promueve la generación y propagación de grietas en el riel debido a la fatiga por contacto de rodadura.

Por otro lado, la textura superficial obtenida después de este proceso influye en el periodo de asentamiento o running-in de la superficie con el paso continuo de trenes. Este fenómeno no ha sido suficientemente estudiado en términos de la evolución de la tasa de desgaste, coeficiente de fricción y la posible generación de grietas debido a la presurización de fluidos como agua o lubricante por la acción de rodadura de los trenes, los cuáles pueden alojarse en los valles de las asperezas de la superficie del riel.

A su vez, cada región geográfica es diferente, en cuanto a condiciones de servicio, condiciones ambientales y orográficas, por tanto, un proceso de reperfilado de rieles en México tiene distintos parámetros a los de otra región del mundo, haciéndolo un caso de estudio único.

Por tanto, la importancia de este trabajo reside en la generación y evaluación tribológica de texturas superficiales simulando un proceso de reperfilado en tres diferentes escenarios,

preparativo, preventivo y correctivo. Este estudio servirá para evaluar el periodo de asentamiento de las superficies, el cual determinará el comportamiento de la tasa de desgaste y el coeficiente de fricción durante la mayor parte de la vida útil de los rieles. Además de la influencia del reperfilado en la microestructura de la superficie del riel, afectando la dureza del mismo y por tanto el comportamiento del periodo de running-in, obteniendo así un panorama de este proceso de mantenimiento y sus implicaciones en condición real.

Introducción

Los sistemas ferroviarios desde su invención han sido un medio de transporte muy eficaz debido a su gran capacidad de carga, en nuestro país, estos fueron introducidos en el siglo XIX, desde entonces estos han ido evolucionando hasta la fecha en la que podemos encontrar de diversos tipos como los trenes de carga que conectan los puertos con las diferentes ciudades, los trenes metropolitanos de la Ciudad de México, Guadalajara y Monterrey, así como los trenes suburbanos y ligeros. Todos estos sistemas ferroviarios están sujetos a constantes cambios, debidos al aumento de carga o de pasajeros, y a la demanda de llegar a lugares más lejanos en un menor tiempo. Estos cambios exigen que los materiales tanto de rueda como de riel sean más resistentes al desgaste y a un fenómeno aún más severo, la fatiga por contacto de rodadura (FCR). Por tal motivo, el mantenimiento en trenes es importante para aumentar el tiempo de vida útil de los componentes, ahorrando tiempo y dinero para las líneas ferroviarias, a su vez, evitando la falla mecánica los elementos en contacto.

Una técnica muy eficaz para el mantenimiento de los materiales de rueda y riel es el reperfilado o esmerilado (grinding), el cual, aplicado de manera adecuada, elimina defectos superficiales en el riel, mantiene la conformidad del contacto rueda-riel al darles la geometría adecuada para su correcto contacto, además de mantener bajo control la generación de ruido y la FCR al eliminar grietas superficiales e inhibir su crecimiento.

La cantidad de material removida es muy importante debido a que es un procedimiento costoso y debe realizarse de acuerdo con una tasa mágica de desgaste adecuada. El material removido está en función del patrón de esmerilado, el cuál es una combinación de variables que incluyen el ángulo de esmerilado, la presión aplicada, la velocidad del vehículo de esmerilado, y las características de las piedras abrasivas (grinding wheels).

Además, ha sido reportado que un correcto reperfilado, junto con una buena práctica de lubricación, reduce el desgaste de la pestaña de la rueda (wheel flange) y del costado del riel (rail gauge) en condiciones críticas (curvas con radios pequeños). Es un proceso complejo que incluye deformaciones tanto elásticas como plásticas en el material, formación de virutas y desprendimiento de partículas abrasivas, por tanto, se presentan diversos factores que afectan la calidad de la superficie recién esmerilada y su eficiencia.

Durante el proceso de esmerilado, se genera una gran cantidad de calor en la superficie del riel, lo que resulta en un aumento de la temperatura, esto provoca cambios en la microestructura del material.

Por otro lado, la evaluación del periodo de acondicionamiento (running-in) después de este procedimiento, mostrará el comportamiento de la tasa de desgaste tanto de la rueda como del riel, así como la generación de ruido por remoción de las asperezas. Este fenómeno no ha sido estudiado extensamente debido a la falta general de fundamentos teóricos y prácticos, aunado al desconocimiento de las características topográficas de la superficie del riel y su influencia en el contacto rueda-riel después de un proceso de reperfilado. Es importante señalar que en nuestro país el reperfilado de rieles es un tema que ha sido ignorado y no ha sido estudiado, además de que se realiza por compañías extranjeras y no es planeado adecuadamente, lo que provoca que los componentes ferroviarios se desgasten prematuramente y sufran daños irreversibles en su geometría, causando así un contacto inadecuado entre la rueda y el riel.

En el capítulo I de esta tesis, se presenta una pequeña reseña de la historia de los sistemas ferroviarios en México, además, se hace una revisión de literatura de conceptos básicos de un sistema ferroviario, contacto mecánico y los conceptos básicos de reperfilado de rieles, así como las investigaciones más relevantes en cuanto a evaluación de superficies sometidas a este proceso.

El capítulo II se describe la metodología de investigación utilizada para la simulación y generación de texturas en rieles y su posterior evaluación en un tribómetro perno sobre disco. Así como la descripción de los materiales a utilizar en la experimentación.

En el capítulo III se muestran los resultados obtenidos en la experimentación con las diferentes texturas obtenidas en la simulación de reperfilado, tanto en condición seca como lubricada.

El capítulo IV, se discuten los resultados obtenidos, los cuáles mostraron que, en condiciones secas, las probetas de riel con patrones superficiales más rugosos produjeron valores de coeficientes de fricción y tasas de desgaste altos. Por otra parte, en condiciones lubricadas, el lubricante no garantizó un coeficiente de fricción bajo, debido a la incompatibilidad de las

superficies con los aditivos del lubricante. Por tanto, un reperfilado eficiente tiene que ver con un acabado superficial que permita la compatibilidad de la superficie con los aditivos del lubricante bajo un régimen de lubricación a límite.

Capítulo I: Marco Teórico

1.1. Sistemas ferroviarios

Los sistemas ferroviarios en la actualidad, existen en prácticamente todo el mundo debido a su alta eficiencia y practicidad, tanto para el transporte de pasajeros como el de mercancía. Estos tienen su origen en la revolución industrial y más específicamente con las máquinas de vapor creadas en este periodo históricamente iniciado en el siglo XVIII, siglo en el que se implementó el uso de rieles, al principio hechos de madera cubiertas con chapa de hierro, después, de hierro forjado y por último y hasta la fecha, de acero. El uso de máquinas de vapor como medio transporte, comenzó con James Watt en 1769, sin embargo, Richard Trevithick en 1804 fue el primero en construir uno de los primeros prototipos de locomotora de vapor con éxito, con el que observaría el gran potencial de estos vehículos. En 1812 se construyó la primera locomotora de cremallera llamada Salamanca [1]. Posteriormente, en 1830, se construyó la primera línea ferroviaria entre Liverpool y Manchester con la locomotora llamada Rocket, a partir de ese momento y debido a los grandes beneficios que representaban las locomotoras de vapor, estas se extendieron por todo el mundo.

Las tecnologías fueron evolucionando y en 1890 se construyó en Suecia la primera línea ferroviaria diseñada para locomotoras con suministro eléctrico. A su vez se empezaron a implementar las locomotoras de combustible diesel. En 1939, se desarrolló el primer tren de alta velocidad en Italia, llamado ElettroTreno ETR 200 que alcanzaba una velocidad de 204 km/h [2]. Estos trenes rápidos fueron evolucionando hasta que en 1964 Japón desarrolló el llamado tren bala con velocidades de hasta 320 km/h.

A través de los años, y con el avance de la tecnología y las necesidades de los usuarios, los trenes se han diversificado y adaptado a las necesidades del lugar y el propósito para el cuál se han creado.

Los sistemas ferroviarios tienen diferentes denominaciones, pero comúnmente se dividen en sistemas metropolitanos o metro, tranvías, trenes rápidos, tren ligero, tren suburbano, monorraíles y trenes de levitación magnética [3]. Los trenes de carga, por su parte, presentan mayores cargas lo que significa un aumento en las presiones de contacto entre la rueda y el riel, por lo que necesitan lubricantes con mayor capacidad de carga, así como la remoción de

Capítulo I: Marco Teórico

defectos superficiales de manera constantes y más precisa, debido a que un cambio en la geometría de los componentes por deformación plástica conducirá a un inadecuado contacto entre la rueda y el riel, generando desgaste acelerado y promoviendo la generación y propagación de grietas.

1.1.1. Red ferroviaria en México

En México, la introducción de trenes se realizó en el año de 1850 con un tramo de 11km que conectaba El Molino, cerca del río de San Juan con el puerto de Veracruz, la cual fue retomada y ampliada por Ferrocarril Mexicano en 1873. A finales del siglo XIX la construcción de vías y ferrocarriles fue muy fructífera en el país, conectando en 1882 el puerto de Guaymas con la ciudad de Nogales, que posteriormente llegó a formar parte del ferrocarril Sudpacífico de México logrando conectar Guaymas con Guadalajara. A su vez en 1888 se logró la construcción del Ferrocarril Central Mexicano [4].

La instalación de líneas férreas no cesó en el país hasta 1910, contando con líneas férreas como el Ferrocarril Mexicano, Cuernavaca, Pacífico, el Ferrocarril Nacional de Tehuantepec, los Ferrocarriles Unidos de Yucatán, entre otros llegando a conseguir cerca de 20,000 km de vías férreas en todo el país [5].

En los primeros años del siglo XX se produjo una fusión entre ferrocarril Central y el Nacional, con intervención del gobierno, creando así Ferrocarriles Nacionales de México, en los cuáles se unieron después el Ferrocarril internacional, el Hidalgo, el Nordeste y más tarde el Ferrocarril interoceánico.

A raíz de la Revolución Mexicana en 1910, el ejército carrancista ocupó las líneas férreas para formar los Ferrocarriles Constitucionalistas, causando muchos estragos en las vías, por lo que inversión extranjera fue necesaria para la reconstrucción de las mismas. La enorme deuda causó que el gobierno entregara las líneas férreas a capital privado en 1926. Posteriormente, en 1937 el gobierno de Lázaro Cárdenas expropió los ferrocarriles dejándolos en manos de los trabajadores, pero debido a riñas internas, el control pasó a manos del gobierno nuevamente en 1940 [6].

Capítulo I: Marco Teórico

En los años posteriores, otras empresas ferroviarias se incorporaron a Ferrocarriles Nacionales de México, como el Ferrocarril subpacífico de México y en 1970 el Ferrocarril de Zacatecas y Coahuila [7].

A finales del siglo XX el sistema ferroviario en México inició el proceso de modernización mediante la Ley Reglamentaria del Transporte Ferroviario publicado en el diario oficial de la federación en 1995. Actualmente, la infraestructura ferroviaria está constituida por 17,360km de vías principales y secundaria concesionada, 4,474 km de vía auxiliar y 1,555 km de vías particulares, que en conjunto suman un total de 23,389 km de vía operada en México las cuáles pueden observarse en la figura 1 [8].



Fig. 1 Mapa de la infraestructura ferroviaria en México [8].

1.1.2. Componentes básicos rueda y riel

Los elementos en contacto en un sistema ferroviario son la rueda y el riel. Estos elementos tienen diferentes perfiles y están hechos de diferentes aleaciones dependiendo la aplicación para la cual serán requeridos.

El riel está constituido básicamente por el hongo, el alma y el patín; a su vez, el hongo el cuál es el que soporta las cargas transmitidas por las ruedas, está dividido en diferentes zonas las cuáles se muestran en la figura 2.

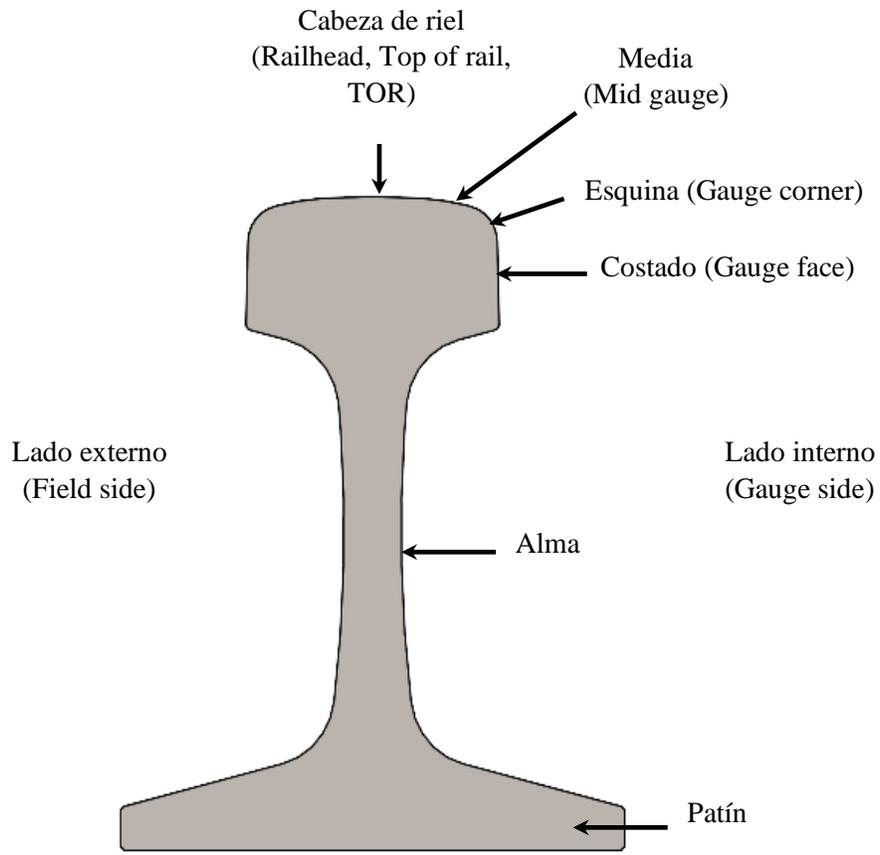


Fig. 2 Perfil y partes principales del riel.

Por otro lado, la rueda tiene diversas secciones correspondientes a la zona de contacto con el riel, pero las principales se refieren a la pestaña, la banda de rodadura y el borde de la rueda, éstas se pueden observar en el perfil de rueda mostrado en la figura 3.

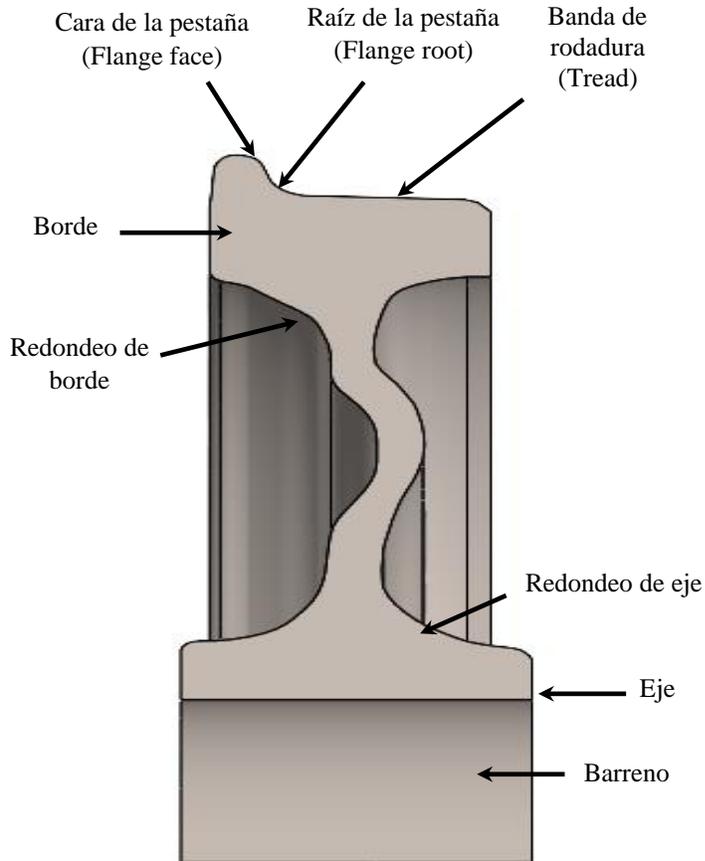


Fig. 3 Perfil y partes principales de rueda.

1.1.3. Interfaz rueda-riel.

El contacto entre la rueda y el riel se realiza en tres regiones definidas por Tournay [9] como A, B y C (ver figura 4). La zona B es la más común y la que se presenta en condiciones de línea recta en las cuáles el contacto se hace entre la banda de rodadura de la rueda y la cabeza del riel (wheel tread- railhead); en la transición de línea recta a curva, el contacto se realiza tanto en la región A, como en la región B; mientras que en condiciones de curva con radios pequeños, el contacto se produce en la región A, en esta región los esfuerzos se multiplican debido a que el contacto se reduce significativamente hasta aproximadamente 1cm^2 , debido a que el contacto es entre la pestaña de la rueda y la esquina del riel (wheel flange- rail gauge). Por último, la región C raramente se presenta, pero un contacto de este tipo tiene altos valores de esfuerzos y riesgo de descarrilamiento.

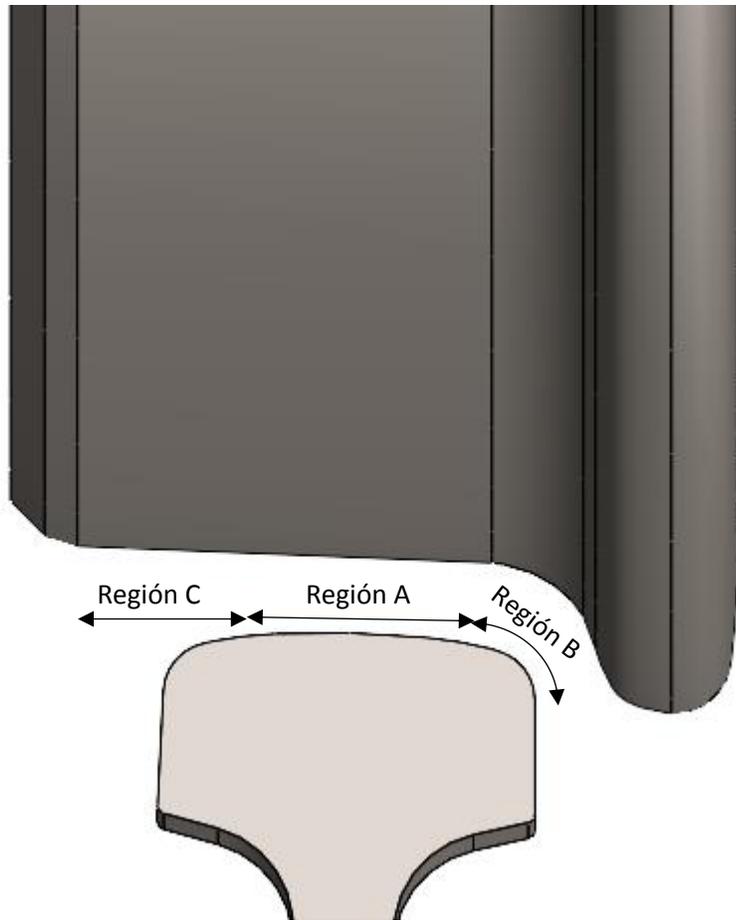


Fig. 4 Regiones de contacto entre rueda y riel [10].

Según Sinclair [11], dependiendo la región en el cual se produce el contacto entre la rueda y el riel, la fricción debe alcanzar ciertos valores, los cuáles pueden observarse en la figura 5. El manejo de la fricción en un sistema rueda-riel es importante ya que en condición de curva se requiere reducir el coeficiente de fricción debido a los altos esfuerzos presentados en esta condición, por lo que un coeficiente de fricción de alrededor de 0.1 es deseado, el cual es conseguido aplicando lubricantes. A su vez, en la región de contacto A, correspondiente a cabeza de riel y banda de rodadura de la rueda el coeficiente debe mantenerse en un nivel medio entre 0.25 y 0.4 para garantizar las operaciones tanto de frenado como de tracción respectivamente.

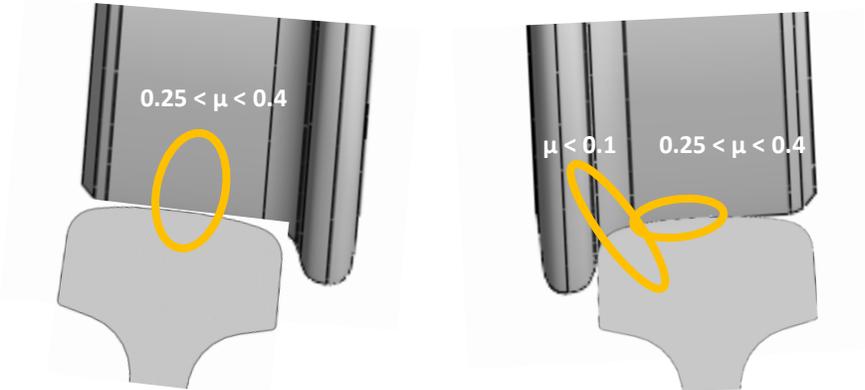


Fig. 5 Coeficientes de fricción deseables dependiendo el tipo de contacto rueda-riel [10] .

1.1.4. Fricción, adhesión y deslizamiento.

La fricción se define como la fuerza tangencial opuesta o que opone resistencia a la capa común entre dos cuerpos cuando, bajo la acción de una fuerza externa, un cuerpo se mueve o tiende a moverse relativamente contra la superficie del otro [12]. Otra definición puntualiza que la fricción es la resistencia encontrada cuando un cuerpo se mueve tangencialmente sobre otro con el cual está en contacto [13].

Guillaume Amontons, en el siglo XVII describió la fricción mediante leyes que establecen lo siguiente [14]:

- La fuerza de fricción es proporcional a la fuerza normal.
- La fuerza de fricción es independiente del área aparente de contacto.

Y una tercera ley atribuida a Coulomb 1785:

- La fuerza de fricción es independiente de la velocidad de deslizamiento.

Por otro lado, el coeficiente de fricción es obtenido dividiendo la fuerza tangencial opuesta al movimiento entre dos cuerpos entre la fuerza normal aplicada entre estos cuerpos. En condición seca o de lubricación a límite, la fuerza de fricción es a menudo proporcional a la fuerza actuando normal a las superficies en contacto. Contrario a cuando las dos superficies están totalmente separadas por una capa de fluido, como en una lubricación hidrodinámica, o por una capa de lubricante sólido [12].

Capítulo I: Marco Teórico

La adhesión es definida como el máximo coeficiente de tracción alcanzado [15], mientras que el deslizamiento relativo se define como la relación entre el movimiento relativo de las superficies en contacto y la velocidad lineal de la superficie, siendo un valor adimensional. En un contacto rueda-riel ocurren tres tipos de creepage, lateral, longitudinal y spin. El grado de creepage depende de la fricción y de la carga normal en el contacto [16].

La fricción es independiente del área de contacto nominal, y ya que se opone al movimiento de un cuerpo, es importante mencionar dos tipos importantes de movimiento relativo: el deslizamiento y la rodadura. En un contacto rueda riel, no siempre hay rodadura pura, en condición de curva se producen microdeslizamientos, generando un fenómeno de adhesión y deslizamiento [10]. En una interfaz de contacto rueda-riel, el contacto a menudo se divide en precisamente regiones de adhesión y deslizamiento. A medida que aumenta el deslizamiento en la región trasera del contacto, también aumentan tanto el creep longitudinal como las fuerzas tangenciales. Un aumento en la fuerza tangencial significa un aumento en la región de deslizamiento y, por lo tanto, una disminución en la región de adhesión, lo que da como resultado un contacto de rodadura/deslizamiento. Cuando la fuerza tangencial alcanza su valor de saturación, la región de adhesión desaparece y el contacto se convierte en un contacto de deslizamiento puro.

En un contacto de rodadura pura, el coeficiente de fricción sería muy cercano a cero, debido a que las velocidades traslacional y rotacional son iguales, sin embargo, cuando una de estas velocidades es diferente, se producen deslizamientos (creepage). Durante el frenado, la velocidad rotacional es menor que la velocidad lineal por lo que se produce una fuerza de fricción mayor o igual al torque generado por el freno en la rueda. Por otro lado, para operaciones de tracción, la velocidad rotacional es mayor que la lineal [10]. Esto se explica de manera gráfica en la figura 6. En curvas, debido a que un tren férreo tiene un eje sólido, para poder hacer el giro la rueda exterior tiene que girar 101 veces mientras viaja una distancia de 100 circunferencias, lo que genera un 1% de creepage longitudinal, de acuerdo con la curva de creepage (ver figura 7), el contacto se satura de deslizamiento al 1 o 2%, por tanto, este contacto se consideraría sin adhesión y con total deslizamiento (full slip).

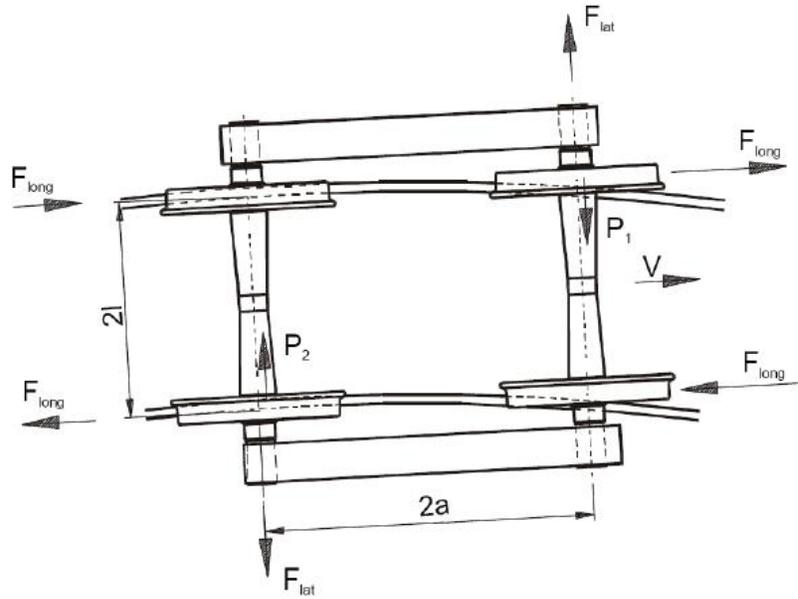


Fig. 6 Fuerzas interactivas típicas de la rueda al riel en un bogie pasando por una curva [10].

Además, la curva de creepage está influenciada por el efecto de un tercer cuerpo involucrados en el contacto rueda riel, como lo pueden ser el lubricante, el modificador de fricción o contaminantes como hojas de árboles o agua [17].

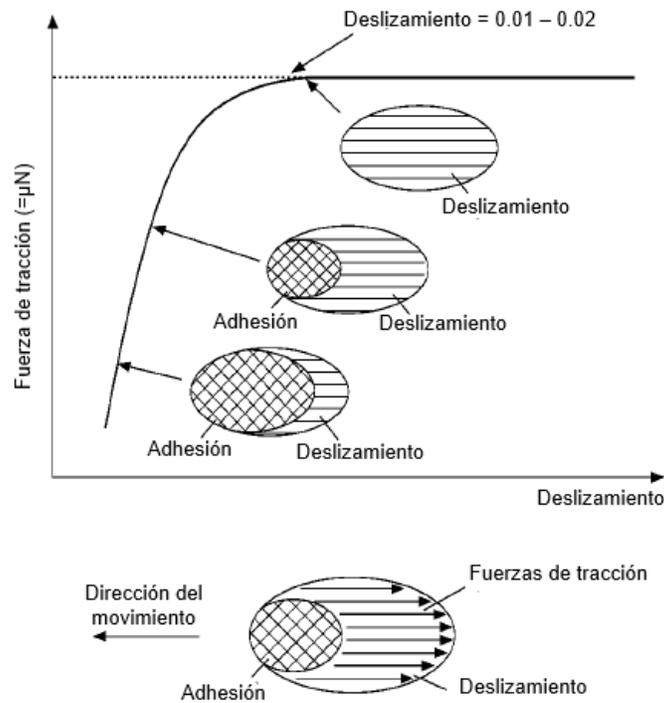


Fig. 7 Curva y relación entre adhesión y deslizamiento en el contacto rueda riel[12].

Capítulo I: Marco Teórico

1.1.5. Contacto mecánico

Cuando dos superficies nominalmente planas y paralelas entran en contacto, inicialmente el contacto se producirá solo en algunos puntos. A medida que la carga normal vaya incrementándose, las superficies se acercarán y un mayor número de asperezas en ambas superficies entrarán en contacto. Debido a que el contacto se realiza en estas asperezas, estas se encargan de soportar la carga normal en la superficie y de generar cualquier fuerza de fricción actuando entre ellas [18].

El contacto mecánico de la rueda y el riel puede ser modelado utilizando la teoría de Hertz. Esta teoría hace una estimación del contacto mecánico idealizando condiciones como el de considerar a las superficies completamente lisas, además de considerar un contacto no conformable y de no considerar la fricción ni las fuerzas tangenciales.

En el caso de un sistema rueda-riel, para calcular la presión de contacto, ésta se idealizará como un contacto esfera-plano, por tanto, el área de contacto será calculada con la siguiente expresión:

$$a = \sqrt[3]{\frac{3PR'}{4E^*}}$$

Donde:

P = fuerza aplicada, N

E^* = módulo de elasticidad reducido, Pa

R' = radio reducido, m

El radio relativo de curvatura de las superficies en contacto, será definido en término del radio de ambos cuerpos, R_x y R_y , en este caso al tratarse del riel y de considerarse un plano, éste se tomará como radio infinito, en el caso de la esfera, se tomará el radio de la rueda del tren.

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_y}$$

Capítulo I: Marco Teórico

Donde:

$$R' = \text{radio reducido, } m$$

$$R_x = \text{radio en } x, m$$

$$R_y = \text{radio en } y, m$$

El módulo reducido E^* , depende del módulo de elasticidad de ambos materiales y sus respectivas relaciones de Poisson, y se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{1}{E^*} = \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)$$

Donde:

$$E^* = \text{módulo de elasticidad reducido, } Pa$$

$$\nu_1 = \text{relación de Poisson material 1}$$

$$\nu_2 = \text{relación de Poisson material 2}$$

$$E_1 = \text{módulo de elasticidad material 1, } Pa$$

$$E_2 = \text{módulo de elasticidad material 2, } Pa$$

Finalmente, la presión de contacto puede ser calculada con la siguiente expresión:

$$P_0 = \frac{3P}{2\pi a^2}$$

Donde:

$$P = \text{fuerza aplicada, } N$$

$$E^* = \text{módulo de elasticidad reducido, } Pa$$

$$R' = \text{radio reducido, } m$$

$$P_0 = \text{presión de contacto, } Pa$$

La figura 8 muestra la distribución de la presión de contacto bajo una sola carga normal. La forma es elíptica con un valor máximo de P en el eje de simetría ($a=0$). La presión de contacto disminuye a medida que se aleja del eje de simetría y cae a cero fuera del área de contacto.

Capítulo I: Marco Teórico

Por otro lado, en un contacto con deslizamiento, los esfuerzos cortantes en la superficie se presentan en dirección al deslizamiento.

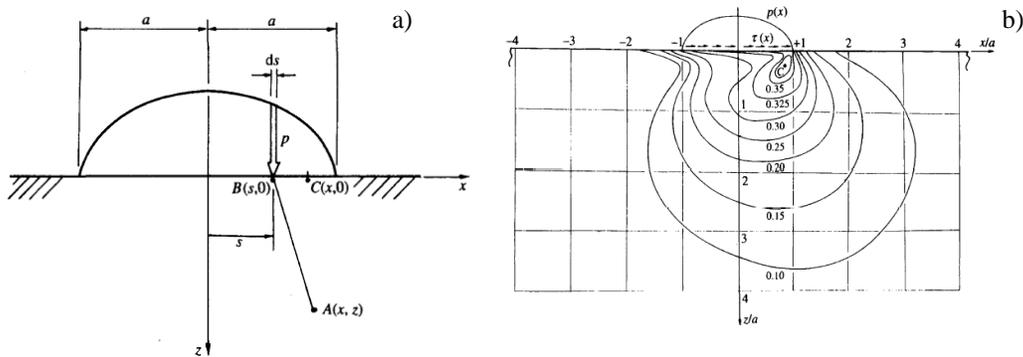


Fig. 8 a) Distribución de presión de contacto simétricamente distribuida con un diámetro de $2a$ b) contornos de los esfuerzos cortantes en un contacto deslizante Hertziano, tracción es de izquierda a derecha [13].

El enfoque de Hertz considera superficies lisas, sin embargo, al presentarse superficies rugosas y tener una estimación más precisa del contacto mecánico, se hace uso de modelos matemáticos basados en la teoría de contacto mecánico desarrollada por Greenwood y Williamson (GW) [19]. El cual toma en cuenta las asperezas en contacto, aunque las idealiza con una forma semiesférica y con un radio de curvatura uniforme. Otro enfoque es el desarrollado por Greenwood y Tripp el cual plantea el contacto entre una esfera lisa y una superficie rugosa [20] además de dar una teoría general del contacto entre dos superficies rugosas (ver fig. 9).

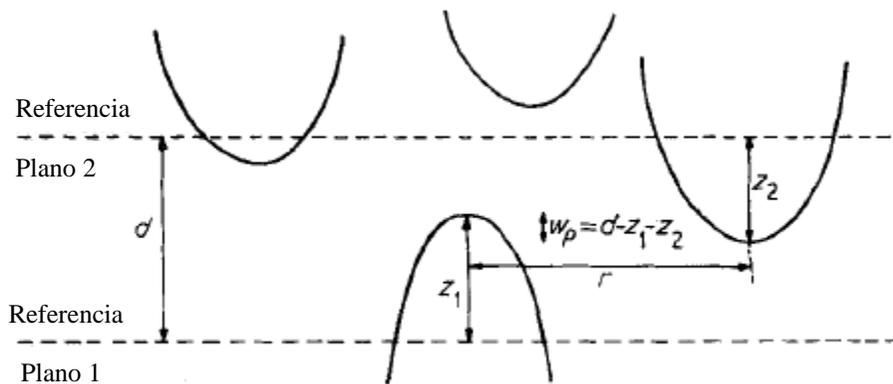


Fig. 9 Contacto de dos superficies rugosas, todas las asperezas se asumen con la misma forma [20].

Dependiendo el tipo de tren y la región en la que se haga contacto entre la rueda y el riel, la presión de contacto varía. Varios estudios se han realizado para cuantificarla, en un trabajo

realizado por Sundh et al [21], se desarrolló un mapa de presiones de contacto y velocidad de deslizamiento, después de analizar datos en campo, en laboratorio y en simulación por computadora. En el mapa, el cual se puede observar en la figura 10, se grafican valores correspondientes a la región A, el cuál es un contacto entre la cabeza del riel y la banda de rodadura de la rueda, los cuáles van desde 500 MPa hasta 1500 MPa, este tipo de contacto ocurre en línea recta y en curvas con un radio muy grande. Para contactos en la región B, correspondiente a una zona de curva cerrada, contacto entre la pestaña de la rueda y el costado del riel, las presiones de contacto van desde los 1500 MPa hasta los 2500 MPa.

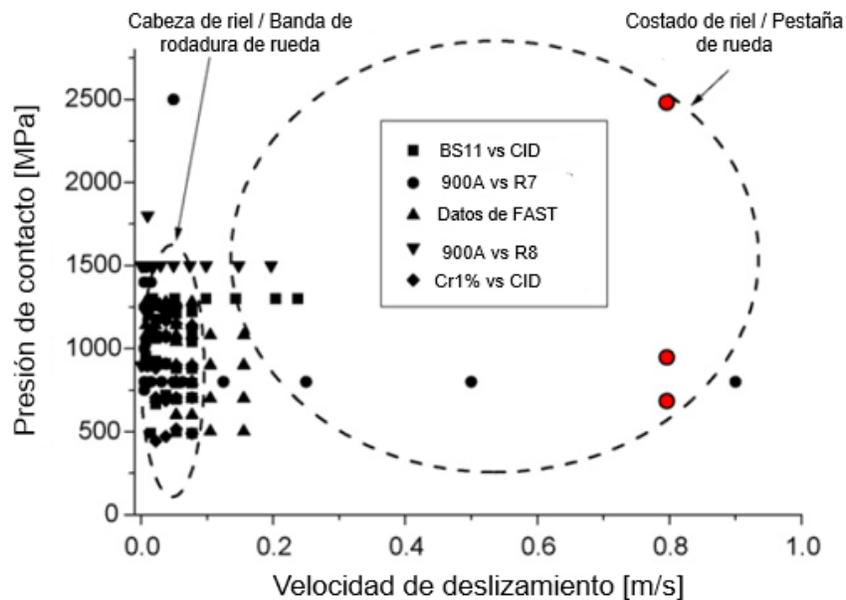


Fig. 10 Mapa de los diferentes valores de presión de contacto y velocidad de deslizamiento para diferentes zonas de contacto rueda-riel [21].

1.1.6. Regímenes de desgaste

El desgaste producido en un contacto rueda - riel ha sido simulado en pruebas de discos encontrados por diversos investigadores [22] [23] [24], después de analizar sus resultados, determinaron tres regímenes de desgaste (ver fig. 11), denominados como moderado, severo y catastrófico [25]. Las características entre cada régimen y su transición difieren entre ellos. Por ejemplo, el régimen moderado se caracteriza principalmente por desgaste oxidativo el cual deja una capa de óxido en la superficie del riel. El desgaste severo por su parte, se caracteriza por presencia de ratchetting debido a la deformación plástica. Por otro lado, la

transición de régimen severo a catastrófico presenta un incremento en la temperatura que afecta la microestructura de los materiales en contacto [26]. El régimen catastrófico, por su parte genera desgaste excesivo y la falla de los materiales en contacto.

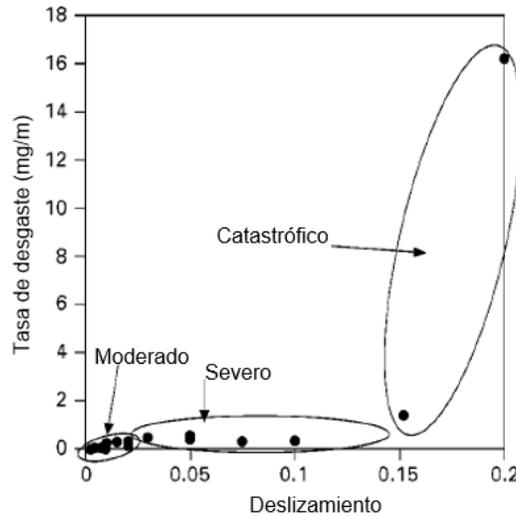


Fig. 11 Regímenes de desgaste y transiciones en aceros de rueda [25].

Los mecanismos de desgaste que conducen a estos cambios de régimen fueron estudiados más a detalle por Lewis y Dwyer-Joyce [22]. Quienes, en estudios de laboratorio realizados en tribómetro de discos encontrados, propusieron que la primera transición está relacionada con contactos con total deslizamiento, y la segunda transición es el resultado del efecto de la temperatura en el contacto.

Para disminuir el desgaste en los rieles se han desarrollado estrategias que van desde la modificación del perfil del riel, cambios en la dureza de los materiales en contacto, así como el manejo de la fricción y el uso de lubricantes [27]. Como ya se ha mencionado, el manejo de la fricción es muy importante e incluye lubricantes para la esquina del riel (grasa, aceite), modificadores de fricción para la cabeza del riel (los cuáles proveen un nivel de fricción medio) y potenciadores de tracción (arena o geles con partículas duras) [28]. Dependiendo el objetivo que se tenga, un manejo adecuado de la fricción evitará desgaste excesivo, daños en el riel por fatiga por contacto de rodadura, pérdida de tracción en operaciones de frenado o aceleración y reducción de ruido en las curvas [29].

1.2. Defectos en rieles y métodos de detección

Los rieles y ruedas están sometidos a esfuerzos axiales y esfuerzos cortantes generados por las cargas a las cuáles están sometidas, además de la dinámica del vehículo que provoca fenómenos como el microdeslizamiento, generando así desgaste y fatiga en ambas superficies. En la mayoría de los componentes mecánicos, el desgaste y la fatiga se producen de manera independiente, sin embargo, en una interfaz rueda-riel, se presentan de manera simultánea en la superficie de ambos materiales [30] [31].

Los principales defectos (ver figura 12) presentados en la superficie del riel de acuerdo con la American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association (AREMA) [32] se mencionan a continuación, es importante señalar que los términos presentados no tienen una traducción oficial al español, por tanto y para evitar confusiones, se dejarán tal y como se denominan en el idioma inglés:

Squats: los cuáles son defectos superficiales presentados generalmente en línea recta y en curvas con radios muy grandes, asociado a vías con trenes de alta velocidad y zonas de gran esfuerzo de tracción. Se caracterizan como una depresión poco profunda comúnmente en el centro de la cabeza del riel, resultado de grietas subsuperficiales, disminuyendo la resistencia del material, la apariencia de una zona negra es generado por las partículas de desgaste o debris depositado en el hundimiento [33].

Head checks: grietas superficiales poco profundas que aparecen en la pestaña del riel (gauge corner). Son el resultado del aumento de la dureza debido a la acumulación de deformación plástica, hasta superar la ductibilidad de la superficie del material, provocando la formación de grietas (ratchetting).

Tache ovale: es la discontinuidad interna en el riel originada por un efecto térmico en el proceso de fabricación, usualmente tiene una geometría en forma de óvalo y se expande hasta alcanzar la superficie, causando la fractura inmediata del riel.

Corrugaciones: hundimientos ondulados poco profundos a lo largo de la superficie del riel, los cuáles pueden ser provocados por distintos factores como lo son el microdeslizamiento

Capítulo I: Marco Teórico

entre la rueda y el riel debido a las fuerzas de tracción y frenado, o por el movimiento lateral de la rueda a través de la superficie del riel.

Spalling: agrietamiento o formación de capas de material parecidas a pequeñas hojuelas en la superficie del material, son generadas debido a altos esfuerzos presentados en el contacto rueda riel, y las fuerzas generadas en el deslizamiento horizontal de la rueda, así como las fuerzas de fricción transversal.

Shelling: es originado por altos esfuerzos de contacto entre la rueda y el riel, se presenta en la cabeza del riel y consiste en separaciones horizontales subsuperficiales que pueden agrietar la pestaña del riel.

Flaking: es causado por la concentración de cargas en las ruedas, lo que resulta en una deformación por compresión severa de la superficie del riel por cizallamiento.

Daño térmico: denominado también como “wheel burn”, se forma en el riel debido al deslizamiento de la rueda durante operaciones de tracción o frenado, lo que causa cambios en la microestructura del acero del riel cambiando de perlita a martensita, y a su vez, formando una capa blanca (white etching layer).

Daños por soldadura: incluyen posibles defectos de soldadura y cambio en la microestructura en las zonas afectadas por el calor [34].

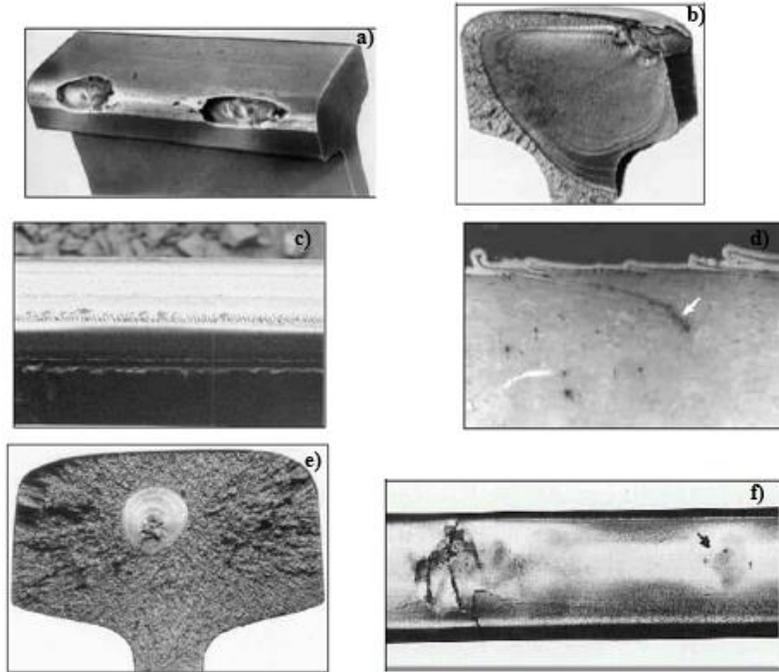


Fig. 12 Defectos en rieles a) shelling severo b) shelling vista transversal c) head checks en costado de riel d) ratcheting en riel asociado a FCR e) tache Ovale f) squat en superficie de rodadura [33].

Los defectos en los rieles disminuyen su vida útil y provocan un contacto inadecuado con la rueda, no obstante, la inspección visual, la cual muchas veces es la única inspección que se realiza en algunos sistemas ferroviarios, hace de esta tarea algo complicado ya que algunos defectos son subsuperficiales, por ejemplo, la detección de head checks se complica al alcanzar cierta profundidad. Afortunadamente, la implementación de métodos alternos de detección como las corrientes Eddie es cada vez más utilizado, obteniendo resultados muy satisfactorios [35][36]. El ultrasonido también se ha convertido en una opción para la detección de grietas más profundas que las detectadas con corrientes Eddie.

Otro método alternativo para evaluar la integridad de la superficie de la vía fue desarrollado en 2004 por Bruzelius y Mba el cual se basa en una técnica de Emisiones Acústicas (AE) [37]. Como optativa al método acústico mencionado anteriormente, también se ha implementado el uso del ruido de Barkhausen, para realizar una evaluación cuantitativa de la capa superficial del riel de forma no destructiva [38].

Por su parte, Montiel-Varela et al, desarrollaron un método no destructivo para detectar grietas en rieles mediante el uso de frecuencias naturales validándolo con simulaciones numéricas [39].

También han surgido métodos digitales, los cuales miden la profundidad de las grietas [40][41], como el software especializado llamado Phoenix [42], el cuál puede calibrarse con datos de laboratorio y de campo para hacer predicciones de la iniciación de grietas en los rieles [43]. Sin embargo, la medición de la profundidad de grietas en trenes de carga es difícil debido a la complejidad de la interpretación de las señales adquiridas ya que la sensibilidad de las herramientas y la intervención de otras discontinuidades superficiales hace que se confundan los datos obtenidos [44]. Como se ha mencionado, existen varias formas de detectar defectos superficiales, sin embargo, lo ideal será el evitar que estos aparezcan mediante la aplicación de un mantenimiento preventivo adecuado y de una eficiente lubricación.

1.2.1. Fatiga por contacto de rodadura (Rolling contact fatigue)

La FCR, es un fenómeno que se presenta en la superficie de los rieles debido a esfuerzos cíclicos propiciados por el paso de los trenes. Los dos procesos clave en la FCR son la iniciación y la propagación de grietas (ver figura 13).

La FCR se genera a causa de factores como la microestructura del material, la presión de contacto, la presurización de fluidos como agua o lubricante, o el entorno operativo, y esto a su vez, influye en la generación y la propagación de las grietas [45] [46] [47] [48], llegando a causar daños tan severos como la fractura del riel.

Según Magel, et al [49], los factores que afectan el crecimiento de grietas incluyen altas cargas normales en el contacto lo que incluye efectos combinados de carga axial y fuerzas dinámicas, la geometría de contacto entre la rueda y el riel, la fuerza tangencial en el contacto, la presurización del lubricante y de contaminantes como agua de lluvia, así como las propiedades mecánicas de ambos materiales en contacto.

Vidaud y Zwanenburg, clasificaron cuatro niveles de tamaño de grieta dependiendo de su longitud y profundidad [50]:

- ligera: menos de 10 mm de longitud de grieta visible;
- moderado: de 10 mm a 19 mm de longitud de grieta visible;
- pesado: de 20 mm a 29 mm de longitud de grieta visible;

- crítico: más de 30 mm de longitud de grieta visible.

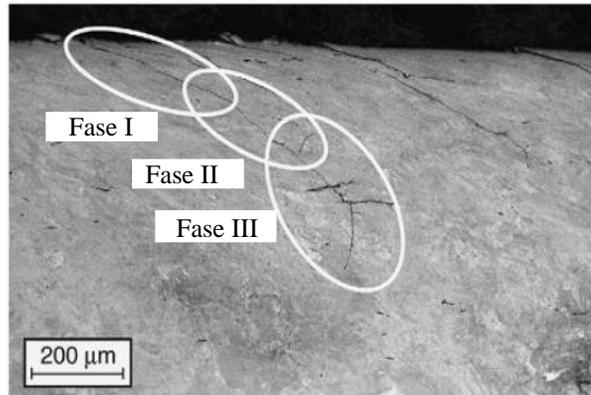


Fig. 13 Tres etapas de crecimiento de grietas debido a la FCR [51].

Un aspecto importante a considerar en el crecimiento de grietas es el incremento en la dureza debido a la deformación plástica causado por la aplicación de cargas cíclicas. Estas cargas aplicadas en un contacto rueda-riel se manifiestan de cuatro maneras diferentes [52], las cuáles se representan en la figura 14 y se describen a continuación:

0.- Comportamiento elástico, mientras las cargas aplicadas no excedan el límite elástico del material.

1.- Shakedown elástico, si los esfuerzos cíclicos están por encima del límite elástico, habrá cierto flujo plástico lo que promoverá la formación de esfuerzos residuales protectores y un incremento en la dureza del material, mientras este límite no se exceda, después de pocos ciclos el comportamiento será elástico nuevamente.

2.- Shakedown plástico, si los esfuerzos cíclicos se encuentran por encima del límite de shakedown elástico, el componente no se comportará de manera elástica y habrá deformación plástica en cada ciclo. Algunos ciclos de esfuerzos podrán ser reversibles, los cuáles solo serán posibles si estos se encuentran debajo del límite de shakedown plástico.

3.- Ratchetting, después del límite de shakedown plástico, conocido también como el umbral de ratchetting, habrá acumulación de flujo plástico después de cada ciclo de carga. En esta condición el estado de estabilización consiste en un bucle abierto de ratchetting elástico-plástico.

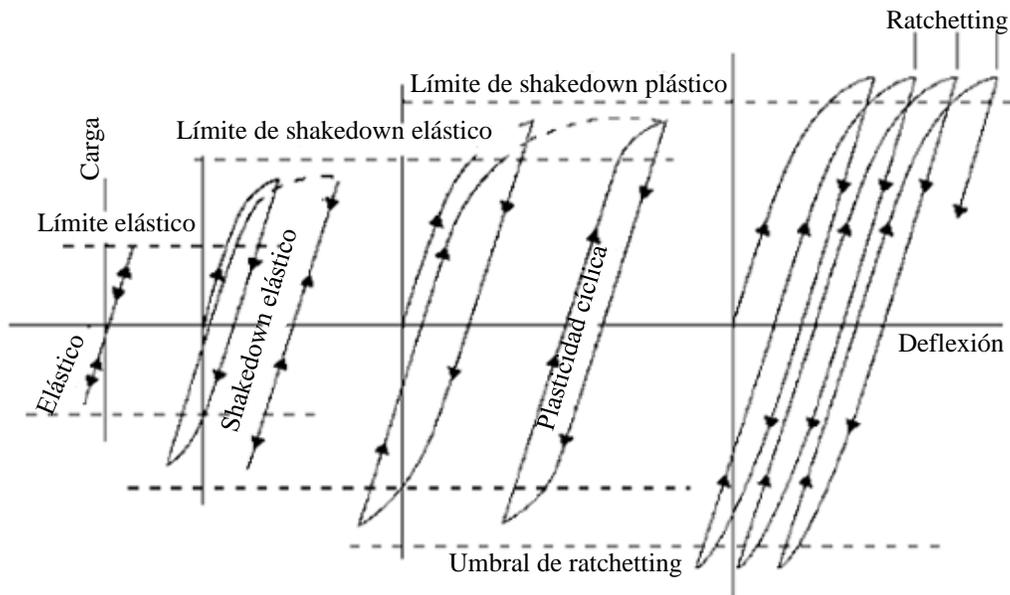


Fig. 14 Respuesta del material a cargas cíclicas [53].

Además de la posibilidad de causar accidentes, los costos asociados con la FCR son muy altos. Un estudio europeo cuantificó el costo de la FCR para la red ferroviaria europea, incluida la inspección, retrasos del tren, reemplazo de rieles, reparación de soldaduras, reperfilado de rieles y descarrilamientos, en aproximadamente 300 millones de euros por año [54], mientras que para la industria ferroviaria de América del Norte, tan solo el reemplazo de rieles asciende a más de 300 millones de dólares anuales [55]. Los defectos por FCR y los procesos de mantenimiento para inhibir el crecimiento de grietas han sido bien documentados tanto en campo como en pruebas de laboratorio[46][56][57][58][59].

Para evitar la propagación de grietas, lo ideal es eliminarlas continuamente mientras se encuentran en una etapa inicial y su tasa de crecimiento es baja mediante el proceso de mantenimiento llamado esmerilado o reperfilado de rieles [52][60]. Numerosas investigaciones han señalado el efecto de la FCR en los daños a los rieles y la reducción de su vida útil [61][62], por lo que la aplicación de estrategias adecuadas de reperfilado para aumentar la vida útil del riel y disminuir accidentes es de suma importancia.

1.2.2. Tasa mágica de desgaste

La tasa mágica de desgaste (TMD) o magic wear rate es la tasa ideal en la cual se suma tanto el desgaste artificial producido por las estrategias de reperfilado, como el desgaste natural debido al contacto entre la rueda y el riel. Planear esta tasa no es una tarea sencilla ya que es necesario determinar la tasa de remoción de material adecuada para mantener controlada la FCR aumentando así la vida útil del riel.

Una correcta TMD establece una estrategia de reperfilado ideal y bien definida para cada sección de la vía, pudiendo planificar los intervalos y la cantidad de material a remover en cada ciclo, ejemplo de una TMD puede observarse en la figura 15.

Diversos factores afectan la TMD, por ejemplo, la fricción la cual tiene influencia directa en el desgaste y en la FCR, otro factor corresponde a las propiedades mecánicas del material, en la actualidad, el acero perlítico sigue siendo el material más utilizado para los rieles debido a su alta resistencia al desgaste [53].

En la tabla 1 se pueden observar los diferentes tipos de grado en los aceros de rieles. El grado de acero utilizado para tramos rectos o de curvas con un radio grande típicamente es de grado estándar o intermedio, mientras que, para curvas con radios pequeños, se utilizan rieles premium, estas estrategias ayudan a incrementar la vida del riel disminuyendo el desgaste y la cantidad de material a remover en el reperfilado, ya que los aceros premium al tener una mayor dureza, tienen una vida útil mayor (aproximadamente 33% mayor) en comparación al de la de los rieles estándar.

Tabla 1 Diferentes grados de aceros para riel [63].

Acero	Dureza (Brinnell)
Estándar	260-280
Intermedio	320-340
Premium	340-380
HE Premium	380-400

Por tanto, para cada sistema ferroviario, el intervalo de reperfilado, así como la tasa mágica de desgaste es diferente, debido a las distintas condiciones a las cuáles esté sometido el riel. Por lo que estas operaciones de mantenimiento se determinan después de evaluar las características y prioridades del sistema ferroviario [64], así como de su efecto en conjunto con la lubricación y la metalurgia del riel [52].

Actualmente, la calidad del reperfilado del riel se evalúa de acuerdo con la forma del perfil del riel obtenido. El perfil en la vía se mide utilizando un sistema láser y calculando la diferencia con el perfil óptimo del riel objetivo. Este proceso se realiza a bordo de la máquina reperfiladora o utilizando un vehículo especializado de inspección de rieles previo al reperfilado [65]. En algunos casos, un software mediante inspección con imágenes puede recomendar el número de pasadas de esmerilado, la velocidad y la presión requerida en los motores para producir el perfil [66]. Sin embargo, según Sroba et al [67] y Devadoss et al [68], la evaluación visual de la gravedad de la FCR a partir de imágenes digitales es subjetiva, ya que estimar la profundidad de las grietas para programar la plantilla en el riel probablemente eliminará demasiado o muy poco metal del riel, y no hay manera de saber si el procedimiento eliminó las grietas en la superficie del riel.

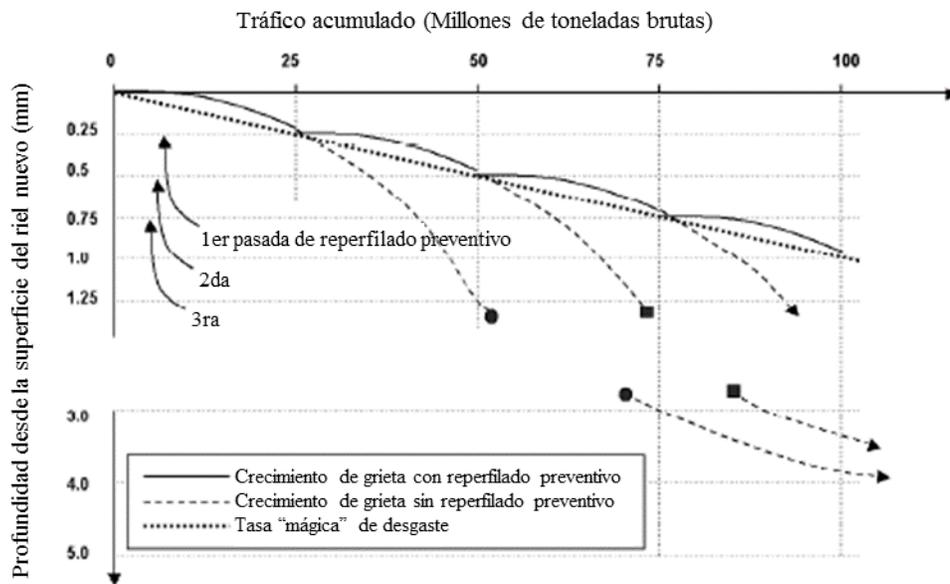


Fig. 15 Tasa mágica de desgaste [69].

1.3. Reperfilado de rieles como medida de mantenimiento.

1.3.1. Reperfilado de rieles a través de los años

El esmerilado de rieles como proceso de mantenimiento comenzó a aplicarse en la década de 1960 en Canadá por Bulington Northern (BN) para eliminar el desgaste ondulatorio o corrugación y la deformación plástica que se presentaba en sus vías [70]. Posteriormente, en

Capítulo I: Marco Teórico

1981, en Japón, el tren Tokaido Shinkansen presentó problemas debido a un fenómeno el cual llamaron "shelling de Shinkansen", el cual era similar a un defecto superficial conocido como "squat" (depresión poco profunda comúnmente en el centro de la cabeza del riel generada por grietas subsuperficiales, por lo que el reperfilado se optó como procedimiento de mantenimiento.

A través de estudios, ensayos y análisis, se optó por la aplicación del esmerilado periódico de los rieles como proceso de mantenimiento, disminuyendo los defectos superficiales drásticamente [71]. Por otro lado, en 1989, el Ferrocarril del Norte de Burlington (BN) adoptó también el esmerilado como proceso de mantenimiento, lo cual le permitió minimizar costos, al tiempo que cumplió con los servicios requeridos por sus clientes [72]. Al siguiente año, un ferrocarril europeo de carga conocido como "Malmbanan", realizó por primera vez mantenimiento de reperfilado de rieles convirtiéndose en un procedimiento estándar desde entonces [73].

Debido a las ventajas que ofrecía, el proceso de esmerilado era aceptado en cada vez más líneas ferroviarias, no obstante, la cantidad de material eliminado era excesiva, por lo que, en 1995, BN estableció un programa preventivo el cuál aumentaba los intervalos de esmerilado, pero disminuía considerablemente la cantidad de material removido [68]. Al observar los beneficios de esta nueva estrategia, en 1998, la compañía "Burlington Northern Santa Fe" (BNSF) comenzó la transición de mantenimiento de rieles de un estado correctivo (excesiva cantidad de material removida) a uno preventivo [74].

La evolución en el esmerilado de rieles continuó con el aprovechamiento del procedimiento para no solo reperfilar el riel, sino para optimizar el perfil del riel con una nueva técnica desarrollada en 1999 por el National Research Council (NRC) de Canadá, la cual llamaron PUMMEL [64]. Esta técnica evaluaba la interacción rueda-riel y determinaba el perfil más adecuado para poder distribuir de mejor manera los esfuerzos en el riel y evitar así un mayor desgaste en una zona en específico debido a un mal contacto de la interfaz, puede observarse un ejemplo en la figura 16 [75].

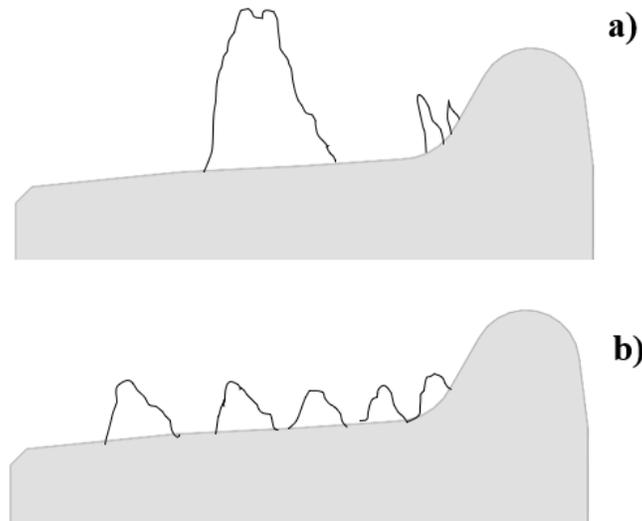


Fig. 16. Efecto de la aplicación de pummel en la banda de rodadura de la rueda a) reperfilado sin pummel en el que se observa mucho desgaste en un solo punto de la rueda b) aplicación de pummel distribuyendo el desgaste a lo largo de la rueda [75].

Hasta antes del año 2000, no todas las líneas ferroviarias utilizaban el esmerilado como proceso de mantenimiento, debido a que se creía que utilizando materiales más duros en los rieles y disminuyendo el desgaste se aseguraba una larga vida de los mismos, sin embargo, en ese mismo año, en Hatfield Inglaterra ocurrió un descarrilamiento que incluyó pérdida de vidas humanas. Originado por la fractura de un riel, el cuál falló por FCR [76]. Debido a ese incidente y desde 2001, la industria ferroviaria del Reino Unido ha llevado a cabo un programa interinstitucional de investigación y desarrollo centrado en la generación y la propagación de grietas.

Por su parte, en Estados Unidos CSXT Transportation y en Europa, el Malmbanan, hacia fines de 2000, adoptaron la transición de una estrategia correctiva a una preventiva [77] [78]. Por último, en lo que respecta a normatividad, en 2001, German Railways y Speno International investigaron los efectos sobre la fatiga de la superficie de varios perfiles transversales y establecieron algunas tolerancias de reperfilado [79]. Por otro lado, en 2006, los trenes europeos normalizaron el reperfilado con la EN 13231 [80].

Hoy en día, prácticamente todos los sistemas ferroviarios en el mundo cuentan con un programa el cuál varía en cuanto a cantidad de material removida y los intervalos de remoción.

1.3.2. Conceptos básicos sobre reperfilado

El reperfilado de rieles es un procedimiento de mantenimiento para inducir desgaste artificial; lo cual mantiene bajo control la fatiga superficial y subsuperficial al eliminar grietas y defectos superficiales, controla la deformación plástica y disminuye los esfuerzos de contacto entre la rueda y el riel al darle forma nuevamente al perfil y lograr un contacto adecuado entre ambos elementos mejorando la estabilidad dinámica del tren [81]. Sin embargo, también es una medida de mantenimiento costosa. Por lo tanto, es importante el tener una estrategia correcta de esmerilado para garantizar la calidad del procedimiento y realizarlo en el menor tiempo posible, evitando la interferencia con el paso normal de trenes en la vía.

Este normalmente se realiza con un vehículo especializado conocido como reperfiladora (rail grinder), mostrado en la figura 17, el cual está equipado con varias piedras abrasivas rotativas dispuestas en diferentes ángulos para conseguir el perfil deseado en el riel [82].

La cantidad de material a remover es un parámetro muy importante, debido a que, si se remueve más material del necesario, la vida del riel disminuye debido al desgaste artificial inducido. Por otro lado, si la cantidad de material removida no es la suficiente, las grietas crecen internamente pudiendo llevar a la fractura del riel. Otro factor que afecta la cantidad de material a remover son los intervalos de reperfilado ya que, si no se realizan periódicamente, la cantidad de material será mayor debido a la acumulación de defectos superficiales en los rieles. Por tanto, los intervalos de esmerilado y la cantidad de material a remover están directamente relacionados, y deben ser tomados en cuenta para la planeación de una correcta estrategia de esmerilado obteniendo así una tasa de desgaste óptima [83].

El volumen de material removido depende, además de las características de la reperfiladora, del número y la disposición de las piedras abrasivas, las características de los granos abrasivos, la presión aplicada, la velocidad de avance de la máquina y la dureza de la superficie del riel a maquinarse.

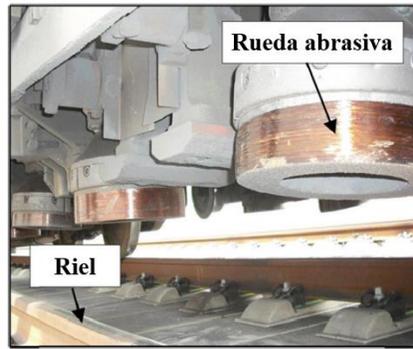


Fig. 17 Carro de reperfilado equipado con ruedas abrasivas [82].

De acuerdo con Sroba y Roney [81] una correcta práctica de reperfilado incluye las siguientes características y acciones

- Equilibrio entre desgaste y fatiga.
- Larga vida útil con un riesgo mínimo de fallas relacionadas con defectos.
- Mantenimiento regular del perfil del riel.
- Perfil vertical dentro de la tolerancia (corrugaciones y soldaduras bajo control)
- Aplicación de perfiles de riel que promuevan bajo desgaste, bajos esfuerzos y buena estabilidad de conducción.
- Ciclos de reperfilado consistentes con las necesidades de diferentes geometrías de vía.
- Costo mínimo (por milla terminada)
- Calidad de la superficie reperfilada
- Riesgo mínimo de incendio por generación de chispas durante el procedimiento.

1.3.3. Técnicas de reperfilado

El reperfilado de rieles como método de mantenimiento de rieles, se ha implementado desde 1960, desde entonces han surgido diversos métodos para realizar esta operación, los cuales se mencionan a continuación:

El primer método y el más utilizado es el realizado con ruedas abrasivas el cual es mostrado en la figura 18, estas ruedas son accionadas por un motor en diferentes puntos de la cabeza del riel para esmerilar el metal de la superficie a través de los movimientos de rotación y traslación con el objetivo de reperfilar la sección transversal y el perfil longitudinal del riel.

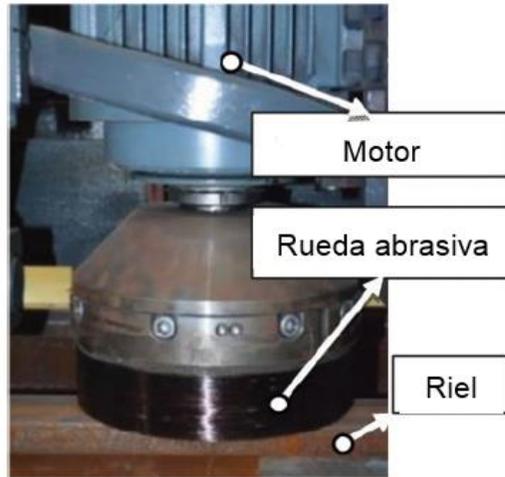


Fig. 18 Reperfilado por rueda abrasiva [84].

Otro método utilizado es el fresado (ver figura 19), el cual es un proceso de corte rotativo libre de chispas y polvo en el que el material se corta de la superficie del riel en forma de virutas. Cada cabezal de corte consta de 140 a 220 insertos de carburo, según su diámetro. El fresado tiene como ventajas la remoción de defectos en el riel con una sola pasada, así como reperfilar la totalidad del perfil del riel, además de ser amigable con el medio ambiente ya que no genera polvo ni basura, no produce chispas lo que disminuye el riesgo de incendio, además debido a que el calor generado es bajo, se evitan cambios en la microestructura del material. Otra ventaja es que las tasas de remoción pueden ser controladas, se reduce la generación de ruido y es más económico que con piedra abrasiva [85].



Fig. 19 Operación de fresado de rieles (milling) [86].

Por otro lado, la cinta abrasiva (abrasive belt), la cual se muestra en la figura 20 la cinta abrasiva tiene una alta eficiencia de remoción de material y una alta recolección de residuos; además de no dañar el riel al aplicarse en el proceso [87][88]. Las cintas abrasivas son

utilizadas para operaciones de acabado. En este tipo de aplicación, las bandas abrasivas son más económicas y ofrecen un mejor rendimiento en cuanto a consumo de energía que las piedras abrasivas [89].

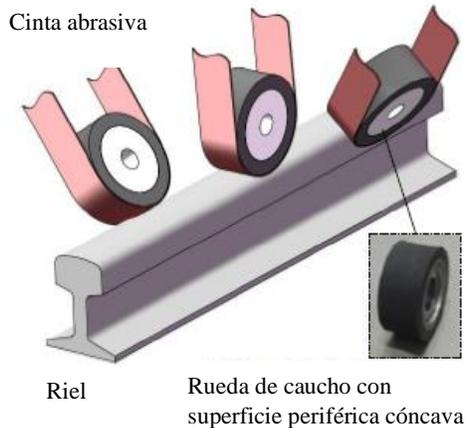


Fig. 20 Diagrama esquemático de esmerilado de riel por cinta abrasiva [90].

Algunas compañías están optando por una alternativa desarrollada en la industria aeroespacial conocida como esmerilado profundo de alta eficiencia (high efficiency deep grinding HEDG). Esta técnica se basa en alcanzar altas velocidades de rotación, herramientas superabrasivas y altas velocidades de avance para eliminar rápidamente el material de la zona de corte [91].

Cada tecnología tiene sus propias limitantes y campo de aplicación debido a sus características, en el caso del fresado, para que sea rentable, éste se aplica para mantenimiento correctivo de rieles severamente dañados. Por otro lado, las cintas abrasivas tienen el problema de solo poder remover defectos superficiales y no tan profundos, además, en cuanto estas se desgastan se tienen que cambiar por una nueva cinta, caso contrario de las piedras abrasivas, las cuales pueden ser reacondicionadas. Por último, las piedras abrasivas generan esfuerzos y altas temperaturas las cuáles llegan a cambiar la microestructura del material, además de la generación de polvo y residuos durante el proceso.

1.3.4. Estrategias de reperfilado

Después de la implementación de distintas estrategias de reperfilado a través de los años y por distintas compañías, Marich clasificó cuatro diferentes, definiéndolas como correctivo; transicional; preventivo o cíclico; y especial, que se adoptaron en una línea ferroviaria de

Capítulo I: Marco Teórico

Australia [92]. Por otro lado, Cooper [93] clasificó los procedimientos de reperfilado como preparativo, preventivo y curativo o correctivo, los cuáles se describen a continuación.

1.3.4.1. Reperfilado preparativo

El objetivo de esmerilar rieles nuevos es eliminar la capa de descarburización formada durante el proceso de fabricación del riel, la cual tiene un espesor aproximado de 0.15 mm a 0.30 mm, y se forma al calentar el lingote a la temperatura de laminado, como resultado de la oxidación del carbono cerca de la superficie del riel. Se ha demostrado que al remover esta capa se puede retrasar la formación de corrugación ferroviaria; además de remover imperfecciones de la cabeza del riel, asegurando el contacto óptimo entre riel y rueda [94]; así como eliminar el daño a la cabeza riel causado durante la instalación, por ejemplo, las huellas ocasionadas por balasto [95].

1.3.4.2. Reperfilado preventivo

El reperfilado preventivo tiene como objetivo remover las grietas de la cabeza del riel antes de que éstas entren en su etapa de crecimiento acelerado. Con esta estrategia se disminuyen los esfuerzos en el contacto rueda-riel al mantener un correcto contacto entre rueda y riel, al tiempo que se minimiza la remoción de material al disminuir los intervalos [74]. Sroba et al, sugieren los siguientes intervalos y tasas de remoción de material para un reperfilado preventivo efectivo (ver tabla 2) [81].

Tabla 2 Ciclos de reperfilado preventivo en 2002 para tasas óptimas de remoción de material [81].

Pista/ Riel MPH - millas por hora MGT – Millones de toneladas brutas mR - Radio en metros	Reperfilado preventivo. Durmientes de hormigón	Reperfilado preventivo. Durmientes de madera	Reperfilado preventivo. Dureza del riel (260 a 320 HB)	Reperfilado preventivo. Tren de pasajeros Dureza de riel (260 a 320 HB)
1) Riel nuevo				
141RE	15 MGT	15 MGT	NA	NA
136RE	5 MGT	5 MGT	NA	NA
UIC 60, 113 A	NA	NA	10 MGT	10 MGT

Capítulo I: Marco Teórico

2) Curvas con radios pequeños (3 grados y más cerradas)	15 a 25 MGT (340 a 420 HB)	15 a 25 MGT (340 a 420 HB)	8 a 12 MGT	Mas cerradas de 2000mR 5-7 MGT
3) Curvas suaves (más de 3 grados)	30 a 50 MGT (340 a 420 HB)	30 a 50 MGT (340 a 420 HB)	16 a 24 MGT	Menores a 2000mR 10-15 MGT
4) Pista tangente	60 (340 a 420 HB) 100 MGT (340 a 420 HB)	50 (340 a 420 HB) 100 MGT (340 a 420 HB)	40 a 60 MGT	20-30 MGT
Velocidad de reperfilado	6 - 14 MPH	6 - 14 MPH	6 - 14 MPH	6 - 14 MPH
Pasadas de reperfilado (64 a 96 piedras de desbaste)	1	1	1	1
Características	El intervalo de reperfilado depende de la curvatura y del tipo de reperfiladora	El intervalo de reperfilado depende de la curvatura y del tipo de reperfiladora	El intervalo de reperfilado depende de la dureza y la curvatura	El intervalo de reperfilado depende de la velocidad, superelevación y curvatura

El reperfilado preventivo tiene la ventaja de poder ser planeado (ver tabla 3), pudiendo predecir cuando el riel cumplirá su vida útil y de esta manera reemplazarlo, evitando accidentes o tráfico de trenes debido al tiempo de inactividad mientras se cambia el riel, otra ventaja es que se requieren máquinas con menos muelas abrasivas debido a que el material removido es relativamente poco, generalmente solo entre 0.15 y 0.4 mm de material de la superficie [69], por lo tanto, el costo se reduce [96].

Capítulo I: Marco Teórico

Tabla 3 Intervalos de reperfilado preventivo de una sola pasada recomendados [49].

Curva	Grado del riel	Intervalo de reperfilado preventivo
Cerrada	Premium	14 - 23 (15-25 MGT)
Moderada	Premium	27 - 45 (30-50 MGT)
Tangente	Intermedio	40 – 54 (45-60 MGT)
Tangente	Premium	91 (100 MGT)

Si bien el intervalo apropiado dependerá de la metalurgia del riel, los radios de las curvas, las cargas por eje y los sujetadores, Magel y Kalousek recomiendan para curvas cerradas, un intervalo de 8-12 millones de toneladas brutas (million gross ton MGT) para un riel estándar y 12-25MGT para un riel premium [75].

1.3.4.3. Reperfilado correctivo

Esta estrategia trata a rieles que han sufrido daños graves y requieren grandes cantidades de remoción de material, por lo general con 5 o más pasadas a una velocidad lenta (5-9 km/h) utilizando una reperfiladora de gran capacidad. Por lo que el intervalo correctivo puede ser de 100 MGT o más, en la tabla 4, se puede observar una comparativa entre estrategias preventiva y correctiva aplicadas en un sistema ferroviario Clase 1 Norte Americano observando las grandes diferencias en el tiempo de aplicación de cada uno.

Tabla 4 Comparación entre estrategias de reperfilado preventivo y correctivo para un sistema ferroviario Clase 1 en América del Norte [81].

	Preventivo	Correctivo
Pasadas en curva por ciclo	1	4
Ciclos por año	4	1
Velocidad de reperfilado	6 mph (9.6 km/h)	6 mph (9.6 km/h)
Velocidad de reperfiladora	10 mph (16 km/h)	10 mph (16 km/h)
Tiempo para invertir la dirección	n/a	0.75 min/pasada

Capítulo I: Marco Teórico

Tiempo de reperfilado por ciclo	70 min	362 min
Tiempo de viaje por ciclo	34 min	300 min
Tiempo total de pista por ciclo	104 min	662 min
Tiempo total de reperfilado por año	416 min	662 min +59%

Las ventajas y desventajas relativas del reperfilado correctivo en comparación con el preventivo son bien conocidas y han sido reportados por diversos investigadores [97][98][99][100].

A pesar de los beneficios de mantenimiento por reperfilado, hubo cierta controversia a finales de la década de los 90 cuando los resultados de pruebas publicadas en los Estados Unidos sugirieron que un riel premium requería poco o nulo desgaste de material [101][102] argumentando que este aumentaba el desgaste del riel en un 77% en el riel alto y en un 240% en el riel bajo y que la eliminación de las grietas del riel conducía a la reducción de la vida útil del riel en un 50%. También se informó que los aceros premium en curvas en ambientes secos podían resistir con éxito varios cientos de MGT sin rectificar. Sin embargo, con el paso del tiempo, y después del accidente por FCR ocurrido en Inglaterra, se determinó, que los rieles fallaban no solo por desgaste sino también por la generación y propagación de grietas debido a la FCR.

1.3.5. Reducción de costos

Con el paso del tiempo y a medida que la velocidad y las cargas por eje aumentan en los trenes, las compañías ferroviarias priorizan la optimización de la interfaz rueda-riel, esto con el objetivo de disminuir los costos de mantenimiento [103]. Tan solo la Unión Europea ha estimado que los costos debido a una remoción prematura de rieles, renovación y mantenimiento ascienden a 300 millones de euros por año [104].

Por otro lado, Cannon et al [105], han descrito como costos de fallas en rieles la inspección, retrasos en los trenes, tratamientos correctivos y preventivos, así como descarrilamientos.

Por tal motivo, el mantenimiento en rieles es muy importante. Grassie et al. [78] demostró que utilizar una estrategia preventiva de los rieles aumenta su vida útil, evitando la necesidad de reemplazarlos prematuramente, reduciendo aproximadamente el 40% de los costos.

Para la estimación de los costos, se han desarrollado modelos económicos, los cuáles son variados e incluyen los beneficios del reperfilado mediante procedimientos cíclicos [95] [106], costo de los equipos [107] y los efectos de la rugosidad superficial después del proceso de mantenimiento [108]. Otros modelos de costos propuestos por investigadores involucran variables involucradas con el mantenimiento de rieles, tales como tiempo de inactividad, inspección, lubricación, fallas por defectos y descarrilamiento [109] [110].

Es importante mencionar que el reperfilado de rieles tiene un efecto a largo plazo, lo que resulta en una extensión de la vida útil del riel de 25 a 40 años. Por otro lado, es muy importante que este se realice de manera correcta, ya que una mala práctica conduce a pérdidas en lugar de ahorros, por ejemplo, en 2008, el costo de mantenimiento de vías en el metro de Estocolmo, Suecia, fue de 1.2 millones de dólares, lo que aumenta el valor de planear y aplicar el mantenimiento en los trenes de manera adecuada [111].

1.3.6. Optimización del patrón de reperfilado

El patrón de reperfilado es una combinación de series de variables que incluyen el ángulo de ataque, la presión aplicada y la velocidad lineal de la reperfiladora [82].

Los patrones se consideran una parte importante para determinar las ubicaciones de las ruedas y los parámetros de procesamiento en las operaciones de mantenimiento de rieles. En general, la reperfiladora tiene varios patrones que están predeterminados en el sistema del controlador. Sin embargo, los patrones existentes no se utilizan en su totalidad debido a la falta de conocimientos técnicos y prácticos en el personal de mantenimiento, así como de las empresas ferroviarias. Por tanto, generalmente el perfil ferroviario estándar inicial es utilizado como perfil objetivo en la mayoría de las líneas ferroviarias, especialmente en las líneas de metro, no obstante, esta práctica puede resultar en remoción excesiva de material [82]. En la figura 21, se pueden identificar las seis zonas clave de esmerilado según Zakharov [69].

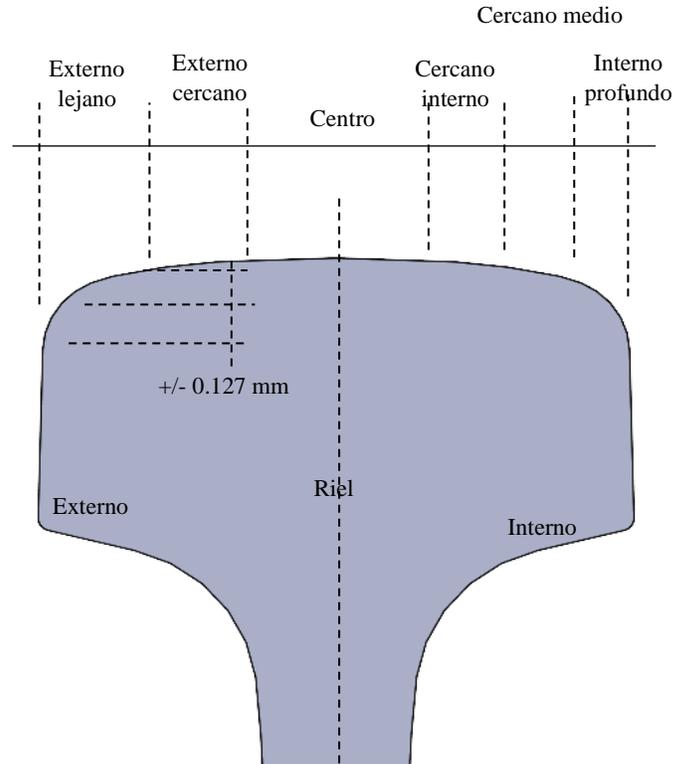


Fig. 21 Los patrones de reperfilado en rieles son descritos por el número relativo de ruedas abrasivas desplegadas en seis segmentos clave [69].

Las operaciones de esmerilado modernas reperfilan la cabeza del riel a un perfil de riel deseado (a menudo denominado "plantilla" de reperfilado), que está diseñado en función de patrones de tráfico, grado de curvatura y otros parámetros de vía y tráfico. En estas operaciones es de gran interés la cercanía de la operación de perfil deseada y la obtenida, por tanto, para evaluar la efectividad del mismo, se desarrolló un índice de calidad de esmerilado (Grinding Quality Index) [112]. Un ejemplo del uso de este índice fue el plan de reperfilado de riel en Queensland Rail, donde se utilizó un vehículo de inspección ferroviaria para recopilar datos de perfiles ferroviarios e imágenes de la superficie ferroviaria [68].

1.3.7. Materiales abrasivos utilizados en el reperfilado

En un proceso de reperfilado, los tres mecanismos básicos de desgaste presentados son rubbing, ploughing y cutting (ver figura 22), los cuales pueden influir simultáneamente en la remoción de material [113]. La piedra abrasiva de corindón, la cual está compuesta principalmente de óxido de aluminio cristalino es la más común para el reperfilado de rieles debido a su accesibilidad [114] [115], además de que, es un material natural casi tan duro como el diamante, lo que lo hace idóneo como abrasivo. Cabe señalar que las propiedades y el rendimiento de las piedras abrasivas dependen del tipo de material de grano abrasivo, el tamaño del grano, el material de unión, las propiedades del abrasivo y el aglutinante, así como la porosidad.

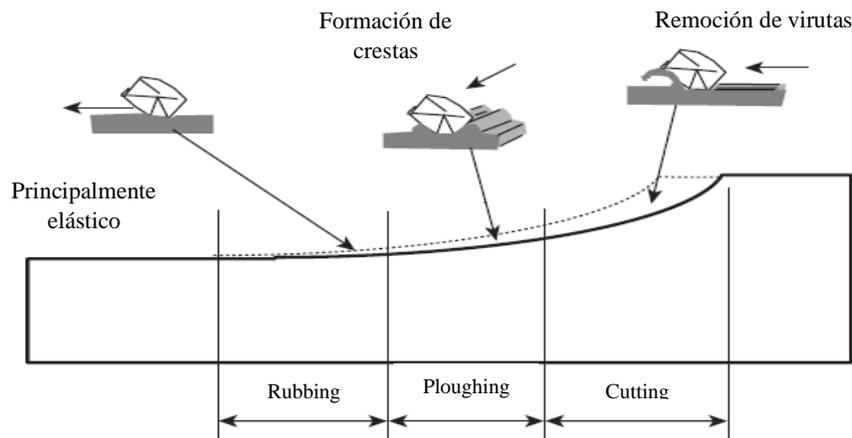


Fig. 22 Proceso de remoción de material y mecanismos de desgaste presentados en el proceso [116].

En cuanto al aglutinante, este debe ser lo suficientemente robusto como para resistir las fuerzas de reperfilado, las altas temperaturas y las fuerzas centrífugas sin desintegrarse. Existen seis tipos generales de materiales de unión para ruedas abrasivas convencionales: resinoide, goma laca, oxiclورو, caucho, silicato y vitrificado.

1.3.8. Variables que afectan el proceso de reperfilado

Mediante la experiencia en campo y en laboratorio, se han identificado problemas generados durante el proceso de reperfilado los cuales incluyen el uso de piedras abrasivas de bajo precio las cuáles tienen una distribución aleatoria de granos en la superficie que no son adecuadas para un desbaste de material de alta eficiencia, además de que estos granos se desgastan eventualmente [85].

1.3.8.1 Tasa de remoción de material

La tasa de remoción de material está en función de distintas variables[117] que incluyen la potencia, el número y el tamaño de los motores, la velocidad, el patrón de reperfilado, el diseño del equipo de reperfilado, la rueda abrasiva y la condición del riel. Un factor clave para determinar el tipo de reperfilado, la remoción de material y la calidad del acabado superficial es la velocidad [118][119], ya que el aumento de la velocidad de avance de la reperfiladora generalmente resulta en una disminución en la remoción de material [120]. Esto se debe a que la rueda abrasiva tiene menos giros sobre un punto determinado en la cabeza del riel (ver figura 23). Zhou et al, estudiaron los comportamientos de remoción de material de riel durante el reperfilado a diferentes velocidades de avance[121]. Por su parte, He J. J. [122] evaluó la eficiencia de la remoción de material después de cada pasada de reperfilado. Por otro lado, Gu et al [123] y Kanematsu [124] analizaron el comportamiento del mecanismo de remoción abrasiva de materiales de riel bajo diferentes velocidades de rotación de la rueda abrasiva. Una variable importante en el reperfilado es la capacidad de remoción de material de la piedra abrasiva, ya que un desgaste excesivo en la piedra provoca daños térmicos u otros defectos inesperados en el riel. Por tanto el diseño de piedras abrasivas es importante debido a que se puede controlar el calor generado en el contacto así como las fuerzas generadas [125].

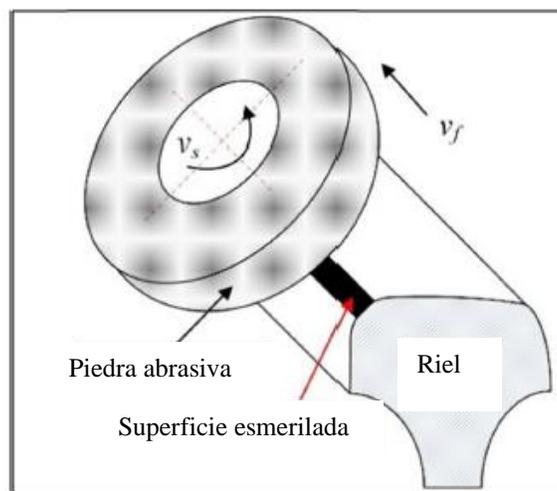


Fig. 23 Velocidad de rotación y velocidad lineal en piedra abrasiva [82].

1.3.8.2. Daño térmico

El daño térmico que las piedras de corindón sufren es muy grande debido a que se requiere una gran cantidad de energía cuando se elimina una gran cantidad de material, lo que provoca altas temperaturas en la zona de contacto [126][127], transfiriendo casi el 80% del calor a la pieza de trabajo al utilizar este tipo de piedras, causando daños térmicos en la superficie del material del riel [128].

El rendimiento del reperfilado está limitado por las altas temperaturas generadas en el área de contacto. Para disminuir la temperatura, el diseño de ruedas abrasivas con patrones se ha incrementado para reducir la carga térmica en el área de contacto [129]. Shevtsov optimizó la interfaz de la rueda del riel con simulación de software y finalmente una optimización con un método numérico para el diseño del perfil de la piedra [130]. Zhang et al, encontraron que la temperatura de la superficie del riel disminuye con el aumento de la velocidad del tren y aumenta con el incremento de la velocidad de las ruedas abrasivas. La temperatura de la superficie del riel también aumenta significativamente con un mayor número de ruedas abrasivas [131]. En cuanto a generación de la capa martensítica característica de las altas temperaturas generadas Uhlmann et al, [38] estudiaron experimentalmente el daño de la capa superficial durante el proceso de reperfilado de rieles

1.3.8.3. Velocidad y presión aplicada en reperfilado

La velocidad tanto de rotación de las piedras abrasivas como la velocidad lineal afectan el rendimiento del proceso de remoción de material. Gu et al, encontraron que si se aumenta la velocidad de rotación de la piedra, tanto el coeficiente de fricción como la rugosidad de la superficie del riel disminuyen [123].

Zhou et al, encontraron que el proceso de reperfilado es más eficiente a mayor velocidad de avance y mayor número de granos en la rueda abrasiva. Por el contrario, el reperfilado es relativamente ineficiente a mayor velocidad de rotación de la piedra y mayor presión aplicada en el reperfilado [132].

Por otro lado, la presión aplicada durante el reperfilado influye en los esfuerzos y las temperaturas que se generan con las piedras abrasivas y la superficie del riel. Zhou et al,

observaron mediante experimentos que, con el aumento en la presión de reperfilado, se mejora la eficiencia del proceso de reperfilado y la cantidad de material removido, aumentando también el grosor de la viruta, sin embargo, los esfuerzos residuales aumentaron y se obtuvo una superficie de mala calidad [133].

1.3.8.4. Fuerza de reperfilado (Grinding force)

La fuerza de reperfilado se define como la suma de la fuerza de corte y la fuerza de fricción generada durante el proceso de desbaste del material. Esta influye en el rendimiento general del proceso, la durabilidad de la piedra abrasiva y la calidad de la superficie final del riel [134][135]. Zhang et al [136], mencionan que a medida que se aumenta el número de pasadas de la piedra abrasiva, la fuerza de reperfilado disminuye, por lo que se reduce la cantidad de material removido y la rugosidad de la superficie.

1.3.8.5. Tamaño de grano

Wang et al, estudiaron la influencia del tamaño de grano en las piedras abrasivas en las fuerzas generadas durante el reperfilado y la tasa de remoción de material de riel utilizando una máquina reperfiladora. Encontrando que, a medida que los granos se incrementan, la fuerza de esmerilado y el coeficiente de fricción entre la piedra y el riel aumentan, lo que provoca un aumento en la dureza y en la temperatura del riel.

El aumento en el número de granos de la piedra disminuye el volumen de material removido y la rugosidad de la superficie del riel, además, provoca mayor vibración debido a los mecanismos de eliminación de material. Por tanto, la optimización del tamaño y número de granos en la piedra abrasiva es significativa para mejorar la eficiencia de remoción de material y la calidad de la superficie del riel [137][138].

Dependiendo el acabado superficial requerido, se determinará el patrón de reperfilado, para un acabado no rugoso, se debe especificar una piedra con un tamaño de grano fino. Generalmente para superficies con baja rugosidad se utilizan tamaños de grano entre 14 y 18 [69]. Zhi et al, concluyeron que la energía consumida durante el procedimiento de reperfilado tiene una relación directa con la velocidad y la fuerza de esmerilado, y a su vez está estrechamente relacionadas con la geometría del grano de la piedra abrasiva [139].

Por otro lado, Ding et al, encontraron que la fuerza de reperfilado aumenta con el aumento de la presión aplicada y el aumento en el número de granos de la rueda abrasiva, y por el

contrario, esta fuerza disminuye con el aumento en la velocidad de rotación de la piedra [140].

1.3.8.6. Dureza de piedras abrasivas

Por otro lado, las piedras abrasivas que remueven material en la esquina del riel están sujetas a altas presiones de contacto y tienden a remover mayor cantidad de material que una piedra abrasiva en la cabeza del riel. Por lo que algunas empresas usan diferentes grados de dureza en las piedras para asegurar un correcto procedimiento. Además, el incremento de la dureza está relacionada con la cantidad de aglutinante utilizado, ya que, si es demasiado duro, la rueda se calienta y si es demasiado suave, la vida útil de la piedra disminuye. Por otro lado, la vida de las muelas abrasivas se reduce cuando se incrementa la potencia de reperfilado [96].

1.3.8.7. Simulación del proceso de reperfilado

Para simular el proceso de reperfilado en rieles, se han desarrollado modelos matemáticos que incluyen velocidad del motor [117], predicción del comportamiento y rendimiento del reperfilado [141][142], determinación del ángulo de reperfilado en función del material removido [82], capacidad de remoción de material de las piedras abrasivas[143] distribución de los granos en la piedra abrasiva [85], influencia en la estabilidad del tren [144], además de una técnica que reduce la tasa de desgaste en curvas [145]. También se desarrollaron hipótesis y modelos de simulación para explorar la optimización de los parámetros de reperfilado de rieles mediante métodos numéricos [146] [147]. Todas las variables mencionadas nos hacen darnos cuenta que el reperfilado de rieles es un proceso complicado, que incluye corte, remoción de material, deformación de la superficie, desgaste de la rueda abrasiva, entre otros factores.

Simulaciones de reperfilado de rieles han sido realizadas por investigadores tanto en laboratorio como en campo. Los parámetros utilizados se resumen en la tabla 5.

Capítulo I: Marco Teórico

Tabla 5 Parámetros de reperfilado utilizados en diferentes trabajos de investigación.

Investigador	Tribómetro	Velocidad de la rueda abrasiva	Velocidad de avance reperfiladora	Profundidad de corte	Características de la rueda abrasiva
Y. Wu, M. Shen et al. 2019 [148]	Máquina de esmerilado de ultra alta-velocidad	1591 rpm	20 m/min	0.2 mm 0.25 mm 0.3 mm 0.35 mm	CBN-210
J. Ding, R. Lewis, A. Beagles, and J. Wang 2018 [149]	Reperfiladora GMC-96X	3600 rpm	200 m/min 300m/min	0.5mm 0.9mm	Diámetro 254 mm
S. Zhi, A. M. Zarembski, and J. Li, 2013 [117]	Reperfiladora	3629 rpm	9 m/min	0.2160 mm 0.1727 mm 0.0935 mm	Diámetro externo 250 mm (10") Diámetro interno 150 mm
R. X. Wang et al., 2020 [150]	Banco de pruebas de reperfilado	3600 rpm	50 m/min	0.9 mm	Corindón de zirconio (ZA) alúmina fundida (BA)
H.-H. Ding et al., 2020 [140]	Banco de pruebas/ simulación por computadora	1500 rpm 2000 rpm 2500 rpm 3000 rpm	No especificado	No especificado	Tamaños de grano 12 16 24 30
B. Lin, K. Zhou, J. Guo, Q. Y. Liu, and W. J. Wang 2018 [126]	Banco de pruebas de reperfilado	2000 rpm 2600 rpm 3200 rpm 4000 rpm	No especificado	No especificado	Tamaños de grano 12 16 24
E. Magel, P. Sroba, K. Sawley, and J. Kalousek, 2005 [52]	Reperfiladora	Not specified	214.58 m/min 268.224 m/min 107.29 m/min 160.93 m/min	0.05 mm 0.076 mm 0.15 mm	No especificado
S. Zakharov, Kharris, Landgren, Turne, and Ebersson, 2001 [69]	Reperfiladora	3600 rpm	50 m/min 333.33 m/min	0.15 mm 0.4 mm 0.38 mm 0.63mm	Tamaños de grano 14 18 32

E. Uhlmann, P. Lypovka, L. Hochschild, and N. Schröer, 2016 [38]	Reperfiladora Profimat 408	35 m/s 50 m/s	10 m/min 12.5 m/min 15 m/min	0.03mm 0.06 mm 0.09 mm	Ruedas cilíndricas y de copa con grano corindón fundido Tamaños de grano 16-24
--	----------------------------	------------------	------------------------------------	------------------------------	---

1.3.9. Reperfilado de ruedas

En el caso de las ruedas, éstas también se someten a un proceso de reperfilado o torneado (turning) presentado en la figura 24, la razón más importante para el mantenimiento del perfil transversal de la rueda es la seguridad, ya que si la pestaña de la rueda es demasiado delgada esta corre el riesgo de no hacer un contacto adecuado y producir el descarrilamiento del conjunto de ruedas y, por ende, del tren. Para perfiles utilizados en Inglaterra y en general en el continente europeo, de 4 a 6 mm de desgaste es permitido en cada pestaña de rueda. El segundo criterio para el reperfilado de ruedas es la altura de la pestaña, ya que, al desgastarse la banda de rodadura, la altura de la pestaña se incrementa, lo que puede causar una interferencia con elementos de la vía como las barras de unión, por lo que el límite de altura de pestaña ha sido ajustado a 36.5 mm para perfiles típicos de rueda. Por otro lado, la deformación en la pestaña de la rueda es la principal causa de flujo plástico en los rieles bajos en las curvas [151].

Los conjuntos de ruedas (wheelsets) son reperfilados en tornos especialmente adaptados para esta aplicación, anteriormente los conjuntos de rueda tenían que desmontarse de los trenes para ser instalados en los tornos, perdiendo mucho tiempo en montar y desmontar, sin embargo, actualmente se ha hecho más común el uso de tornos que se encuentran por debajo de los trenes, así, las ruedas se tornean sin tener que desmontarse, por lo que pueden maquinarse hasta 32 conjuntos de rueda por día. Si las ruedas se desgastan de manera asimétrica, esto debe corregirse mediante el proceso de reperfilado.

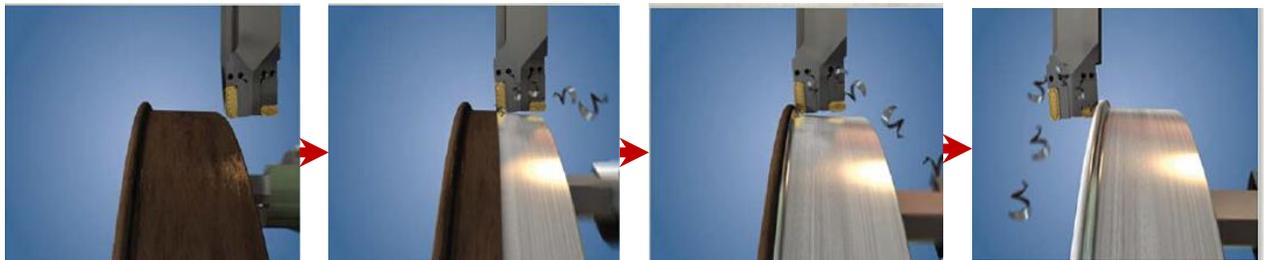


Fig. 24 Proceso de reperfilado en ruedas [152].

1.4. Capa blanca (White etching layer)

Un fenómeno muy interesante en la superficie del riel sucede cuando la temperatura debido al reperfilado excede los 600 ° C produciendo una quemadura (grinding burn), con lo que la microestructura del riel cambia y se genera una capa blanca (white etching layer WEL), llamada así por el color blanco que se presenta al revelar su microestructura después de un ataque químico (ver figura 25). Estas capas pueden acelerar el crecimiento de grietas y promover la FCR. Por lo tanto, los parámetros de reperfilado deben optimizarse para evitar operaciones agresivas en las cuáles se pueda generar esta capa [140].

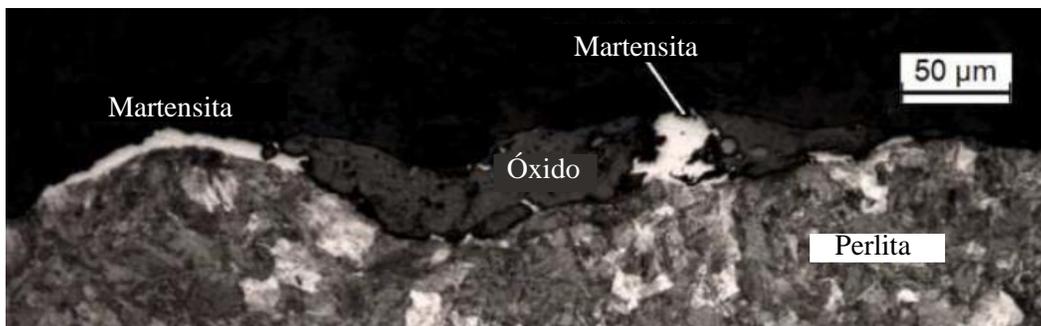


Fig. 25 Marcas de reperfilado del lado exterior de un riel desgastado R350HT. Productos de oxidación (gris oscuro) y martensita (blanco) pueden ser vistos en la superficie. Corte a lo largo de la dirección de rodadura [153].

Las capas blancas generalmente se producen por fricciones entre la rueda y el riel, durante la aceleración o el frenado [127]. Durante dicha exposición térmica, la superficie del riel se puede calentar a altas temperaturas, seguidas de un enfriamiento muy rápido debido al alto intercambio de calor con el cuerpo frío del riel. Si las temperaturas son lo suficientemente altas como para provocar la austenización de la perlita, esto será seguido por una transformación martensítica durante el enfriamiento.

La microestructura de esta capa ha sido objeto de diversos estudios y de controversia ya que se ha pensado como martensita [154], aleación de Fe-C nanocristalina [155], laminillas de perlita deformadas, martensita nanocristalina, austenita y cementita [156].

Si bien las capas superficiales martensíticas en los rieles se han estudiado en detalle [157][158][159][160][161], la investigación sobre el efecto del reperfilado en la superficie del riel es limitada. En 2014, Rasmussen [162] demostró que el reperfilado causó capas de

martensita en las superficies de los rieles, lo que podría estar relacionado con grietas debido a la FCR.

Por otro lado, en 2016 se publicó una investigación detallada sobre el papel de los efectos de reperfilado en las superficies de los rieles [163], centrándose en el efecto del reperfilado en la FCR, en rieles de grado R370crHT y R260Mn, indicando que el riel con tratamiento térmico más duro es mucho más vulnerable al daño inducido por esmerilado en comparación con los rieles de grado R260Mn estándar, una situación similar se presentó en Dinamarca, donde se presentan graves problemas de spalling en rieles R350HT endurecidos en la cabeza, lo que se ve con menos frecuencia en rieles más blandos [153].

1.5. Efecto de la rugosidad

La fricción se ve influenciada directamente por la rugosidad de los elementos en contacto. A medida que las superficies tienen una rugosidad más alta, el periodo de running-in o asentamiento se incrementa, esto significa que tanto el coeficiente de fricción como la tasa de desgaste se mantendrá en un valor alto por mayor tiempo.

El periodo de tiempo en el cual las asperezas provocadas por el esmerilado se remueven, varía con respecto al tipo de tren, por ejemplo, en líneas de transporte pesadas, las asperezas se remueven a los pocos días debido a las elevadas cargas por eje.

La rugosidad tanto en la rueda y en el riel, aumentan cuando se les realiza una operación de esmerilado, por tanto, la importancia de la evaluación de la superficie y el running-in es muy importante para disminuir efectos negativos en las superficies recién esmeriladas.

Diversos estudios han establecido la relación entre la rugosidad superficial del riel y la generación de ruido [164] [165][166][167][168]. Craven et al [169], desarrollaron una estrategia de reperfilado, denominada calidad acústica de la vía (Acoustic Track Quality ATQ), que es una medida de la rugosidad de la superficie de los rieles y es proporcional a los niveles de ruido por rodadura durante el paso de un tren.

A su vez enfoques analíticos también se han desarrollado para comprender el efecto de rugosidad después del reperfilado en el contacto rueda-riel [170][171].

Recientemente, la introducción de texturas con diferentes patrones en las superficies ha sido objeto de diferentes estudios [172], por ejemplo, Haiyue Lu et al, desarrollaron el diseño de una rueda de reperfilado basada en la distribución de granos utilizando el concepto de patrón de distribución de hojas en un árbol y comparándolo con una piedra de alúmina [125].

Capítulo I: Marco Teórico

En cuanto al running-in, Lundmark (ver figura 26) investigó la influencia de las topografías superficiales de ruedas y rieles en el comportamiento de running-in, desgaste, fricción y daño superficial resultante a través de simulación experimental en laboratorio [173].

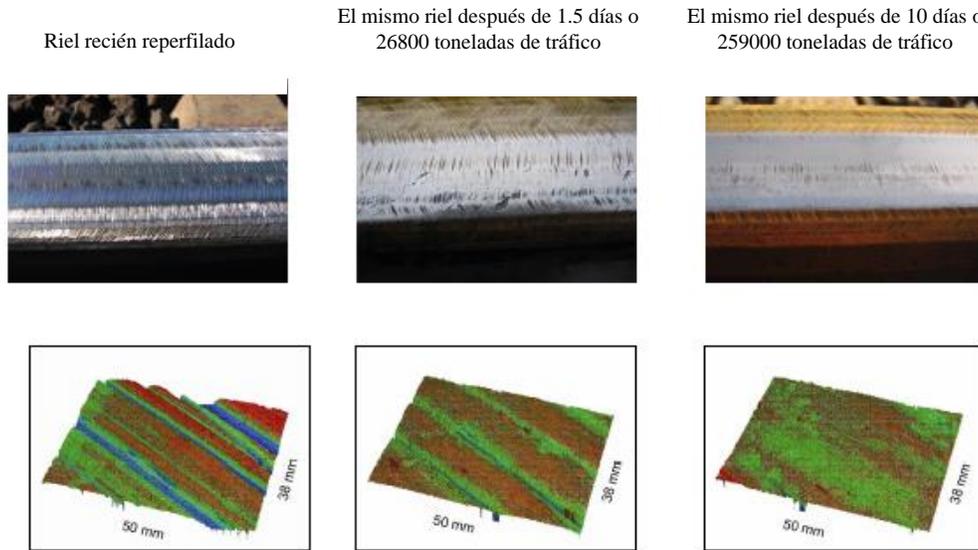


Fig. 26 Proceso de running-in de un riel recién reperfilado [96].

Tres normas son particularmente relevantes para las irregularidades en los rieles y el ruido [165]:

EN ISO 3095,20: la cual especifica la rugosidad acústica de una sección de prueba que se utilizará para pruebas de tipo acústico de vehículos ferroviarios.

EN 15610,21: que prescribe un método para medir la rugosidad de la cabeza del riel.

EN 13231-3,22: prescribe irregularidades residuales que pueden permanecer en un riel perfilado.

1.5.1. Parámetros de medición de rugosidad

Para caracterizar la rugosidad superficial se han establecido parámetros (ver figura 27) mencionados a continuación [174]:

R_a : rugosidad promedio; es utilizada como un valor de referencia de la amplitud de la rugosidad en un perfil, sin embargo, no provee información acerca de las irregularidades o formas del perfil.

R_q : media cuadrática del perfil evaluado, corresponde a la desviación estándar de la distribución de altura que se define en la longitud de muestreo.

R_t : altura total del perfil; el valor de la altura entre el valle más profundo y el pico más alto del perfil medido.

R_p : altura máxima del pico; la altura del pico más alto del perfil medido.

R_v : profundidad máxima del valle; la profundidad del valle más profundo en el perfil medido.

R_z : altura máxima del perfil; este parámetro se utiliza con frecuencia para comprobar si el perfil tiene picos que puedan afectar el contacto estático o por deslizamiento.

R_{sk} (Skewness): asimetría de la distribución de altura del perfil evaluado. Este parámetro proporciona información sobre la morfología de la textura de la superficie. Los valores positivos corresponden a los picos altos distribuidos sobre una superficie regular, mientras que los valores negativos se encuentran en superficies con poros y arañazos (ver figura 28).

R_{ku} (kurtosis): informa la distribución de picos y valles de una superficie con respecto a la línea media del perfil e indica gráficamente la distribución de altura (ver figura 29). Para una función de distribución de altura normal (gausiana), el valor de R_{ku} es 3.

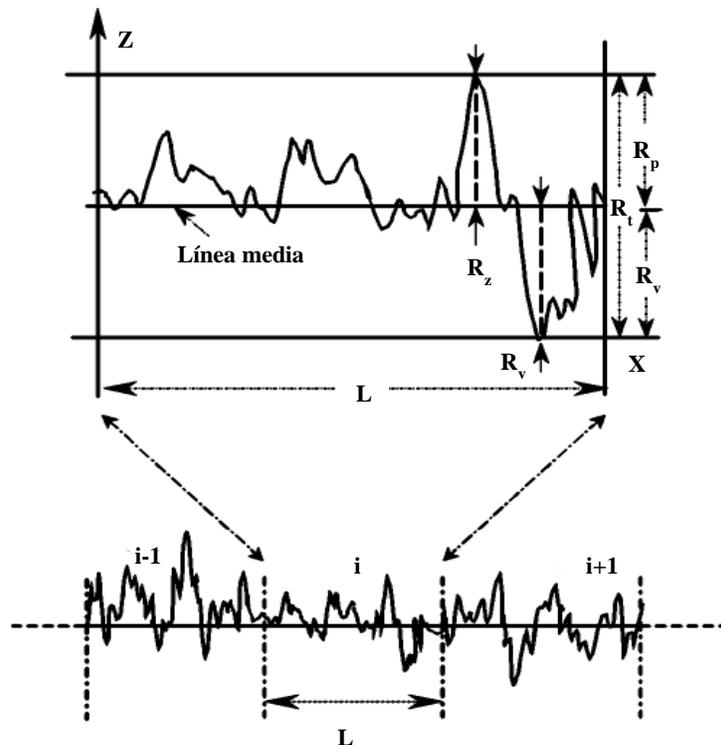


Fig. 27 Medidas de rugosidad convencionales en un perfil de superficie [175].

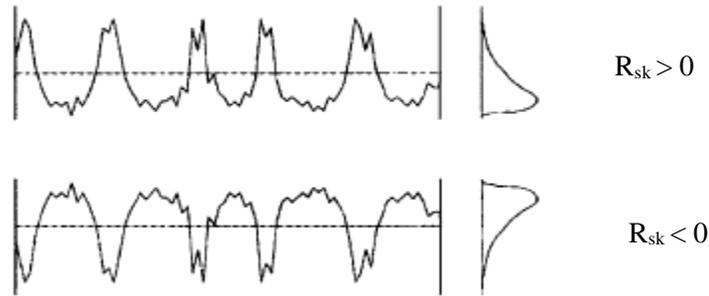


Fig. 28 Valores opuestos de skewness correspondientes a diferentes superficies [27].

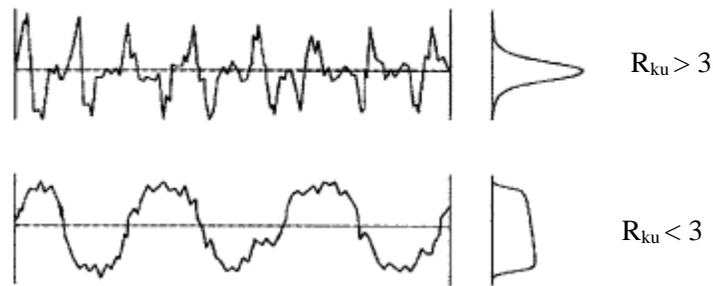


Fig. 29 Diferentes valores de Kurtosis para diferentes superficies [27].

1.5.2. Parámetros de caracterización de textura superficial

Los patrones característicos de picos y valles en la pieza de trabajo terminada se conocen como textura superficial [176]. A su vez, los parámetros de textura de la superficie se separan en tres grupos en función del tipo de perfil a partir del cual se calculan: los parámetros P se calculan sobre el perfil principal, los parámetros R se calculan sobre el perfil de rugosidad y los parámetros W se calculan sobre el perfil de ondulación.

Sin embargo, los parámetros básicos de rugosidad de la superficie, no son adecuados para la evaluación de texturas, ya que no permiten medir la separación entre la rugosidad de la superficie y la profundidad de las texturas. Por lo tanto, es necesario el uso de parámetros de superficie que tienen propiedades funcionales estratificadas.

Todos los parámetros de rugosidad mencionados anteriormente, caracterizan a la superficie en dos dimensiones, sin embargo, un enfoque más preciso consta de caracterizar topográficamente en tres dimensiones 3D.

Para distinguir los parámetros 2D y 3D, una letra mayúscula “S” para superficies es utilizada para identificar los parámetros 3D y una letra mayúscula “R” para parámetros 2D [177].

Más información sobre las mediciones de topografía de superficie en 3D se puede encontrar en [178].

1.5.3. Proceso de reacondicionamiento o running-in

El running-in es el proceso mediante el cual las piezas de la máquina mejoran en conformidad, topografía superficial y compatibilidad friccional durante la etapa inicial de uso [12].

El running-in es la etapa más crítica en la vida de un sistema tribológico ya que un running-in exitoso es el requisito previo para una baja fricción y una pequeña tasa de desgaste. Durante el running-in, las asperezas más prominentes y las superficies de contacto, se deforman plásticamente y se desgastan inicialmente, hasta formar una superficie más plana. Por lo tanto, este fenómeno ocurre antes del estado estacionario cuando dos o más superficies sólidas se encuentran en contacto debido a una carga y se mueven relativamente entre sí, generalmente acompañadas por cambios en el coeficiente de fricción nominal y/o la tasa de desgaste. Pueden ocurrir varios procesos de desgaste mecánico durante el running-in, como la abrasión y la adhesión [13][14].

El running-in (ver figura 30) frecuentemente es relacionado con los términos breaking-in y wearing-in que son parecidos, pero no idénticos, ya que el primero se refiere al proceso de desgaste y reacondicionamiento de la superficie, pero a su vez, incluye cambios en el coeficiente de fricción que no necesariamente es simultáneo o en los mismos tiempos que solo de proceso de wearing-in o desgaste [179].

Los tres principales atributos del running-in se mencionan a continuación: a) la duración de las transiciones en el periodo de reacondicionamiento de la superficie, lo que incluye el tiempo en el cual se alcanza el periodo de estabilización en el cuál tanto la tasa de desgaste como el coeficiente de fricción se estabilizan y alcanzan un valor promedio b) la forma que toma la gráfica fuerza de fricción contra el tiempo de operación y c) las fluctuaciones del coeficiente de fricción durante todo el proceso de reacondicionamiento.

La presión de contacto juega un papel muy importante en el proceso de reacondicionamiento, ya que, dependiendo el valor de ésta, puede aumentar o disminuir el tiempo de running-in. Altas presiones tienden a inducir una transición más rápida al estado de estabilización.

Blau [180], propuso un método para relacionar la fricción y el desgaste, traducido en un mapa en el cual se grafica el tiempo en el cual los valores de coeficiente de fricción y tasa de desgaste se mantienen constantes o estables. Identificando en este gráfico, tres etapas en los materiales, iniciando por el reacondicionamiento de la superficie, seguido de la estabilización y un desgaste moderado, para finalmente hacer una transición a un desgaste severo. El uso de lubricantes cambia en gran medida este comportamiento y puede tener los siguientes efectos cuando se aplica correctamente entre un par de materiales: a) puede retrasar el periodo de reacondicionamiento de la superficie, b) puede alterar el periodo en el cual ocurre el running-in, c) tiende a moderar los cambios en el coeficiente de fricción y en la tasa de desgaste ocurridos en el running-in y d) puede reducir la habilidad de dispositivos de medición de fricción para detectar pérdida de debris.

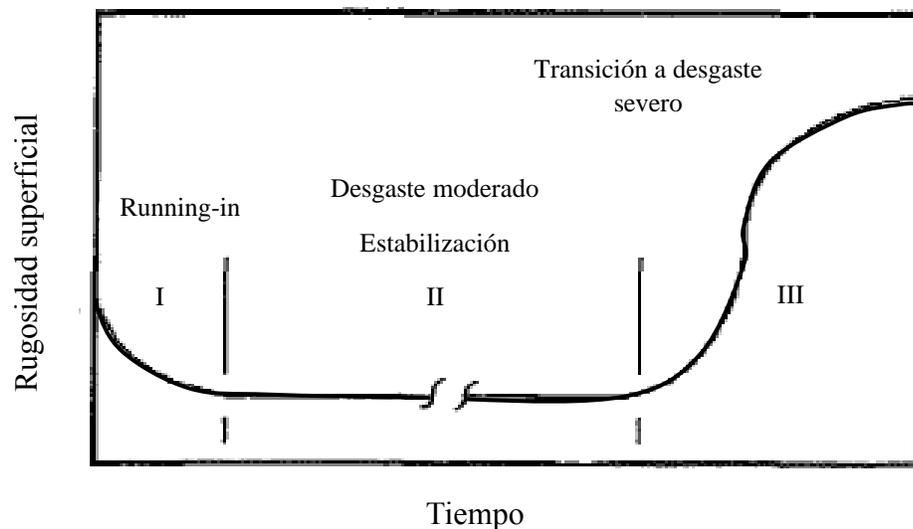


Fig. 30 Esquema del proceso de running-in para un material, en el cual se observa el periodo de reacondicionamiento, la estabilización y la transición al desgaste severo [179].

1.6. Lubricación

Una correcta estrategia de lubricación es una forma importante de reducir el desgaste en la interfaz rueda-riel [181], existen tanto lubricantes artificiales, como los naturales que incluyen agua, humedad ambiental y la presencia de hojas en el riel, los cuáles funcionan

como modificadores de fricción por tanto su evaluación en el desempeño de la tracción y frenado del tren es un punto de mucho interés [24][182][183].

El uso de lubricantes es muy importante para la disminución del desgaste, sin embargo, la zona de aplicación, así como la cantidad de lubricante a aplicar son críticos para el correcto desempeño del lubricante. En cuanto a los lubricadores, los resultados obtenidos por Canadian Pacific Railway, demostraron que los sistemas de lubricación fijos (wayside), no pueden proporcionar de manera confiable los niveles de fricción recomendados para la parte de la pestaña del riel (rail gauge), por lo que deben ser complementados con otras tecnologías, como lubricadores a bordo, aplicadores hi-rail u otros sistemas que permitan valores adecuados de fricción en esta parte del riel [184]. Por su parte, el Consejo Nacional de Investigación de Canadá, CSX Transportation y Loram Maintenance of Way, desarrollaron un programa integral de lubricación y reperfilado, en el cual enfatizó la importancia de la complementación del proceso de reperfilado con una correcta estrategia de lubricación para el control adecuado de la fricción en la interfaz rueda-riel [185]. En cuanto al desgaste, Canadian Pacific Railway implementó una estrategia llamada "100% effective gauge face lubrication", demostrando que, si el lubricante se aplica eficazmente, el desgaste del costado del riel, prácticamente se elimina en condición de curva [186].

Según Sroba et al, una lubricación efectiva de la pestaña del riel (gauge), en conjunto con un reperfilado preventivo, permiten que el área de la cabeza del riel perdida sea menor y, en consecuencia, la eliminación del material por reperfilado se reduzca (en 3,5 veces) en comparación con el uso de una estrategia correctiva [67].

En la tabla 6, se resumen los valores de coeficiente de fricción sugeridos para las diferentes zonas de contacto, se puede observar que los valores de coeficiente de fricción son muy parecidos entre las diferentes normas y prácticas en empresas ferroviarias.

Capítulo I: Marco Teórico

Tabla 6 Valores objetivo de coeficiente de fricción dependiendo la zona de contacto [187].

Fuente	Contacto Rail gauge/Wheel flange	Contacto railhead/ wheel tread
AREMA	<0.2	0.35 ± 0.5
Canadian Pacific Railway	≤ 0.25	0.30 to 0.35 (< 0.1 variaciones a lo largo de la cabeza del riel)
ARTC (RC2411)	≤ 0.3 ≤ 0.25 (recomendado)	> 0.3 > 0.4 (recomendado) (< 0.15 diferencia entre riel alto y riel bajo)
IHHA (2001)	≤ 0.3 ≤ 0.25 (recomendado)	0.25 a 0.45 ≤ 0.35 (recomendado) (< 0.15 variaciones a lo largo de la cabeza del riel)

Capítulo II: Metodología de experimentación

2.1. Preparación de probetas (pernos y discos)

Se probaron un par de materiales de rueda y riel utilizados comúnmente en los sistemas ferroviarios en México. Los pernos se elaboraron con material de rueda ER8 y los discos con material de riel 115RE. Para la elaboración de las probetas se utilizó un esmeril con el cual se realizaron cortes para obtener trozos de material y su posterior maquinado tanto en torno y fresadora convencionales, como el acabado en una máquina de control numérico. El material fue donado al Grupo de Tribología por la empresa Ferrovalle. El proceso de maquinado de probetas se resume en la figura 31.

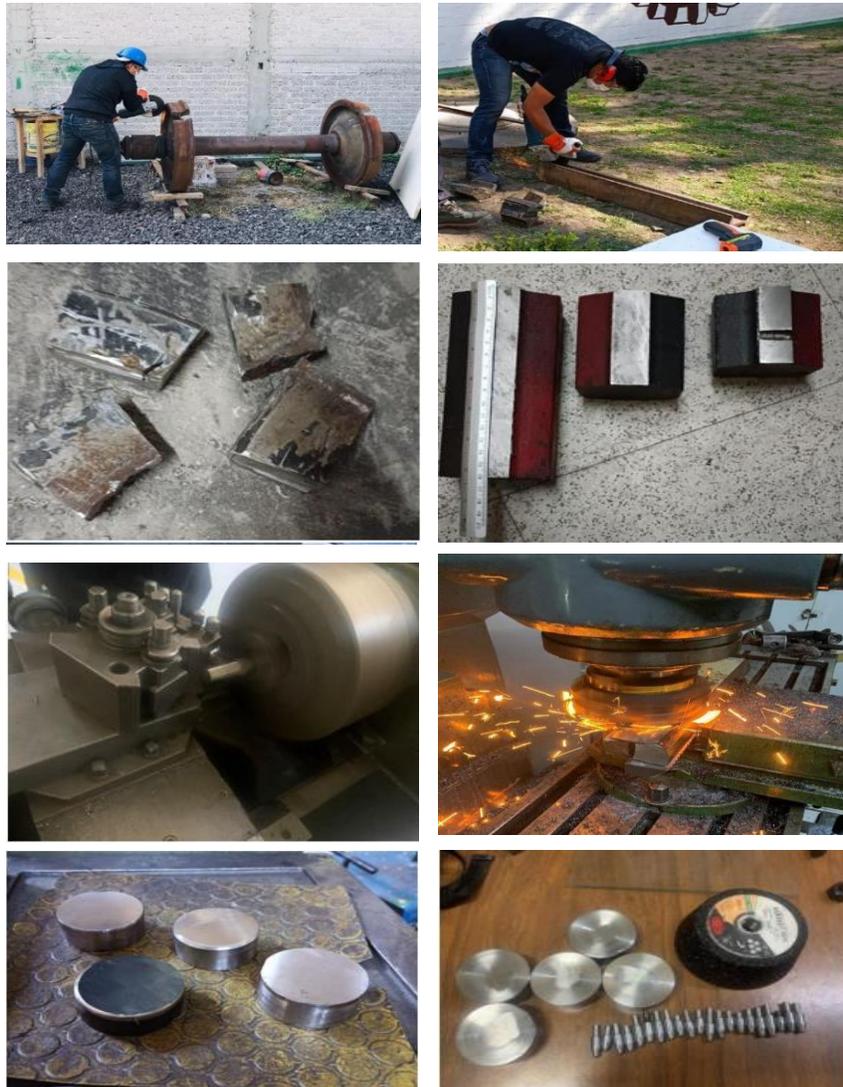


Fig. 31 Proceso de elaboración de probetas a utilizar en experimentación.

Capítulo III: Metodología de Investigación.

Los pernos se obtuvieron de la banda de rodadura de la rueda, mientras que los discos se obtuvieron de la cabeza del riel. En las tablas 7 y 8, se muestran las principales características físicas y químicas reportadas por norma del par tribológico a ser estudiado.

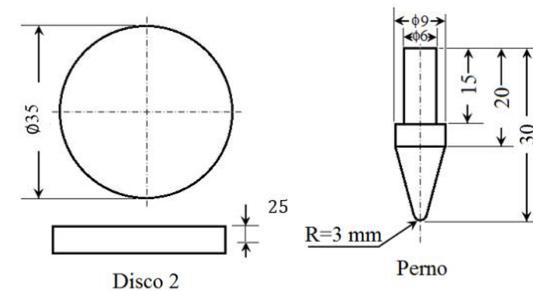
Tabla 7 Composición química de los materiales a utilizar [32].

Tipo de acero	Contenido máximo en %										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Ni	V	Al
ER8 (rueda)	0.56	0.40	0.80	0.020	0.015	0.30	0.30	0.08	0.30	0.06	---
115RE (riel)	0.74 a 0.86	0.10 a 0.60	0.75 a 1.25	0.020 (Máx)	0.020 (Máx)	0.30 (Máx)	---	0.060 (Máx)	0.25 (Máx)	0.010 (Máx)	0.010 (Máx)

Tabla 8 Propiedades mecánicas de los materiales a utilizar [32] [188].

Tipo de acero	Propiedades mecánicas			
	Módulo de elasticidad (GPa)	Resistencia a la tracción (MPa)	Módulo de Poisson	Dureza HB (Mín)
ER8 (rueda)	208	483	0.28	245
115RE (riel)	210	540	0.3	310

Las dimensiones de las probetas se muestran en la figura 32, se seleccionó el radio de la punta de los pernos de 3mm para poder simular la presión de contacto de 2.5GPa.



Medidas en mm

Fig. 32 Dimensiones de probetas.

Capítulo III: Metodología de Investigación.

Para simular el proceso de reperfilado de rieles se utilizó una piedra abrasiva de alúmina, con resinoide como aglutinante y con tamaño de grano 24, esta rueda abrasiva es similar a las típicas piedras abrasivas utilizadas en condiciones reales. El diámetro de la rueda es de 125 mm. Los parámetros de reperfilado utilizados para simular se muestra en la tabla 9.

Tabla 9 Parámetros de reperfilado para obtener las diferentes texturas.

Textura	Profundidad de corte (mm)	Velocidad de giro rueda abrasiva (rpm)	Velocidad de avance (mm/min)
1	0.3	3600	500
2	0.3	3600	1000
3	0.6 con 2 pasadas de 0.3 mm cada una	3600	500
4	0.6 con 2 pasadas de 0.3 mm cada una	3600	1000
5	0.9 con 3 pasadas de 0.3 mm cada una	3600	500
6	0.9 con 3 pasadas de 0.3 mm cada una	3600	1000
7	0.6	3600	500
8	0.6	3600	1000
9	0.9	3600	500
10	0.9	3600	1000

Los parámetros de reperfilado se establecieron de acuerdo con los datos obtenidos de la tabla 6 para simular un procedimiento real de reperfilado de rieles. La cantidad de remoción de material fue de 0,3, 0,6 y 0,9 mm, correspondientes a los procedimientos preparativo, preventivo y correctivo respectivamente. Asimismo, las texturas se realizaron para observar los efectos en la superficie de la remoción de material que se realiza con una sola pasada o

Capítulo III: Metodología de Investigación.

con múltiples pasadas de la muela abrasiva con respecto a la generación de calor y el daño generado en la superficie del material.

Las texturas generadas son similares a las generadas en campo por máquinas reperfiladoras como puede observarse en la figura 33.

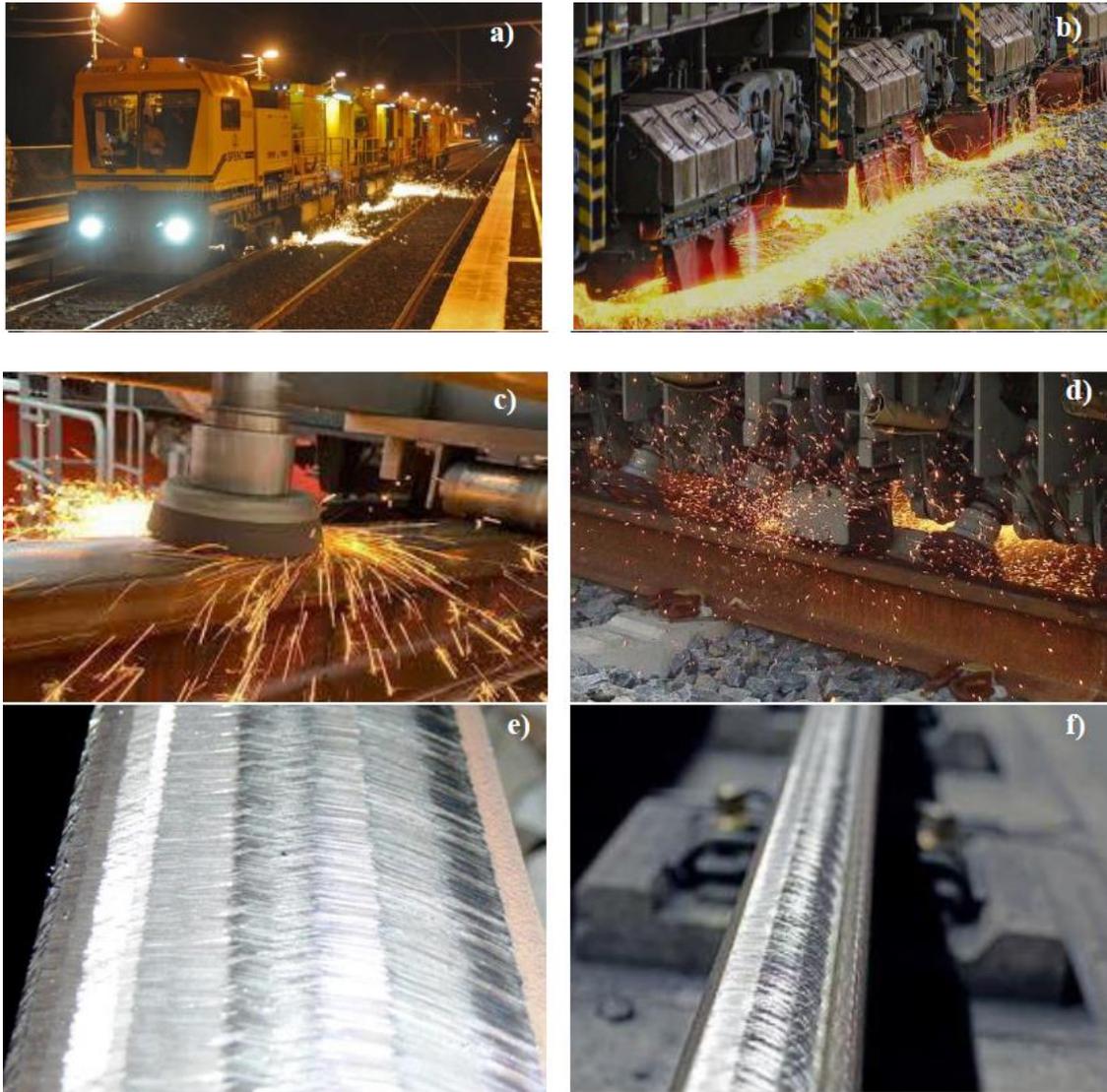


Fig. 33 Reperfilado de rieles en campo a) Reperfiladora en rieles de Melbourne [189] b) Reperfiladora Speno RR 32 M-3 [190] c) Reperfiladora Kiefer-Cranes [191] d) Reperfiladora Ram [192] e) Superficie de riel después de proceso de reperfilado Speno International Group [193] f) Superficie de riel de transporte metropolitano después de proceso de reperfilado [194].

Una vez obtenidos los parámetros de desbaste a simular, se replicaron tanto en una fresadora convencional como en una fresadora CNC, adaptando la piedra de desbaste de acero a la

Capítulo III: Metodología de Investigación.

fresadora para la remoción de material de riel, simulando así un proceso de reperfilado (ver figura 34), obteniendo diferentes texturas y la posible presencia de un cambio microestructural debido al cambio de temperatura y los esfuerzos generados en las probetas de riel.



Fig. 34 Generación de texturas adaptando la piedra de esmeril a) y b) a una fresadora convencional, c) y d) a una fresadora CNC, e) y f) texturas generadas después de esmerilado.

Capítulo III: Metodología de Investigación.

Acabado el proceso de reperfilado, se obtuvieron diez texturas diferentes. Para obtener los parámetros de rugosidad se utilizó un perfilómetro óptico. Los parámetros de rugosidad cuantificados fueron los siguientes: R_a , R_q , R_t , R_p , R_v , R_z , S_{sk} y S_{ku} .

Las pruebas se realizaron en un tribómetro perno sobre disco (ver figura 35) simulando una condición de total deslizamiento (full slip) y una presión de contacto de 2500 MPa correspondiente a una presión alcanzada en una condición de curva, el cual fue calculada mediante el enfoque analítico de Hertz. La velocidad de deslizamiento fue de 1 m/s simulando una velocidad típica del sistema de transporte colectivo metro correspondiente a 36 km/h y un porcentaje de deslizamiento de 1%.

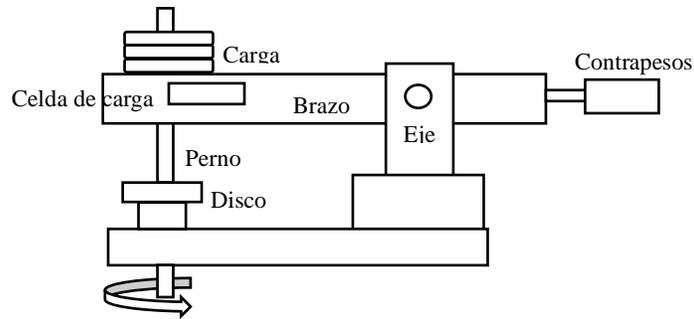


Fig. 35 Esquema de máquina perno sobre disco.

Se simularon condiciones tanto en seco como en lubricado. La grasa lubricante utilizada tiene un valor de penetración NLGI de 000, con una base de aceite semi-sintética, un aglutinante inorgánico y un rango de temperatura entre -25°C a 150°C , esta grasa es el lubricante comúnmente aplicado en los sistemas ferroviarios metropolitanos de la Ciudad de México. Se aplicó grasa lubricante con ayuda de una jeringa, la cantidad aplicada es de 0.03 ml, la cantidad se basa en trabajos previos realizados con este lubricante [195]. Las muestras tanto de discos como de pernos fueron sometidos a baño ultrasónico para limpiarlos, antes y después de cada prueba.

Para cuantificar la tasa de desgaste y el coeficiente de desgaste (k), la ecuación de Archard fue utilizada, la cual se define como en la ecuación 1:

$$k = \frac{VH}{F_N d} \quad (1)$$

Capítulo III: Metodología de Investigación.

Donde V es el volumen de desgaste, H es la dureza del material más duro, F_N es la fuerza normal aplicada y d la distancia de deslizamiento. El volumen de desgaste fue calculado con la masa perdida y la densidad del material. Finalmente, la tasa de desgaste se obtuvo multiplicando el coeficiente de desgaste por la fuerza normal aplicada.

Para calcular los diferentes coeficientes de fricción obtenidos en la experimentación se hizo uso de la siguiente expresión:

$$\mu = \frac{F_T}{F_N} \quad (2)$$

Donde F_T corresponde a la fuerza tangencial y F_N a la fuerza normal.

2.2. Parámetros de remoción de material

Los parámetros básicos de reperfilado incluyen la velocidad de giro la rueda (v_s), velocidad de avance de la máquina reperfiladora (v_w), profundidad de corte (a_e), y el diámetro equivalente de la piedra de esmerilado (d_e).

Estos parámetros fueron establecidos en la tabla 6 para cada textura. Después, para comparar las características de cada textura y su eficiencia, otros parámetros fueron calculados por las siguientes ecuaciones [116]:

Tasa de remoción

$$Q = b_w a_e v_w \quad (2)$$

Tasa específica de remoción

$$Q_w = a_e v_w \quad (3)$$

Volumen de material removido

$$V_w = b_w a_e L_w \quad (4)$$

Espesor equivalente de viruta

$$h_{eq} = a_e \frac{v_w}{v_s} \quad (5)$$

Los resultados obtenidos de los diferentes parámetros de esmerilado para cada textura, son presentados en la tabla 10.

Capítulo III: Metodología de Investigación.

Tabla 10 Parámetros de esmerilado para cada textura superficial.

Textura	Tasa de remoción (mm ³ /s)	Tasa específica de remoción (mm ² /s)	Volumen de material removido (mm ³)	Espesor equivalente de viruta (mm)
1	1620	24.9	12675	2.71745E-03
2	3250	50	12675	5.45455E-03
3	1620	24.9	25350	2.71745E-03
4	3250	50	25350	5.45455E-03
5	1620	24.9	38025	2.71745E-03
6	3250	50	38025	5.45455E-03
7	3240	49.8	25350	5.4349E-03
8	6500	100	24463	1.09091E-02
9	4855	74.7	38025	8.15235E-03
10	9750	150	38025	1.63636E-02

De acuerdo con los resultados de la tabla 10, y los parámetros de reperfilado establecidos en la tabla 9, se puede observar que a medida que aumenta la velocidad de trabajo aumenta la tasa de remoción y la tasa específica de remoción de material. Además, se puede observar que al aumentar la profundidad de corte y la velocidad de trabajo tiende a aumentar el espesor equivalente de viruta.

Capítulo III: Resultados

3.1. Evaluación de la rugosidad

Los parámetros de rugosidad se pueden observar en la tabla 11. Cada topografía superficial se evaluó tres veces para obtener valores confiables. Las texturas superficiales se ordenaron de la más suave a la más rugosa según los valores obtenidos de la perfilometría.

Tabla 11 Parámetros de rugosidad

Texturas	Ra	Rq	Rp	Rt	Rv	Rz	Ssk	Sku
7	3.87±0.18	4.56±0.19	11.67±0.55	23.27±1.35	-11.6±0.84	22.2±0.97	-0.51±0.21	4.28±1.47
3	3.96±0.33	4.8±0.39	13.19±0.81	26.56±2.03	-13.37±1.24	24.99±1.32	-0.32±0.33	4.05±0.16
5	4.07±0.02	4.95±0.03	14±0.42	29.26±4.45	-15.25±4.4	27.45±3.46	-0.68±1.43	15.87±7.94
1	4.08±0.08	5.01±0.09	13.95±0.51	29.08±1.17	-15.13±1.33	27.83±0.82	-0.30±0.11	2.823±0.08
8	4.21±0.08	5.11±0.1	14.45±0.11	30.57±0.36	-16.11±0.28	27.88±0.9	-1.65±0.14	4.4±0.63
4	4.39±0.25	5.45±0.3	13.92±0.55	32.46±1.85	-18.54±1.93	31.05±1.6	-1.05±0.16	2.84±0.42
6	4.42±0.1	5.39±0.11	14.11±0.46	29.34±0.98	-15.23±0.61	28.03±0.71	-0.56±0.42	2.49±0.8
9	4.62±0.28	5.62±0.28	13.35±0.5	29.37±1.04	-16.01±0.6	28.39±0.8	-0.73±0.2	2.65±0.06
2	5.11±0.06	6.31±0.06	12.75±3	42.10±5.1	-29.35±7.9	40.24±6.36	-0.74±0.25	3.47±1.68
10	7.22±1.02	8.94±0.97	17.34±1.41	46.02±1.06	-28.68±0.36	44.85±1.24	-1.1±0.4	3.12±0.91

De la tabla 11, y correlacionando con los parámetros de reperfilado establecidos en la tabla 6, se puede observar que a medida que aumenta la velocidad de trabajo, aumenta gradualmente el ancho de los valles en la superficie de los discos y, en consecuencia, también aumenta la rugosidad de la superficie. Además, el daño térmico es mayor debido al tiempo de exposición del esmerilado, lo cual puede ser detectado con una simple inspección visual.

Por otro lado, las micrografías correspondientes a las texturas generadas se muestran en la figura 36. Las texturas cambiaron de una superficie lisa con menor separación entre valle y valle para la operación de reperfilado con mayor velocidad de avance, contrario a las texturas generadas con menor velocidad de avance, donde la distancia entre valle y valle aumenta. Es importante mencionar que las texturas fueron acomodadas de la menos rugosa a la más rugosa de acuerdo con los valores obtenidos por el perfilómetro óptico.

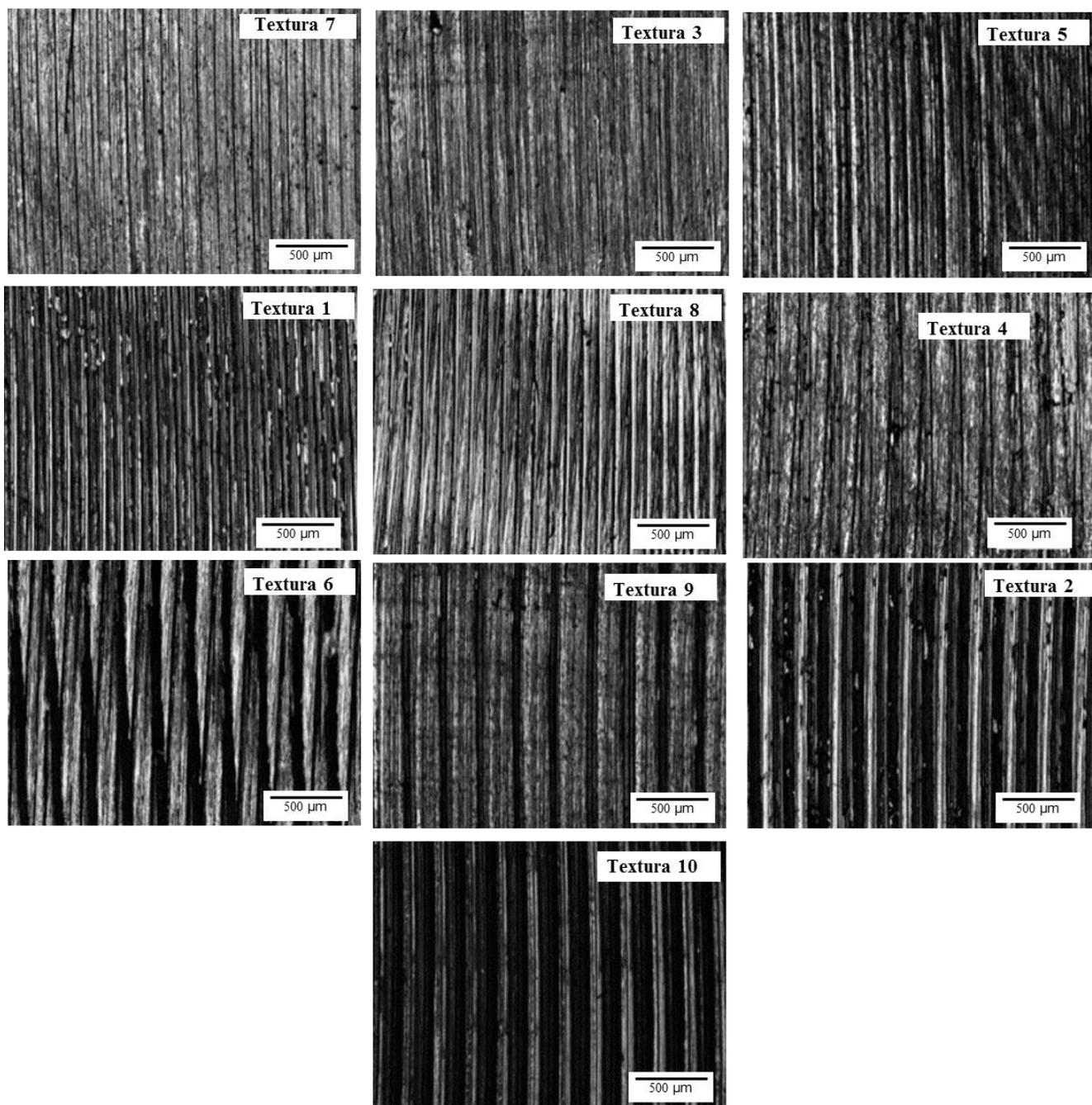


Fig. 36 Micrografías de texturas obtenidas después del proceso de reperfilado.

Capítulo III: Resultados.

En la figura 37 se muestra la topografía de las diferentes texturas, observando más a detalle los valles formados debido al desbaste con la piedra abrasiva.

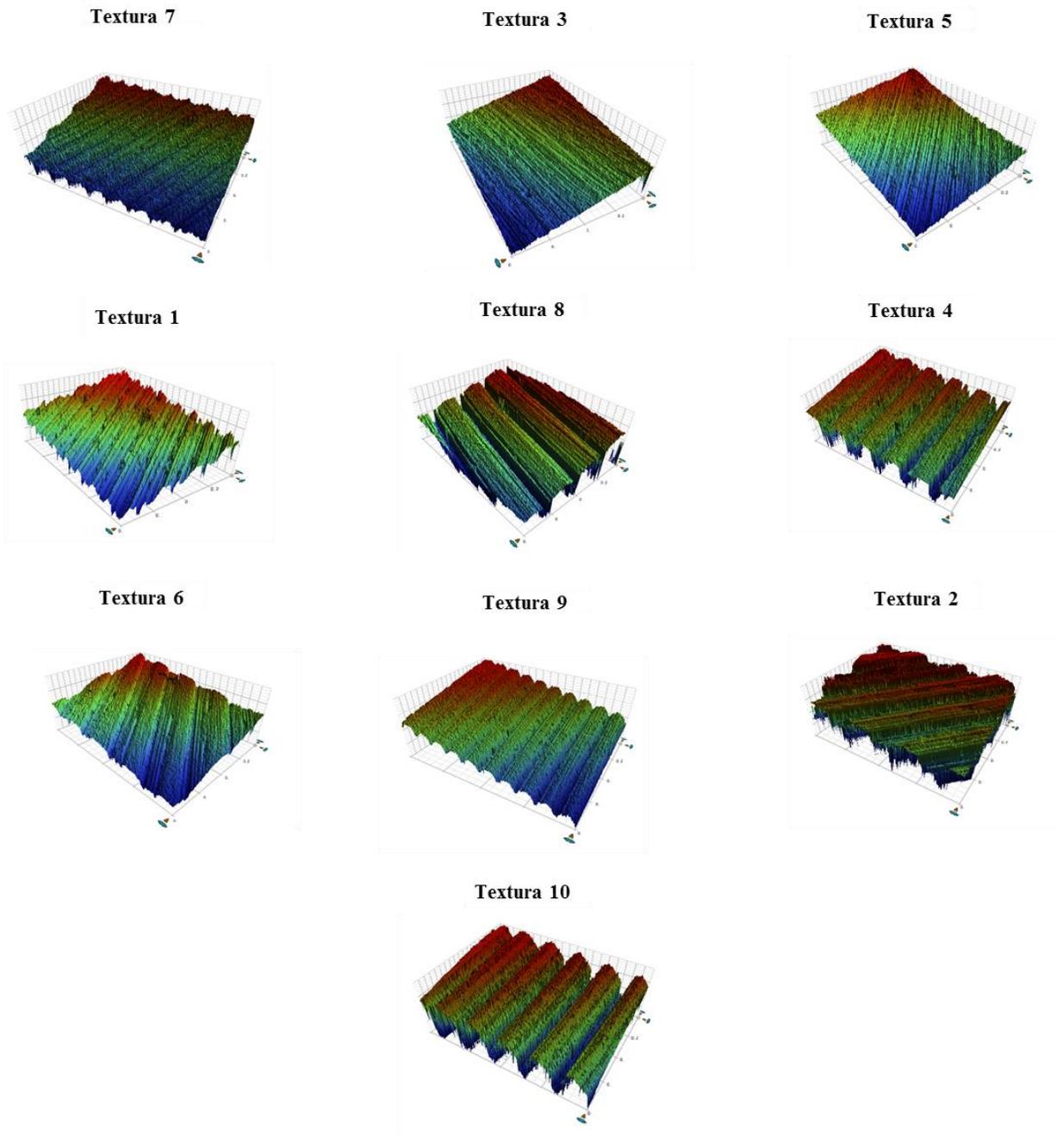


Fig. 37 Topografía de las diferentes texturas obtenidas en el reperfilado de discos.

3.2. Evaluación del running-in en condición seca.

Las huellas de desgaste de los discos después de las pruebas en condición seca se muestran en la fig. 38, se puede observar un mayor daño y una huella de desgaste más amplia para la textura 10, que es la textura con los valores más altos de los parámetros de rugosidad.

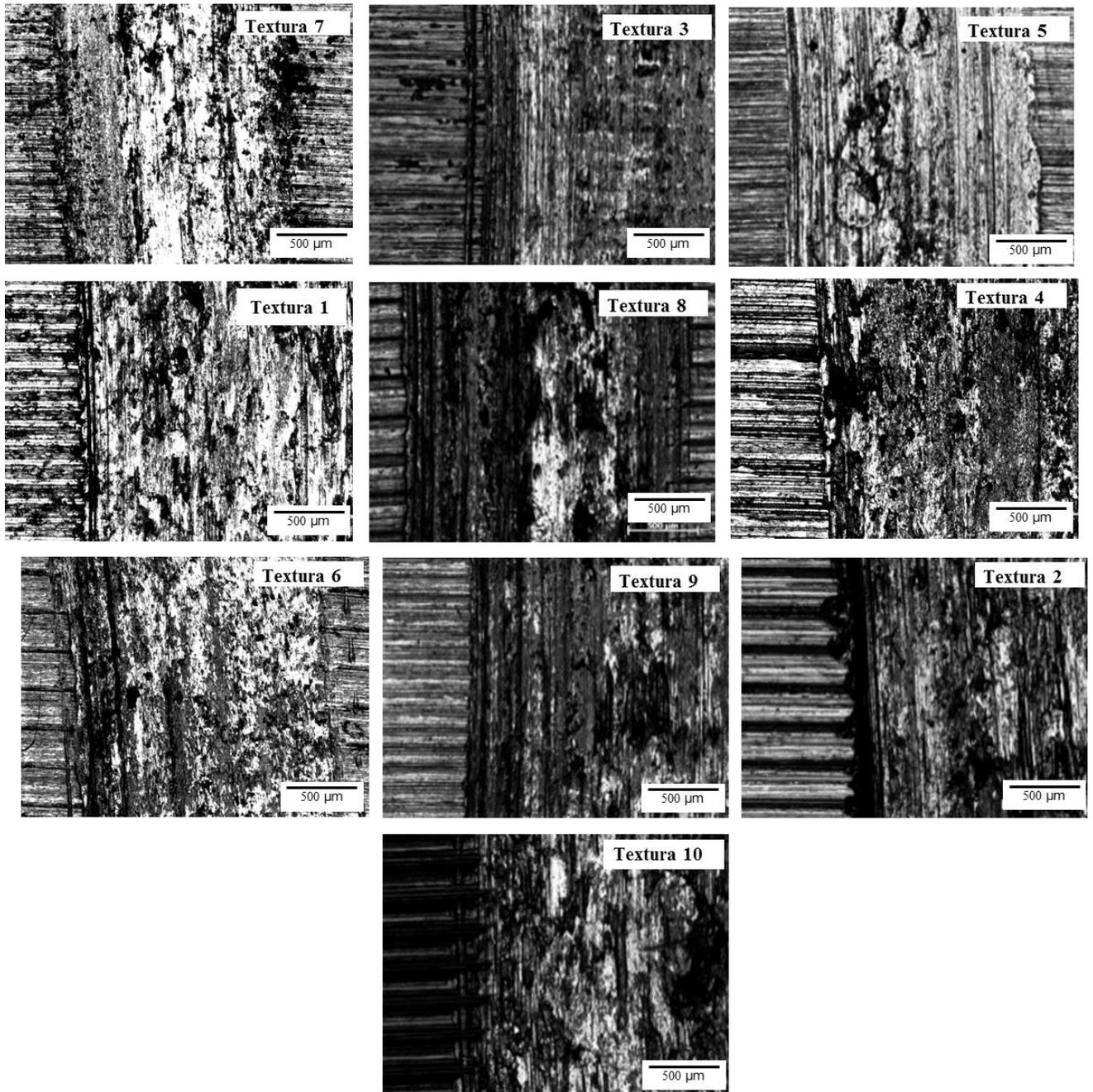


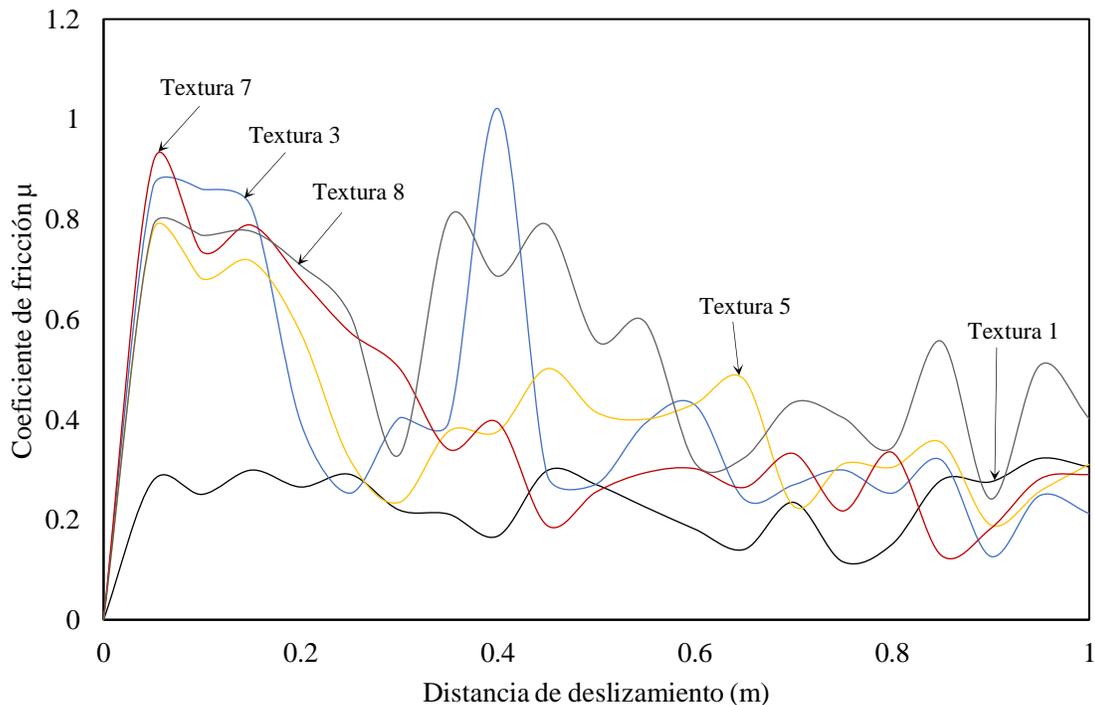
Fig. 38 Huella de desgaste en discos, condición seca.

Capítulo III: Resultados.

El running-in de las cinco texturas menos rugosas se muestra en la figura 39a, mientras que el running-in de las cinco texturas más rugosas restantes se muestra en la figura 39b. Se puede observar que las superficies más lisas presentaron un running-in más estable (ver fig. 39a) que las texturas más rugosas que presentaron un running-in con más fluctuaciones (ver fig. 39b). Además, las texturas proporcionaron un coeficiente de fricción relativamente bajo, ya que 0.6 es un valor típico para un contacto seco metal-metal.

La figura 39c muestra la tasa de desgaste de pernos desgastados después de una distancia de deslizamiento de 100 m en condiciones secas. Se puede observar que el perno ensayado para la textura 10 es el de mayor tasa de desgaste y el perno utilizado para la textura 3 es el de menor tasa de desgaste. Es evidente que la rugosidad superficial y la textura tienen una fuerte influencia en la tasa de desgaste en condiciones secas, por otro lado, es interesante que la textura 7 y la textura 5 presentaron una tasa de desgaste relativamente alta. Los resultados mostraron el comportamiento típico de las superficies más rugosas, en donde se producen coeficientes de fricción y tasas de desgaste más altos en condiciones secas, como se observó y probó en trabajos anteriores [214].

a)



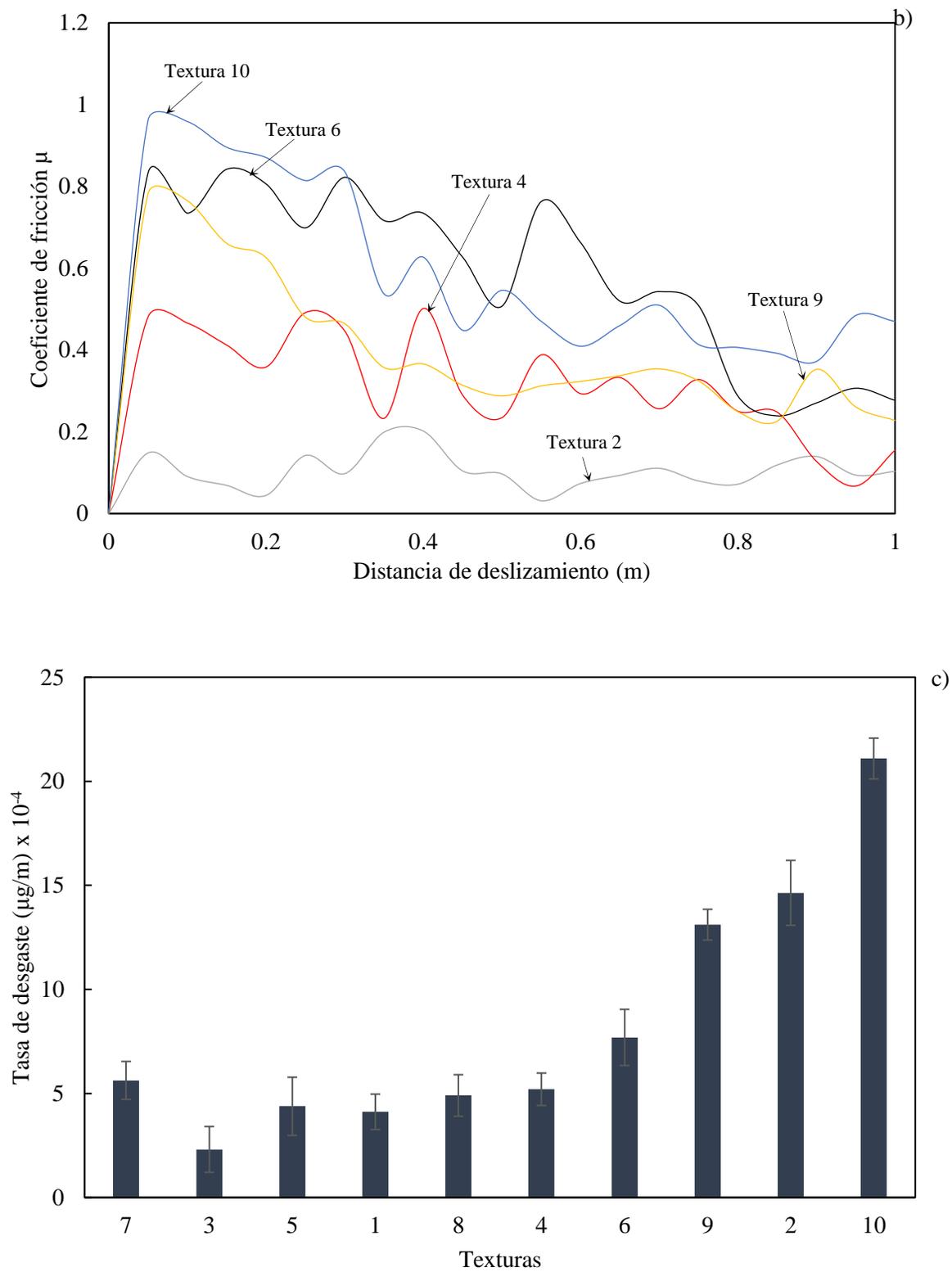


Fig. 39 Proceso de running- in en condición seca para a) superficies menos rugosas b) superficies más rugosas c) tasa de desgaste de los pernos después de las pruebas en condición seca.

Capítulo III: Resultados.

3.2.1. Pernos en condición seca

La figura 40 muestra todas las huellas de desgaste de los pernos probados en condición seca. El daño es notorio, dando mecanismos de desgaste como deformación plástica, picaduras y grooving.

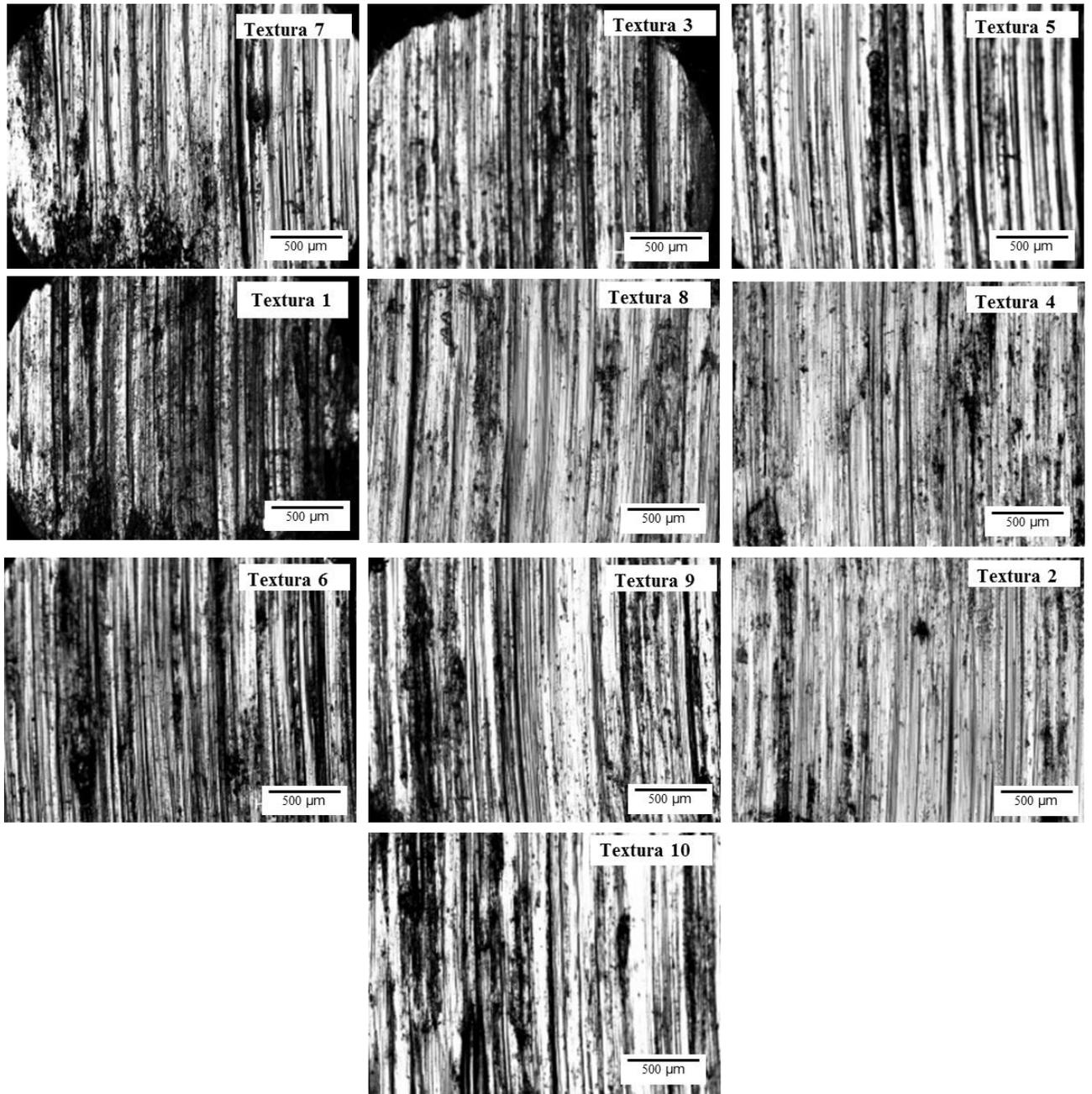


Fig. 40 Huellas de desgaste en pernos después de pruebas en condición seca.

3.3. Evaluación del proceso de running-in en condiciones lubricadas

La figura 41 muestra la huella de desgaste y la presencia de grasa lubricante para las diferentes texturas ensayadas.

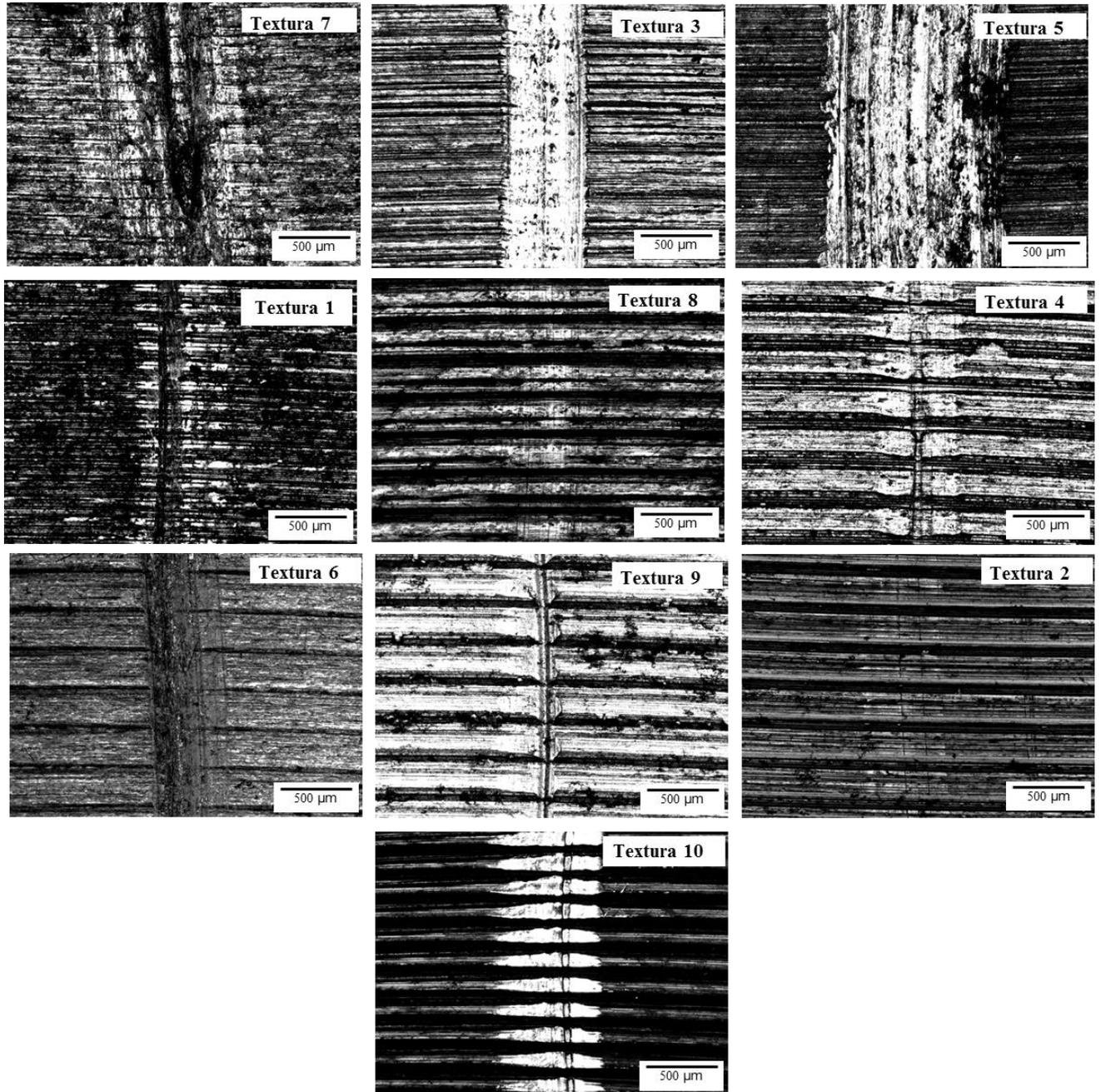


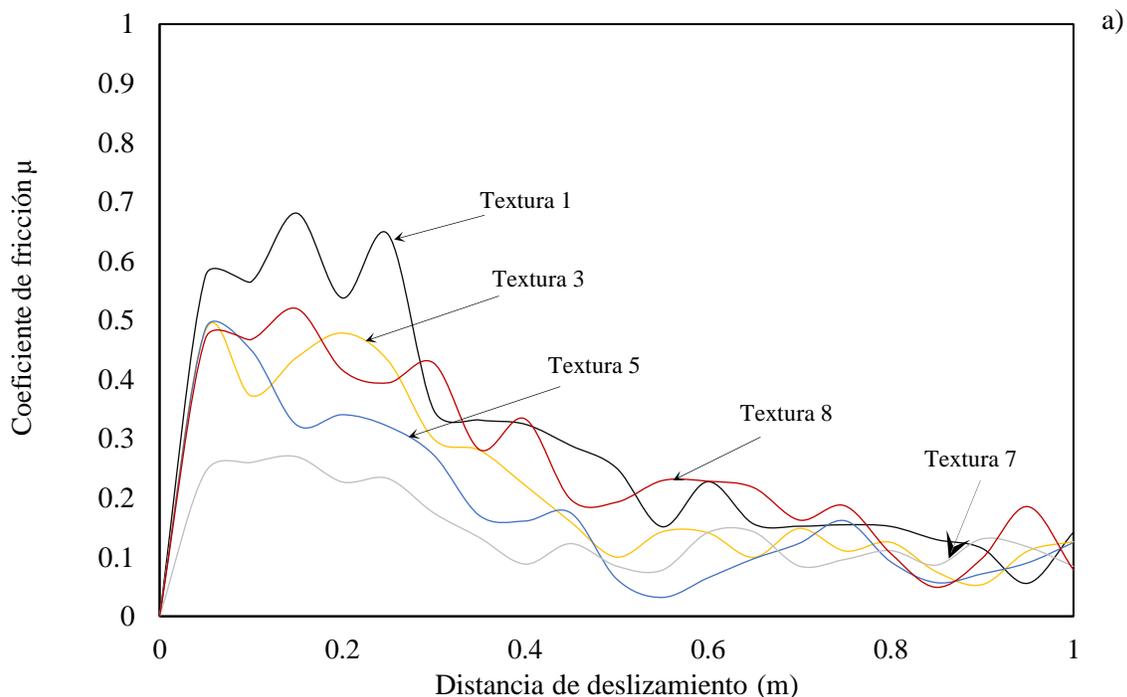
Fig. 41 Huella de desgaste en discos después de las pruebas con grasa lubricante.

El running-in de las texturas con superficies menos rugosas se muestra en la figura 42a, mientras que las texturas más rugosas se muestran en la figura 42b. Los resultados mostraron

Capítulo III: Resultados.

que casi todas las superficies más rugosas producen un coeficiente de fricción más bajo. Sin embargo, la textura con el coeficiente de fricción más bajo es la textura 8. Las texturas 9 y 10 son más rugosas que la textura 8, lo que significa que, si la rugosidad de la superficie es demasiado alta, no necesariamente la fricción debe ser baja. Los resultados destacaron la importancia del procedimiento de reperfilado preventivo ya que la textura 8 corresponde a un procedimiento de este tipo.

Además, en la figura 42c, se puede observar la tasa de desgaste de los pernos ensayados en condiciones lubricadas para las diferentes texturas, donde se obtuvo una menor tasa de desgaste para las texturas con alta velocidad de avance, estas texturas también presentaron mayores valores de rugosidad y valles más anchos en las asperezas. La mayoría de las texturas ayudaron a mantener un bajo coeficiente de fricción por un largo período, excepto las texturas 5 y 7. Por otro lado, las tasas de desgaste mostraron una tendencia de alta tasa de desgaste para las texturas con bajos valores de rugosidad, incluso para las texturas con múltiples pasadas de la rueda abrasiva.



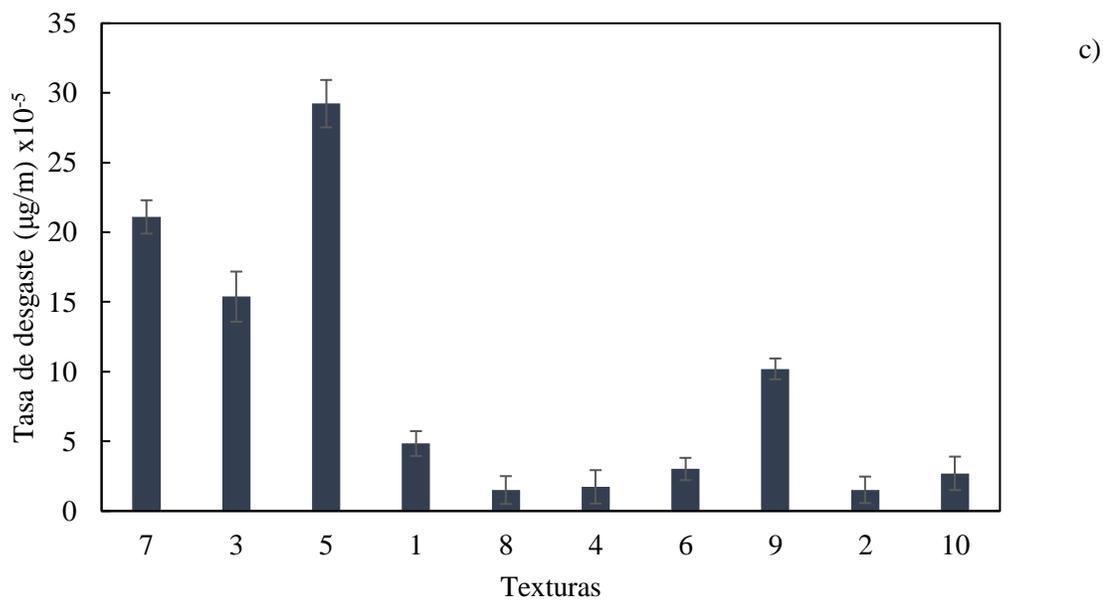
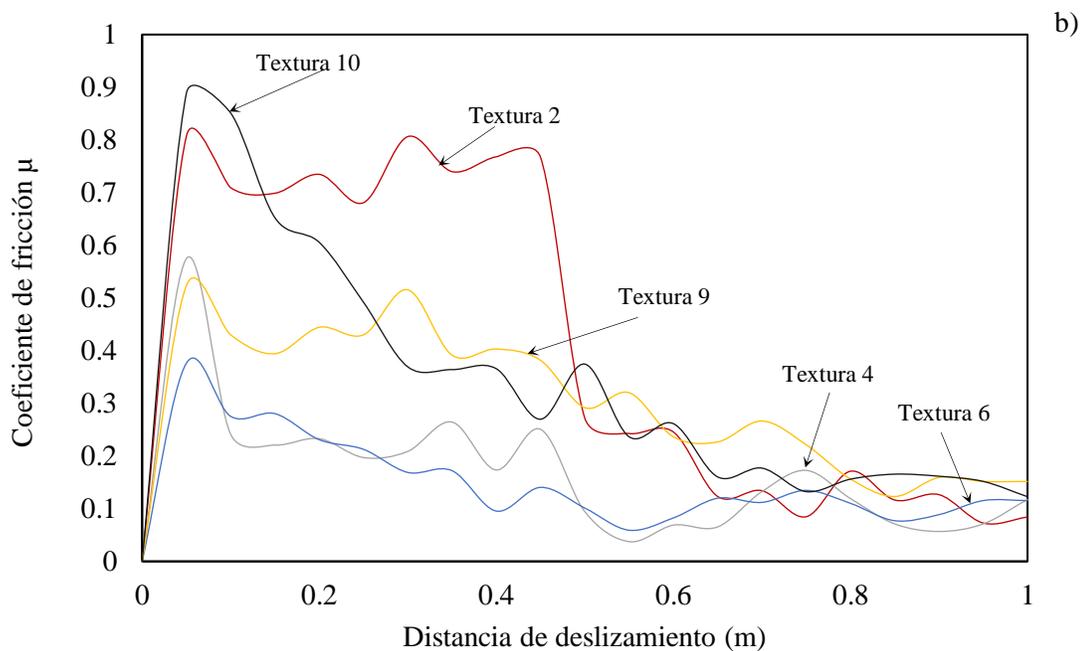


Fig. 42 Proceso de running-in en condición lubricada para a) superficies menos rugosas b) superficies más rugosas c) tasa de desgaste de los pernos después de las pruebas en condición lubricada.

Capítulo III: Resultados.

3.3.1. Pernos en condición lubricada

Las huellas de desgaste presentadas en los pernos utilizados en las pruebas en condición lubricada son mostradas en la figura 43. El lubricante en conjunto con las texturas ayuda a reducir considerablemente el desgaste en los pernos comparado con las pruebas en condición seca.

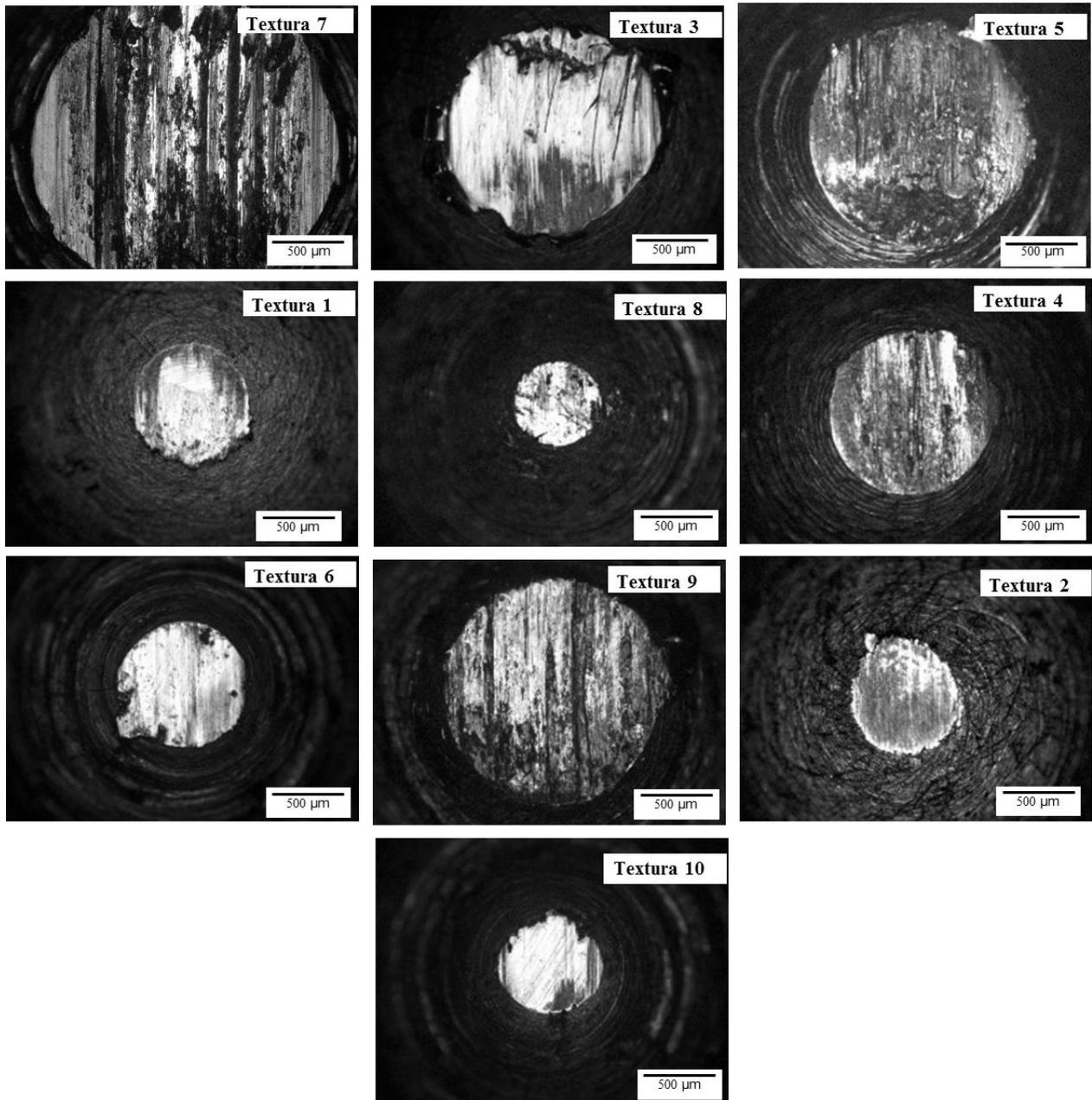
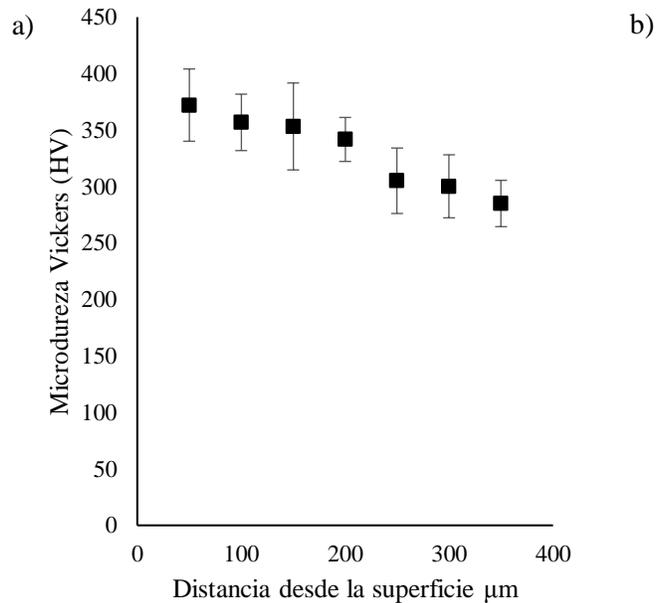
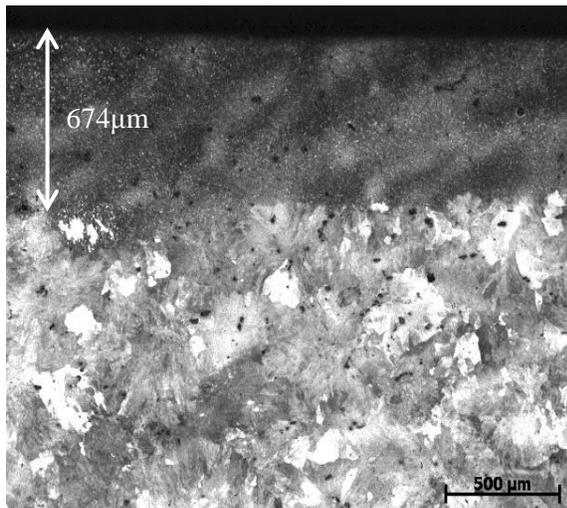


Fig. 43 Huellas de desgaste en los pernos después de las pruebas en condición lubricada.

3.4. Evaluación microestructural

Se obtuvo un corte de la sección transversal de los discos y se observó la microestructura (ver fig. 44a, 44c y 44e). Después de un ataque químico con Nital, se puede observar la formación de una capa en la textura 5 que corresponde a una capa marrón debido a su apariencia y al valor de dureza que no es más duro que un valor de dureza típico reportado de una capa blanca. Por otro lado, en la textura 7 se presentó una combinación de una capa blanca y una capa marrón con valores de dureza menores. Las capas se formaron debido a los esfuerzos y la alta temperatura generada en el contacto durante el proceso de reperfilado y el rápido enfriamiento debido a la baja velocidad de trabajo, lo cual provocó quemaduras en el metal. Estas capas no son deseables para la superficie del riel, ya que promueven grietas por la acción de fatiga por contacto de rodadura. En las figuras 44b y 44d se observa el aumento de dureza desde la superficie hacia el bulk del material. La capa es particularmente ancha para la textura 7. El resto de las texturas presentaron la típica microestructura perlítica.



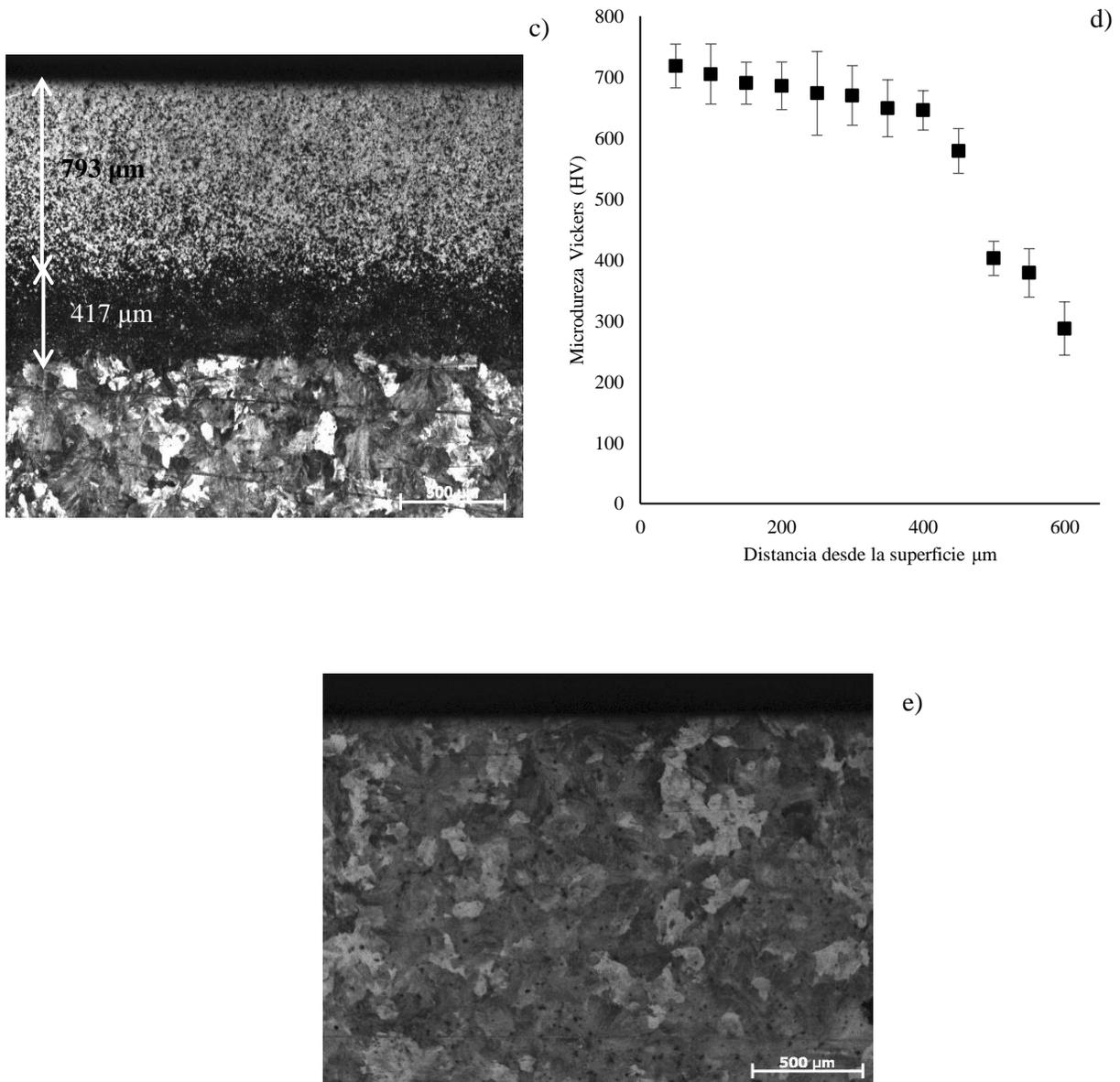


Fig. 44 a) Microestructura de textura 5, b) perfil de dureza correspondiente a textura 5, c) microestructura de textura 7, d) perfil de dureza de textura 7, e) microestructura completamente perlítica correspondiente al resto de texturas generadas.

Capítulo IV: Discusión de resultados

Durante el proceso de running-in en condición seca, se observó que el coeficiente de fricción y la tasa de desgaste fueron altos al principio de este proceso, sin embargo, a medida que las superficies se volvieron menos rugosas y las asperezas más prominentes se aplanaron, el coeficiente de fricción y la tasa de desgaste disminuyeron. Por otro lado, el desgaste depende de que la adhesión y la abrasión operen simultáneamente. Por el contrario, en condiciones lubricadas, el coeficiente de fricción y la tasa de desgaste se mantuvieron bajos y constantes durante toda la prueba. Es importante señalar que una vez que se completa el periodo de running-in, se mantiene una tasa de desgaste más baja durante un largo periodo de la vida operativa de los componentes. En el momento en el que este estado estable se termina, tanto el coeficiente de fricción como la tasa de desgaste comienzan a elevarse nuevamente como en la etapa de running-in.

En condiciones secas y lubricadas, las tasas de desgaste y el coeficiente de fricción dependieron de la orientación de las marcas de texturizado generadas en el reperfilado realizadas en las muestras del disco y la dirección del perno con respecto a las texturas generadas. Un perno que se mueve perpendicularmente a las marcas de texturizado proporcionará un coeficiente de fricción y una tasa de desgaste más altos, en comparación con un perno que se mueve paralelo a las marcas de texturizado, donde puede haber un coeficiente de fricción y una tasa de desgaste bajos. En consecuencia, la tasa de desgaste puede verse afectada por la dirección de deslizamiento y el daño por la abrasión generada en el proceso de running-in. Después del periodo de running-in y de la estabilidad, la tasa de desgaste y el coeficiente de fricción pueden aumentar nuevamente, una vez que el tiempo de operación se vuelve lo suficientemente largo para el proceso de fatiga, pudiendo aparecer pérdida de material debido a cargas cíclicas en la superficie.

Las pruebas en condiciones lubricadas se realizaron en el régimen de lubricación a límite. En este régimen el efecto del lubricante depende de los aditivos en lugar del aceite base, por lo que se forma una película protectora superficial entre las asperezas en contacto. Los aditivos están formados por una molécula de cadena larga con un grupo terminal activo, por lo que cuanto mayor sea la longitud de la cadena de la molécula unida, mayor será la distancia entre

Capítulo IV: Discusión de resultados.

las superficies de fricción y, por tanto, el coeficiente de fricción y la tasa de desgaste serán menores. Las superficies más rugosas pueden retener más lubricante en los valles, por lo tanto, hay más lubricante presente en el contacto incluso en pruebas largas, lo que brinda una mejor lubricidad con una capa protectora continua de lubricante.

En superficies con endurecimiento debido a cambios microestructurales, las altas tasas de desgaste y los altos coeficientes de fricción se atribuyen a la incompatibilidad de la superficie con cambio microestructural y las moléculas de los aditivos del lubricante para formar capas adheridas a la superficie.

Los parámetros de remoción de material brindan información sobre la eficiencia y el acabado superficial. Por un lado, la tasa de remoción de material tiene gran relevancia para las fuerzas de la máquina reperfiladora, las deflexiones y el consumo de energía, mientras que la tasa específica de remoción de material es un índice importante para evaluar la eficiencia del reperfilado ya que tiene particular relevancia para las tensiones en los granos abrasivos, la tasa de desgaste abrasivo, así como las temperaturas de contacto de la pieza de trabajo y el daño térmico [116]. Por otro lado, el espesor de viruta equivalente es útil para correlacionar fácilmente los parámetros de rectificado medidos con los parámetros de tasa de remoción de material para un tipo particular de rueda abrasiva.

De acuerdo con Sedlacek [196], los parámetros de rugosidad S_{sk} y S_{ku} son determinantes para una textura superficial con lubricación a límite o mixta, ya que si S_{ku} aumenta en su valor y los parámetros S_{sk} se vuelven más negativos, el coeficiente de fricción tiende a disminuir, esto se debe a que el espacio entre los valles de la textura es más ancho y de poca profundidad. Como se puede ver en condiciones lubricadas, una superficie rugosa significa un alto coeficiente de fricción, que no es el escenario deseado debido a que un alto coeficiente de tracción puede causar un descarrilamiento. Así, una superficie rugosa en estado lubricado no es sinónimo de un buen rendimiento. Por tanto, una textura superficial específica y una lubricación adecuada disminuirán el coeficiente de fricción y también el comportamiento de la tasa de desgaste inicial, lo que afectará el rendimiento de desgaste a largo plazo y la gravedad de los mecanismos de desgaste del período de running-in.

En general, y de acuerdo con los resultados obtenidos, se debe prestar especial atención a un alto coeficiente de fricción, las superficies rugosas, la lubricación deficiente y la calidad del

Capítulo IV: Discusión de resultados.

lubricante para evitar un posible descarrilamiento de los trenes. Sin embargo, los perfiles de las ruedas y los rieles (conicidad equivalente), el radio de la curva, las suspensiones, el índice de dureza, la velocidad del tren, entre otros, también pueden contribuir al descarrilamiento del tren.

Conclusiones

- ✓ De acuerdo con los resultados obtenidos, en condición seca, las superficies más rugosas produjeron altos valores de coeficientes de fricción, así como altas tasas de desgaste.
- ✓ Por otro lado, en condiciones lubricadas, el lubricante no garantiza un bajo coeficiente de fricción debido a la textura de la superficie.
- ✓ Las superficies más rugosas produjeron un alto coeficiente de fricción estática incluso en condiciones lubricadas.
- ✓ El múltiple paso de ruedas abrasivas a baja velocidad de trabajo produjo altas temperaturas y cambios microestructurales en las superficies de los discos (capa blanca y capa marrón).
- ✓ En general, los resultados revelan que el proceso de running-in en un contacto con total deslizamiento depende del coeficiente de fricción, el aplanamiento de asperezas, la deformación de la superficie y el valor de la tasa de desgaste.

Anexos

Anexo A: Ecuaciones de contacto mecánico de Hertz para un contacto esfera-plano.

Radio reducido

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_y}$$

Donde:

$R' = \text{radio reducido, m}$

$R_x = \text{radio en x, m}$

$R_y = \text{radio en y, m}$

Módulo reducido

$$\frac{1}{E^*} = \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)$$

Donde:

$E^* = \text{módulo de elasticidad reducido, Pa}$

$\nu_1 = \text{relación de Poisson material 1}$

$\nu_2 = \text{relación de Poisson material 2}$

$E_1 = \text{módulo de elasticidad material 1, Pa}$

$E_2 = \text{módulo de elasticidad material 2, Pa}$

Área de contacto

$$a = \sqrt[3]{\frac{3PR'}{4E^*}}$$

Presión de contacto

$$P_0 = \frac{3P}{2\pi a^2}$$

Donde:

Anexos

$P =$ fuerza aplicada, N

$E^* =$ módulo de elasticidad reducido, Pa

$R' =$ radio reducido, m

$P_0 =$ presión de contacto, Pa

Anexos

Anexo B: Área de contacto real, modelo de Greenwood – Williamson.

Módulo reducido

$$\frac{1}{E^*} = \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)$$

Donde:

E^* = módulo de elasticidad reducido, Pa

ν_1 = relación de Poisson material 1

ν_2 = relación de Poisson material 2

E_1 = módulo de elasticidad material 1, Pa

E_2 = módulo de elasticidad material 2, Pa

Índice de plasticidad

$$\psi = \left(\frac{\sigma}{R} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{E^*}{H} \right)$$

Donde:

ψ = índice de plasticidad

σ = Rq , rugosidad media cuadrática (m)

R = radio de asperezas (m)

H = dureza del material involucrado en el contacto

Si $\psi \geq 1$ la deformación es predominantemente plástica

Si $\psi < 0.6$ la deformación de contacto es elástica

Área real de contacto

$$A_r = \left(\frac{\pi R}{\sigma} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{L}{E^*} \right)$$

Donde:

A_r = área real de contacto estimada (m^2)

Anexos

$L = \text{Carga normal aplicada (N)}$

Presión media

$$P_m = \frac{L}{A_r}$$

Donde:

$P_m = \text{presión media (Pa)}$

Número de asperezas en contacto

$$n = \frac{L}{\left(\pi^{\frac{1}{2}}\right) (E^*) \left(\sigma^{\frac{3}{2}}\right) \left(R^{\frac{1}{2}}\right)}$$

Donde:

$n = \text{número de asperezas en contacto}$

Anexos

Anexo C: Ecuación de Archard para cálculo de la tasa y coeficiente de desgaste

La Tasa de desgaste (Q) está dada por la ecuación:

$$Q = \frac{V}{L}$$

Donde:

$Q =$ *Tasa de desgaste*

$V =$ *volumen perdido*

$L =$ *Distancia total de deslizamiento*

El coeficiente de desgaste (K) está dado por la expresión:

$$K = \frac{Q}{W}$$

Donde:

$K =$ *coeficiente de desgaste*

$W =$ *carga normal aplicada*

$Q =$ *tasa de desgaste*

Anexos

Anexo D Ecuaciones de esmerilado (Grinding parameters)

Profundidad de corte

$$a_p = \frac{\pi d_\omega v_f}{v_\omega}$$

Donde:

a_p = Profundidad de corte (Depth of cut)

d_ω = Diámetro de la pieza de trabajo (Workpiece diameter)

v_f = Tasa de alimentación (Infeed rate)

v_ω = Velocidad de avance (Work speed)

Espesor de viruta equivalente

$$h_{eq} = a_e \frac{v_\omega}{v_s}$$

$$h_{eq} = C v_{cu}$$

Donde:

h_{eq} = Espesor de viruta equivalente (equivalent chip thickness) m

v_s = Velocidad de la rueda de esmeril (Wheel speed) m/s

v_{cu} = Volumen medio de viruta (Mean chip volume)

C = Número de granos activos por unidad de área (Number of active grains per unit area)

Tasa de remoción de material

$$Q = b_w a_e v_\omega$$

$$Q = b_w l_c v_\omega$$

Anexos

Donde:

Q = Tasa de remoción (Removal rate)

b_w = Ancho del contacto de reperfilado (Grinding contact width)

l_c = Longitud de contacto de la piedra con la pieza de trabajo (Contact length)

Tasa de remoción específica

$$Q' = a_e v_\omega$$

$$Q' = l_c v_\omega$$

$$Q' = h_{eq} v_s$$

$$Q' = C v_{cu}$$

Donde:

Q' = Tasa de remoción de material (Specific removal rate)

Área de contacto de esmerilado

$$A_c = b_w l_c$$

Donde:

A_c = Área de contacto de esmerilado (Grinding contact area)

Energía específica de esmerilado

$$e_c = \frac{P}{Q}$$

$$e_c = \frac{F_t V}{v_\omega b_w a_e}$$

$$e_c = \frac{F_t v_s}{v_\omega a_e}$$

Anexos

Donde:

e_c =Energía específica de esmerilado (Specific grinding energy)

P = Potencia de esmerilado (Grinding power)

F_t = Fuerza tangencial (Tangential force)

Potencia de esmerilado

$$P = F_t v_s$$

$$P = e_c Q' b_w$$

Fuerza tangencial

$$F_t = \frac{P}{v_s}$$

$$F_t = \frac{e_c Q' b_w}{v_s}$$

Donde:

F_t = Fuerza tangencial (Tangential force)

Relación de fuerza de esmerilado (Grinding force ratio)

$$\mu = \frac{F_t}{F_n}$$

Donde:

μ = Relación de fuerza de esmerilado (Grinding force ratio)

F_n = Fuerza normal (Normal force)

Diámetro de grano

Anexos

$$d_g(mm) = \frac{15.2}{M}$$

$$d_g(in) = \frac{0.6}{M}$$

Donde:

d_g = Diámetro de grano (Grit diameter, approx grain diameter)

M = Número de mallado (Mesh number)

Numero de granos activos efectivos por unidad de área

$$C = \frac{1}{LB}$$

$$C = \frac{1}{2.25d_g^2}$$

$$C = \frac{1}{L'^2}$$

C = Number of active grains per unit area

L = Average spacing of the grits

B = Measurement band width

d_g = Average grain diameter

L' = Mean cutting edge spacing measured



Influence of surface roughness and contact temperature on the performance of a railway lubricant grease



Irvin A. Vásquez-Chacón^a, Ezequiel A. Gallardo-Hernández^{a,*}, Marisa Moreno-Ríos^b, Manuel Vite-Torres^a

^a Instituto Politécnico Nacional, SEP-CONA, Grupo de Tribología, U.P. Adolfo López Mateos, Ciudad de México, 07730

^b CONATEC/Instituto Tecnológico de Puebla, Carretera México-Puebla, Km. 87.5, C.P. 42080, Col. Venustiano Carranza, Puebla de Zaragoza, México

ARTICLE INFO

Article history:

Received 31 August 2020

Received in revised form 4 November 2020

Accepted 13 November 2020

Available online 18 November 2020

Keywords:

Lubrication

Friction

Pin-on-disc

Roughness

Temperature

ABSTRACT

An adequate railway lubrication strategy is an important maintenance procedure that leads to decrease friction and wear extending the service life of the wheel and rail materials, improving the wheel-rail contact, avoiding energy losses and therefore, decreasing costs. On the other hand, poor lubrication practices lead to losses instead of savings. Moreover, there are many commercial railway lubricants, but there are not proper methodologies to test their performance under different contact conditions.

This work aims to evaluate the effect of roughness and temperature on the friction coefficient of E88 wheel and 115E2 rail materials by applying different amounts of railway lubricant grease using a pin-on-disc tribometer and simulating a wheel-flange and rail-gauge contact process. For a well-lubricated contact, the results reveal that for the same contact pressure and sliding velocity, rougher surfaces yield a lower friction coefficient.

© 2020 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Lubrication is an important way to reduce wear and enhance friction in a wheel-rail contact if it is properly applied [1]. Also, problems with lubrication are varied, including the kind of lubricant, mechanism of application, the calibration of the application area, the selection of lubricant, the amount of lubricant, the wheel-rail geometry, the operating temperatures at the wheel and rail contact, the surface roughness, the rheological lubricant characteristics and the environmental conditions [2].

The amount of lubricant is important due to enough amount must be applied to ensure a good lubricant performance and also to reduce the train power consumption [3]. Nevertheless, an over-lubrication causes migration of lubricant to the top of the rail, which may cause wheel skid with the rail and wear due to the application of a friction modifier to manage traction and train braking operations [4].

The American Railway Engineering and Maintenance of Way Association [5] recommends an optimal range of friction coefficient for wheel flange and rail gauge contact between 0.2 and 0.35 to control wear, improve wheel-rail contact and noise control. However, this value depends on railway characteristics as axle

load. Additionally, the temperature reached for a wheel-rail contact has a strong influence on lubrication performance and therefore on friction coefficient.

Researchers have indicated the influence of lubricant type, flow rate and frequency of lubrication on the improve of friction coefficient [6–9]. This research aims to evaluate friction coefficient behavior by applying different amount of lubricant under different test conditions.

2. Material and methods

2.1. Test equipment

Experimental work was performed by using a pin-on-disc tribometer to simulate the slip saturation value reached at wheel flange-rail gauge contact. A contact pressure of 2500 MPa and the sliding velocity of 0.8 m/s were chosen according to the work done by Lewis and Olofsson [10], which are data values collected for a typical wheel flange-rail gauge contact that represent a critical contact conditions in track curves. The sliding distance of 300 m was selected to simulate a curve length track. Also, two temperatures were selected, room temperature 25 °C and 115 °C are according to the contact temperature value reached at the transition from a straight line to curve [11]. The higher temperature reached via electric resistance heating inserted inside the pin was controlled by a mechanical relay and a pyrometer. The series

* Corresponding author.

E-mail address: egallardo@ipn.mx (E.A. Gallardo-Hernández).



A pin-on-disk wear map of rail and wheel materials from different standards

Dairo H. Mesa O.^a, Irvin Alari Vázquez-Chacón^b, Mario Alberto Gómez-Guameros^b,
Pedro Sánchez-Tizapantzi^b, Ezequiel Alberto Gallardo-Hernández^{b,*}

^a Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia

^b Instituto Politécnico Nacional, SEP-ESIME Zacatecas, Grupo de Tribología, Col. Zacatecas, Ciudad de México, C. P. 07730, México

ARTICLE INFO

Keywords:
Wear map
Wear rate
Pin on disk

ABSTRACT

Wheel and rail materials are exposed to a large number of factors that affect their wear-resistant performance such as, large contact pressures, sliding speeds, high temperatures, material degradation by natural and artificial contaminants, etc. This directly affects the maintenance operations, so, an accurate wear prediction is required. Wear maps are an important tool to predict and identify wear regimes that impact maintenance schedules and consequently cost reduction.

This work aimed to develop wear maps for a 115RE rail material and an ERS wheel material, which are materials used in railways systems in Mexico, as well as identify the wear regimes and wear mechanisms replicating the wheel-rail interface conditions.

Metallographic analysis and hardness tests were carried out for both materials. Wear tests were carried out by using a pin-on-disk tribometer. The resulting wear maps showed that a catastrophic wear regime occurs at medium sliding speed and low contact pressure values for the wheel. On the other hand, for rail, catastrophic wear regime occurs at high sliding speed and low contact pressure values.

1. Introduction

A simple analysis of the wear rate is not enough to reach a deep understanding of the wear phenomena. Other approaches as wear maps construction have helped to understand the wear behavior materials under a wide variety of conditions. Table 1.

Extensive research has been done on wheel/rail wear maps construction both in laboratory with pin-on-disk and twin disk testers, as well as full-scale conditions. Remarkable researches have been focused on the study of the influence of the slip ratio [1–2], contact pressure [3–4] and sliding speed as well as the presence of third bodies at the contact zone [5].

Wear maps are commonly divided into three wear zones denominated as mild, severe and catastrophic [6,7]. The transition between each wear regime depends on the contact conditions which then dictate the wear rate [6,7].

The mild regime is mainly presented at wheel tread/ railhead contact and featured by a smooth surface with minimal plastic deformation and oxide wear debris. Moreover, severe and catastrophic regimes are

presented at wheel flange/rail gauge contact conditions. They are mainly characterized by cracking and loss of material by spalling [6,7].

However, the development of wear maps has factors that need to be considered for a specific range of conditions for each case as geographic location, environmental conditions and the specific pair of materials, which needs to be evaluated as a particular situation. In this work, wear maps were developed for ERS wheel and 115RE rail configuration looking at demonstrating that rail material suffers lower wear than wheel material under wheel tread/railhead and wheel flange/rail gauge contact conditions.

2. Materials and methods

An unworn 115RE rail and ERS wheel were tested. The chemical composition of 115RE rail is Fe(97.5%), C(0.805%), Mn(1.09%), Si(0.508%), Cr(0.023%), P(0.007%), S(0.066%), Cu(0.025%), Mo(0.01%), Nb(0.002%). The chemical composition of the ERS wheel is Fe(97.1%), C(0.56%), Si(0.40%), Mn(0.80%), P(0.020%), S(0.015%), Cr(0.30%), Cu(0.30%), Mo(0.08%), Ni(0.30%), V(0.06%). The chemical

* Corresponding author.

E-mail address: egallardo@ipn.mx (E.A. Gallardo-Hernández).

<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.131021>

Received 24 June 2021; Received in revised form 10 September 2021; Accepted 2 October 2021

Available online 6 October 2021

0167-577X/© 2021 Elsevier B.V. All rights reserved.





Instituto Politécnico Nacional
Dirección de Servicios Empresariales y
Transferencia Tecnológica



Folio
DSETT.D/CSI/1172/2022

2022, Año de Ricardo Flores Magón
100 Aniversario de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura
50 Aniversario de la UPACSA
50 Aniversario del CECyT 10 "Carlos Vallejo Márquez"
25 Aniversario del CIECAS, CITEC y del CIDR, Unidad Sinaloa

Asunto
Constancia de participación de
proyectos vinculados

Ciudad de México, 08 de julio de 2022.

Dr. Itzama López Yáñez
Director del Centro de Innovación y Desarrollo
Tecnológico en Cómputo
PRESENTE

CONSTANCIA

A QUIEN CORRESPONDA:

Sea éste el medio para validar como actividad de vinculación concluida a satisfacción de la empresa Ferrocarril Mexicano, S.A. de C.V., la realización del servicio denominado **"Simulación en la elaboración y en campo de la resistencia al deslizamiento y coeficiente de fricción de grasas aplicadas en sistemas ferroviarios"**, convenio de colaboración desarrollado por el Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico en Cómputo del Instituto Politécnico Nacional (IPN), durante el periodo del **16 de febrero de 2022 al 24 de junio de 2022**.

Lo anterior de acuerdo con la documentación presentada y la participación como se indica a continuación.

<i>C. Ezequiel Alberto Gallardo Hernández</i>	<i>Coordinador Técnico</i>
<i>C. Ary Shared Rosas Carrillo</i>	<i>Participante</i>
<i>C. Marisa Moreno Ríos</i>	<i>Participante</i>
<i>C. Mario Alberto Gómez Guarneros</i>	<i>Participante</i>
<i>C. José Filiberto Márquez Santiago</i>	<i>Participante</i>
<i>C. Irvin Alarí Vásquez Chacón</i>	<i>Participante</i>
<i>C. Adrián Fuentes Vetán</i>	<i>Participante</i>

 1/2

Unidad Profesional "Adolfo López Mateos", Edificio "Adolfo Ruiz Cortés"
Av. Wilfredo Massieu S/N, Col. Zacatenco, Alcaldía Gustavo A. Madero, C.P. 07758, Ciudad de México
Consultar: 01 55 57296000 ext. 37000, www.ipn.mx/dsettt, correo electrónico: dsettt@ipn.mx





Instituto Politécnico Nacional
Dirección de Servicios Empresariales y
Transferencia Tecnológica



2022, Año de Ricardo Flores Magón
100 Aniversario de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura
50 Aniversario de la UPRISA
50 Aniversario del CECYT 10 "Carlos Valez Méndez"
25 Aniversario del CECAS, CITEC y del CEDI, Unidad Simón

Folio
DSETT.D/CSI/172/2022

Asunto
Constancia de participación de
proyectos vinculados

Ciudad de México, 08 de julio de 2022.

Mismos que si recibieron estímulos económicos por la realización del proyecto.

Se extiende la presente constancia a solicitud de los interesados y para los fines a que haya lugar.

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

Atentamente
"La Técnica al Servicio de la Patria"

L.A.I. Salvador Buendía Solís
Director


2/2



Referencias

Referencias

- [1] National Museum Wales, “Richard Trevithick’s steam locomotive,” 2008. .
- [2] C. H. (Cuthbert H. Ellis, *The pictorial encyclopedia of railways*. London, Hamlyn, 1968.
- [3] Christos N. Pyrgidis, *Railway Transportation Systems. Design, Construction and Operation*, 2nd edition. 2021.
- [4] F. G. Franco, *Railroads in Mexico: An Illustrated History*. Sundance Publications, 1985.
- [5] Teresa Márquez Martínez, “Los ferrocarriles en México,” *América Latina en la historia económica*, 2005. .
- [6] B. Urías, J. del Palacio, and A. Caso, *Los ferrocarriles de México, 1837-1987*. Ferrocarriles Nacionales de México, 1987.
- [7] J. R. Signor and J. A. Kirchner, “The Southern Pacific of Mexico and the West Coast Route,” 1987.
- [8] Secretaria de Comunicaciones y Transportes, “Agencia reguladora del transporte ferroviario,” *Sistema ferroviario mexicano*. .
- [9] H. Tournay, “Rail and Wheel Profile Design,” in *Guidelines to best practices for heavy haul railway operations: Wheel and rail interface issues*, 2001.
- [10] R. Lewis and U. Olofsson, “Basic tribology of the wheel–rail contact,” in *Wheel–Rail Interface Handbook*, Woodhead Publishing Limited, 2009, pp. 34–57.
- [11] J. Sinclair, “Friction modifiers,” in *Vehicle Track Interactio: Identifying and Implementing Solutions*, 2004.
- [12] D. O. for E. C. and Research Group on Wear of Engineering Materials, *Glossary of terms and definitions in the field of friction, wear and lubrication; Tribology*. 1969.
- [13] J. Williams, *Engineering Tribology*. Cambridge University Press, 1994.
- [14] I. Hutchings, *TRIBOLOGY Friction and Wear of Engineering Materials*, First Edit.

Referencias

- Butterworth-Heinemann, 1992.
- [15] T. Ohyama, "Tribological studies on adhesion phenomena between wheel and rail at high speeds," *Wear*, vol. 144, no. 1–2, pp. 263–275, Apr. 1991.
- [16] E. A. Gallardo-Hernández, "Wheel and rail contact simulation using a twin disc tester.," The University of Sheffield, 2009.
- [17] E. A. Gallardo-Hernandez and R. Lewis, "Twin disc assessment of wheel/rail adhesion," *Wear*, vol. 265, no. 9–10, pp. 1309–1316, 2008.
- [18] J. Sundh, U. Olofsson, and K. Sundvall, "Seizure and wear rate testing of wheel-rail contacts under lubricated conditions using pin-on-disc methodology," *Wear*, vol. 265, no. 9–10, pp. 1425–1430, 2008.
- [19] J. A. Greenwood and J. H. Tripp, "The Elastic Contact of Rough Spheres," *J. Appl. Mech.*, 2011.
- [20] G. & Tripp, "The contact of two nominally flat rough surfaces," *Proc. Inst. Mech. Eng. H.*, 1989.
- [21] J. Sundh and U. Olofsson, "Seizure mechanisms of wheel-rail contacts under lubricated conditions using a transient ball-on-disc test method," *Tribol. Int.*, vol. 41, no. 9–10, pp. 867–874, 2008.
- [22] R. Lewis and R. S. Dwyer-Joyce, "Wear mechanisms and transitions in railway wheel steels," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J J. Eng. Tribol.*, vol. 218, no. 6, pp. 467–478, Jun. 2004.
- [23] P. J. Bolton and P. Clayton, "Rolling-sliding wear damage in rail and tyre steels," *Wear*, vol. 93, no. 2, pp. 145–165, Jan. 1984.
- [24] T. M. Beagley and C. Pritchard, "Wheel/rail adhesion — the overriding influence of water," *Wear*, vol. 35, no. 2, pp. 299–313, Dec. 1975.
- [25] R. Lewis and U. Olofsson, "Mapping rail wear regimes and transitions," *Wear*, vol. 257, no. 7–8, pp. 721–729, Oct. 2004.
- [26] A. Kapoor, "Wear by plastic ratchetting," *Wear*, vol. 212, no. 1, pp. 119–130, 1997.

Referencias

- [27] D. T. Eadie, J. Kalousek, and K. C. Chiddick, “The role of high positive friction (HPF) modifier in the control of short pitch corrugations and related phenomena,” *Wear*, vol. 253, no. 1–2, pp. 185–192, 2002.
- [28] Luke Evelyn Buckley-Johnstone, “Wheel/Rail Contact Tribology: Characterising Low Adhesion Mechanisms and Friction Management Products,” The University of Sheffield, Sheffield, England, 2017.
- [29] R. Stock, L. Stanlake, C. Hardwick, M. Yu, D. Eadie, and R. Lewis, “Material concepts for top of rail friction management – Classification, characterisation and application,” *Wear*, vol. 366–367, pp. 225–232, 2016.
- [30] A. Kapoor, “Wear-fatigue interaction and maintenance strategies,” in *Why failures occur in the wheel-rail system*, 2001.
- [31] A. R. T. Corporation, “Rail Defects Handbook Some Rail Defects, their Characteristics, Causes and Control,” 2006.
- [32] American Railway Engineering and Maintenance-of-way association, “AREMA Manual For Railway Engineering,” vol. 1. Maryland, pp. 1–26, 2010.
- [33] European Railway Research Institute, “Rolling contact fatigue: Review of rolling contact fatigue in rail,” Utrecht, Netherlands, 1990.
- [34] N. Gao, R. S. Dwyer-Joyce, and D. G. Grieve, “Disc machine testing to assess the life of surface-damaged railway track,” in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2001.
- [35] R. Pohl, R. Krull, and R. Meierhofer, “A new Eddy Current Instrument in a Grinding Train,” in *Proceedings of ECNDT 2006*, 2006.
- [36] J. H. Beynon, J. E. Garnham, and K. J. Sawley, “Rolling contact fatigue of three pearlitic rail steels,” *Wear*, 1996.
- [37] K. Bruzelius and D. Mba, “An initial investigation on the potential applicability of Acoustic Emission to rail track fault detection,” *NDT E Int.*, vol. 37, no. 7, pp. 507–516, Oct. 2004.

Referencias

- [38] E. Uhlmann, P. Lypovka, L. Hochschild, and N. Schröer, “Influence of rail grinding process parameters on rail surface roughness and surface layer hardness,” *Wear*, 2016.
- [39] G. Montiel-Varela, A. C. Domínguez-Vázquez, E. A. Gallardo-Hernández, L. Bregant, and R. García-Illescas, “Experimental and numerical study for detection of rail defect,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 81, pp. 94–102, 2017.
- [40] W. Schoech, “Recording Assisted RCF-Treatment gains Ground,” in *Proceedings IHHA Conference*, 2013.
- [41] Z. Popović, V. Radović, L. Lazarević, V. Vukadinović, and G. Tepić, “Rail inspection of RCF defects,” *Metalurgija*, 2013.
- [42] R. K. Steele and J. M. W., “Phoenix- a 3D Rail Fatigue Model,” in *Association of American Railroads*, 1984.
- [43] T. N. Farris, L. M. Keer, and R. K. Steele, “Life prediction for unstable shell growth in rails,” *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME*, 1990.
- [44] D. Raman, R. Devadoss, G. Chattopadhyay, and D. Nielsen, “RCF Quantification - Towards Rail Grinding Best Practices for Australian Heavy Haul Rail,” *World Congr. Rail Res.*, 2013.
- [45] M. Ciavarella and J. Barber, “Influence of longitudinal creepage and wheel inertia on short-pitch corrugation: A resonance-free mechanism to explain the roaring rail phenomenon,” in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2008.
- [46] R. Masoudi Nejad, M. Shariati, and K. Farhangdoost, “Effect of wear on rolling contact fatigue crack growth in rails,” *Tribol. Int.*, 2016.
- [47] J. M. Cookson and P. J. Mutton, “The role of the environment in the rolling contact fatigue cracking of rails,” *Wear*, 2011.
- [48] P. Clayton and D. N. Hill, “Rolling contact fatigue of a rail steel,” *Wear*, 1987.
- [49] E. Magel, J. Kalousek, and P. Sroba, “Chasing the magic wear rate,” in *Civil-Comp*

Referencias

- Proceedings*, 2014.
- [50] M. Vidaud and W.-J. Zwanenburg, “Current situation on rolling contact fatigue – a rail wear phenomenon,” in *9th Swiss Transport Research Conference*, 2009.
- [51] J. W. Ringsberg, “Life prediction of rolling contact fatigue crack initiation,” *Int. J. Fatigue*, 2001.
- [52] E. Magel, P. Sroba, K. Sawley, and J. Kalousek, “Control of rolling contact fatigue of rails,” *Cent. Surf. Transp. Technol.*, 2005.
- [53] W. R. Tyfour, J. H. Beynon, and A. Kapoor, “The steady state wear behaviour of pearlitic rail steel under dry rolling-sliding contact conditions,” *Wear*, 1995.
- [54] C. B.-C.-0245 P. P. European Commission DGx111 Brite/Euram III Project, “Integrated Study of Rolling Contact Fatigue (ICON),” Brussels.
- [55] E. E. Magel, “Rolling Contact Fatigue: A Comprehensive Review,” *U.S. Dep. Transp. Fed. Railr. Adm.*, 2011.
- [56] M. Ishida, “Rolling contact fatigue (RCF) defects of rails in Japanese railways and its mitigation strategies,” *Electron. J. Struct. Eng.*, 2013.
- [57] Y. Hu *et al.*, “Investigation on wear and rolling contact fatigue of wheel-rail materials under various wheel/rail hardness ratio and creepage conditions,” *Tribol. Int.*, vol. 143, p. 106091, Mar. 2020.
- [58] L. Ma, L. B. Shi, J. Guo, Q. Y. Liu, and W. J. Wang, “On the wear and damage characteristics of rail material under low temperature environment condition,” *Wear*, 2018.
- [59] W. J. Wang, W. Zhong, J. Guo, Q. Y. Liu, M. H. Zhu, and Z. R. Zhou, “Investigation on rolling contact fatigue and wear properties of railway rails,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J J. Eng. Tribol.*, vol. 223, no. 7, pp. 1033–1039, Jun. 2009.
- [60] Y. Satoh and K. Iwafuchi, “Effect of rail grinding on rolling contact fatigue in railway rail used in conventional line in Japan,” *Wear*, 2008.
- [61] S. Bogdański, J. Stupnicki, M. W. Brown, and D. F. Cannon, “A two dimensional

Referencias

- analysis of mixed-mode rolling contact fatigue crack growth in rails,” in *European Structural Integrity Society*, 1999.
- [62] P. A. Cuervo, J. F. Santa, and A. Toro, “Correlations between wear mechanisms and rail grinding operations in a commercial railroad,” *Tribol. Int.*, 2015.
- [63] E. Magel, P. Sroba, K. Sawley, and J. Kalousek, “Control of rolling contact fatigue of rails,” Calgary, Alberta, Canada, 2004.
- [64] R. Devries, P. Sroba, and E. Magel, “Preventive Grinding Moves into the 21 st Century on Canadian Pacific Railway,” Jan. 2001.
- [65] R. Harris, “Man versus Machine, testing Automated rail Grinding Pre- Inspection vs manual Methods,” in *Proceedings IHHA Conference*, 2013.
- [66] M. Turner, “Rail maintenance improvements through capital investment and technological advancements,” in *Proceedings IHHA Conference*, 2011.
- [67] P. Sroba, R. Caldwell, and R. Harris, “Predictive Preventive Grinding to Control Rolling Contact Fatigue in Rails Is Implemented on Burlington Northern Santa Fe Railroad,” in *Proceedings IHHA Conference*, 2011.
- [68] R. Devadoss *et al.*, “Rail grinding quality assurance based on profile correction and RCF control,” in *Conference On Railway Engineering*, 2010.
- [69] S. Zakharov, “Guidelines to Best Practices for Heavy Haul Railway Operations: Wheel and Rail Interface Issues,” *Int. Heavy Haul Assoc.*, pp. 2–45, 2001.
- [70] J. Stanford, E. Magel, and P. Sroba, “Transitioning from corrective to preventive rail grinding on the BNSF railroad,” in *Confronting the Barriers of Heavy Haul Rail Technology: Proceedings, 7th International Heavy Haul Conference*, 2001.
- [71] K. Kondo, K. Yoroizaka, and Y. Sato, “Cause, increase, diagnosis, countermeasures and elimination of Shinkansen shelling,” *Wear*, 1996.
- [72] W. Glavin, J. Aspebakken, and G. Besch, “Heavy Haul: The Burlington Northern Perspective,” in *Fourth International Heavy Haul Railway Conference 1989: Railways in Action*, 1989.

Referencias

- [73] W. Schöch and A. Frick, “Development of the Grinding Practice at Malmbanan,” in *IHHA Specialist Technical Session (STS)*, 2007.
- [74] J. Stanford, P. Sroba, and E. Magel, “Burlington Northern Santa Fe Railway preventive gradual grinding initiative,” in *Proceedings of the AREMA 1999 Annual Conferences*, 1999.
- [75] E. E. Magel and J. Kalousek, “The application of contact mechanics to rail profile design and rail grinding,” *Wear*, 2002.
- [76] M. Dembosky, A. Doherty, C. Urban, and R. Walker, “Management of Rolling Contact Fatigue (RCF) in the UK Rail system : A systems solution,” 2006.
- [77] B. Bell, R. Bright, D. Witt, and B. Harris, “Reducing Rail Surface Defect Service Failures on the CSXT Railroad,” in *Proceedings IHHA Heavy Haul Conference*, 2003.
- [78] S. Grassie, P. Nilsson, K. Bjurstrom, A. Frick, and L. G. Hansson, “Alleviation of rolling contact fatigue on Sweden’s heavy haul railway,” *Wear*, 2002.
- [79] W. Schöch, “Headcheck Grinding - Ongoing Research Gives Further Insight,” in *7th International Heavy Haul Conference*, 2001, pp. 483–491.
- [80] W. Schöch, “Specification and Documentation of Rail Grinding Work in Europe,” *J. Wheel. Interact.*, 2007.
- [81] P. Sroba and M. Roney, “Rail grinding best practices,” in *Proceedings of the 2003 American Railway Engineering and Maintenance of Way Association Annual Conference*, 2003.
- [82] Y. M. Liu, T. Y. Yang, Z. He, and J. Y. Li, “Analytical modeling of grinding process in rail profile correction considering grinding pattern,” *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 18, no. 2, pp. 669–678, Feb. 2018.
- [83] W. Jianxi and G. Jirong, “The Method of Determining Rail Grinding Parameters Based on Life- Cycle Cost,” *Open Mech. Eng. J.*, vol. 8, pp. 544–549, Nov. 2014.
- [84] S. Zhi, J. Li, and A. M. Zaremski, “Predictive modeling of the rail grinding process

Referencias

- using a distributed cutting grain approach,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, 2016.
- [85] “Linsinger.” [Online]. Available: <http://www.linsinger.com/portfolio/sf03-ffs/?lang=%0Aen>.
- [86] “LINMAG Rail Milling Service.” [Online]. Available: <https://images.app.goo.gl/9DBobMpu6vZ4DacJ7>.
- [87] W. Fan, Y. Liu, X. Song, J. Cheng, and J. Li, “Influencing mechanism of rubber wheel on contact pressure and metal removal in corrugated rail grinding by abrasive belt,” *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME*, 2018.
- [88] H. Zhe, L. Jianyong, L. Yueming, N. Meng, and F. Wengang, “Investigating the effects of contact pressure on rail material abrasive belt grinding performance,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2017.
- [89] W. Fan, G. Hou, W. Wang, and Y. Wu, “Dynamic analysis of a novel rail-grinding car using open-structured abrasive belt for high-speed railways,” *Math. Probl. Eng.*, 2019.
- [90] W. Fan, Y. Liu, W. Wang, J. Li, and R. Wang, “Research on Modeling Method of Material Removal for Rail Grinding by Abrasive Belt Based on Elastic Hertzian Contact,” *Jixie Gongcheng Xuebao/Journal Mech. Eng.*, 2018.
- [91] R. Singleton, M. B. Marshall, R. Lewis, and G. Evans, “Rail grinding for the 21st century - Taking a lead from the aerospace industry,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2015.
- [92] S. Marich, “Rail Grinding Strategies Adopted in Australia,” *Rail Eng. Int.*, vol. 34, no. 1, pp. 4–6, 2005.
- [93] J. Cooper, “Rail Flaw Detection: A Particular Challenge,” *5th IHHA Conf.*, 1993.
- [94] Q. Zhou, C. Tian, Y. Zhang, F. Liu, Z. Chen, and Z. Yu, “Research on key rail grinding technology of high-speed railway,” vol. 33, pp. 66–70, Mar. 2012.
- [95] T. Hempe and T. Siefer, “Rail Grinding as an integral part of technically and

Referencias

- economically efficient track maintenance,” *ZEV Rail Glas. Ann.*, 2007.
- [96] J. Lundmark, “Rail grinding and its impact on the wear of wheels and rails,” Lulea University of Technology, 2007.
- [97] J. Kalousek, P. Sroba, and C. Hegelund, “Analysis of Rail Grinding Tests and Implications for Corrective and Preventative Grinding,” *Heavy Haul Railw. Conf.*, 1989.
- [98] E. Magel, M. Roney, J. Kalousek, and P. Sroba, “The blending of theory and practice in modern rail grinding,” *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 2003.
- [99] Y. Liu, J. Li, Y. Cai, and M. Nie, “Current state and development trend of rail grinding technology,” *Zhongguo Tiedao Kexue/China Railw. Sci.*, 2014.
- [100] F. Silva, B. Walter, and R. Caldwell, “Preventive-Gradual On-Cycle Grinding: A First for MRS in Brazil,” Jan. 2020.
- [101] J. Hannafious, “Rail profile grinding philosophies and practices of four us railroads.”
- [102] R. E. Tuzik, “To grind or not to grind?,” *Railw. Age*, 1996.
- [103] K. Sawley, “Wheel/Rail Profile Maintenance,” in *Proceeding of WCCR Conference*, 2001.
- [104] K. Sawley, R. P. Reiff, I. Transportation Technology Center, G. B. O. of the Rail Regulator, G. B. Health, and S. Executive, *Rail Failure Assessment for the Office of the Rail Regulator: An Assessment of Railtrack’s Methods for Managing Broken and Defective Rails*. Transportation Technology Center, 2000.
- [105] D. F. CANNON, K.-O. EDEL, S. L. GRASSIE, and K. SAWLEY, “Rail defects: an overview,” *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, vol. 26, no. 10, pp. 865–886, Oct. 2003.
- [106] Z. Popović, L. Lazarević, L. J. Brajović, and P. Gladović, “Managing rail service life,” *Metalurgija*, 2014.
- [107] X. Jin, X. Du, J. Guo, and D. Cui, “State of arts of research on rail grinding,” *Xinan Jiaotong Daxue Xuebao/Journal Southwest Jiaotong Univ.*, 2010.

Referencias

- [108] H. Tanaka and M. Miwa, "Modeling the development of rail corrugation to schedule a more economical rail grinding," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, p. 0954409719894833, Dec. 2019.
- [109] V. Reddy, G. Chattopadhyay, P.-O. Larsson-Kråik, and D. J. Hargreaves, "Modelling and analysis of rail maintenance cost," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 105, no. 2, pp. 475–482, Feb. 2007.
- [110] G. Chattopadhyay, V. Reddy, and P. O. Larsson-Kråik, "Decision on economical rail grinding interval for controlling rolling contact fatigue," *Int. Trans. Oper. Res.*, 2005.
- [111] P. T. Torstensson, A. Pieringer, and J. C. O. Nielsen, "Simulation of rail roughness growth on small radius curves using a non-Hertzian and non-steady wheel-rail contact model," *Wear*, 2014.
- [112] J. Palese, T. Euston, and A. Zarembski, "Use of Profile Indices for Quality Control of Grinding," in *Annual Conference and Exposition*, 2004.
- [113] C. Aldrich, "Consumption of steel grinding media in mills - A review," *Minerals Engineering*. 2013.
- [114] N. Qian, W. Ding, and Y. Zhu, "Comparative investigation on grindability of K4125 and Inconel718 nickel-based superalloys," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2018.
- [115] B. Li, W. Ding, C. Yang, and C. Li, "Grindability of powder metallurgy nickel-base superalloy FGH96 and sensibility analysis of machined surface roughness," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2019.
- [116] W. B. Rowe, *Principles of Modern Grinding Technology*. Oxford: William Andrew Publishing, 2014.
- [117] S. Zhi, A. M. Zarembski, and J. Li, "Towards a better understanding of the rail grinding mechanism," in *American Society of Mechanical Engineers, Rail Transportation Division (Publication) RTD*, 2013.
- [118] A. M. Zarembski, *The Art and Science of Rail Grinding*. Simmons Boardman Press

Referencias

- Books, Incorporated, 2005.
- [119] A. M. Zarembski and J. Pandrol, “Technical Note TN1: High Speed Rail Grinding: Issues and Capabilities,” 1996.
- [120] A. M. Zarembski and B. Hagan, “Effectiveness of high speed rail grinding on metal removal and grinding productivity,” in *AREMA Railway Interchange*, 2011.
- [121] K. Zhou *et al.*, “Experimental investigation on material removal mechanism during rail grinding at different forward speeds,” *Tribol. Int.*, 2020.
- [122] J. J. He, “Master’s Thesis: Research on the Effect of Rail Grinding Parameters on Grinding Quantity and Grinding Mode.,” Beijing Jiaotong University, 2014.
- [123] K. K. Gu *et al.*, “Analysis on the effects of rotational speed of grinding stone on removal behavior of rail material,” *Wear*, 2015.
- [124] Y. Kanematsu and Y. Satoh, “Influence of type of grinding stone on rail grinding efficiency,” *Q. Rep. RTRI (railw. Tech. Res. Institute)*, 2011.
- [125] Y. Lyu, H. Yu, J. Wang, C. Chen, and L. Xiang, “Study on the grinding temperature of the grinding wheel with an abrasive phyllotactic pattern,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2017.
- [126] B. Lin, K. Zhou, J. Guo, Q. Y. Liu, and W. J. Wang, “Influence of grinding parameters on surface temperature and burn behaviors of grinding rail,” *Tribol. Int.*, vol. 122, pp. 151–162, Jun. 2018.
- [127] Z. Y. Zhang *et al.*, “Thermal model and temperature field in rail grinding process based on a moving heat source,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 106, pp. 855–864, 2016.
- [128] R. Pavel and A. Srivastava, “An experimental investigation of temperatures during conventional and CBN grinding,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2007.
- [129] B. Denkena, T. Grove, and T. Göttching, “Grinding with patterned grinding wheels,” *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, 2015.
- [130] I. Y. Shevtsov, “Wheel/Rail interface Optimisation,” Delf University of Technology, 2008.

Referencias

- [131] Q. Zhang, X. Cui, G. Chen, and Z.-R. Zhou, "Thermal-mechanical coupling analysis in rail grinding," *Tiedao Xuebao/Journal China Railw. Soc.*, vol. 37, pp. 78–82, May 2015.
- [132] K. Zhou, H. H. Ding, S. Y. Zhang, J. Guo, Q. Y. Liu, and W. J. Wang, "Modelling and simulation of the grinding force in rail grinding that considers the swing angle of the grinding stone," *Tribol. Int.*, 2019.
- [133] K. Zhou, H. H. Ding, W. J. Wang, R. X. Wang, J. Guo, and Q. Y. Liu, "Influence of grinding pressure on removal behaviours of rail material," *Tribol. Int.*, vol. 134, pp. 417–426, Jun. 2019.
- [134] J. A. Badger and A. A. Torrance, "Comparison of two models to predict grinding forces from wheel surface topography," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2000.
- [135] Y. Zhang *et al.*, "Analysis of grinding mechanics and improved predictive force model based on material-removal and plastic-stacking mechanisms," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2017.
- [136] S. Zhang, K. Zhou, H. Ding, J. Guo, Q. Liu, and W. Wang, "Effects of grinding passes and direction on material removal behaviours in the rail grinding process," *Materials (Basel)*, 2018.
- [137] W. J. Wang, K. K. Gu, K. Zhou, Z. B. Cai, J. Guo, and Q. Y. Liu, "Influence of granularity of grinding stone on grinding force and material removal in the rail grinding process," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J J. Eng. Tribol.*, 2019.
- [138] C. Dai, W. Ding, J. Xu, Y. Fu, and T. Yu, "Influence of grain wear on material removal behavior during grinding nickel-based superalloy with a single diamond grain," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 113, pp. 49–58, Feb. 2017.
- [139] S. Zhi, J. Li, and A. M. Zarembski, "Grinding motor energy saving method based on material removal model in rail grinding processes," *Int. J. Precis. Eng. Manuf. - Green Technol.*, 2015.
- [140] H.-H. Ding *et al.*, "Grinding force modeling and experimental verification of rail grinding," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J J. Eng. Tribol.*, p. 1350650119900738, Jan.

Referencias

2020.

- [141] A. M. Zarembski, “High speed rail grinding for high speed rail.,” in *The seventh world congress on high speed rail.*, 2010.
- [142] A. M. Zarembski, “High-speed rail grinding and metal removal.,” *Transp. Res Board*, vol. 108 (6), pp. 44–46, 2012.
- [143] Q. Lin, J. Guo, H. Y. Wang, W. J. Wang, and Q. Y. Liu, “Optimal design of rail grinding patterns based on a rail grinding target profile,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, 2018.
- [144] K. Xu, Z. Feng, H. Wu, D. Xu, F. Li, and C. Shao, “Optimal profile design for rail grinding based on wheel–rail contact, stability, and wear development in high-speed electric multiple units,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, 2019.
- [145] P. Townend, C. Epp, and P. Clark, “Bogie curving trials, rail profiling and theoretical modelling to reduce rail deterioration and wheel wear on curves,” in *Heavy Haul Railways Conference 1978*, 1978, pp. 65–71.
- [146] M. Nie, J. Li, H. Shen, and S. Zhi, “Grinding pressure fluctuation of rail grinding,” vol. 44, pp. 3546–3551, Aug. 2013.
- [147] P. Chen, L. Gao, and J. Hao, “Dynamics simulation on asymmetrical rail grinding in railway curve,” in *International Conference on Transportation Engineering 2007, ICTE 2007*, 2007.
- [148] Y. Wu, M. Shen, M. Qu, G. Xie, Z. Shang, and T. Jin, “An experimental investigation on surface layer damage in high-efficiency and low-damage grinding of rail by slotted CBN grinding wheel,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2019.
- [149] J. Ding, R. Lewis, A. Beagles, and J. Wang, “Application of grinding to reduce rail side wear in straight track,” *Wear*, vol. 402–403, pp. 71–79, 2018.
- [150] R. X. Wang *et al.*, “Effects of abrasive material and hardness of grinding wheel on rail grinding behaviors,” *Wear*, 2020.
- [151] R. Lewis and U. Olofsson, *Wheel-Rail Interface Handbook*. 2009.

Referencias

- [152] Precision cutting tools, “Railroad Re-Turning Wheel Machining Technology.” [Online]. Available: <http://www.pcbn-insert.com/FAQ/railroad-wheels-returning-with-solid-cbn-inserts.html>.
- [153] C. J. Rasmussen, S. Fæster, S. Dhar, J. V. Quaade, M. Bini, and H. K. Danielsen, “Surface crack formation on rails at grinding induced martensite white etching layers,” *Wear*, 2017.
- [154] W. Österle, H. Rooch, A. Pyzalla, and L. Wang, “Investigation of white etching layers on rails by optical microscopy, electron microscopy, X-ray and synchrotron X-ray diffraction,” *Mater. Sci. Eng. A*, 2001.
- [155] W. Lojkowski, M. Djahanbakhsh, G. Bürkle, S. Gierlotka, W. Zielinski, and H. J. Fecht, “Nanostructure formation on the surface of railway tracks,” *Mater. Sci. Eng. A*, 2001.
- [156] H. W. Zhang, S. Ohsaki, S. Mitao, M. Ohnuma, and K. Hono, “Microstructural investigation of white etching layer on pearlite steel rail,” *Mater. Sci. Eng. A*, 2006.
- [157] R. I. Carroll and J. H. Beynon, “Rolling contact fatigue of white etching layer: Part 1. Crack morphology,” *Wear*, 2007.
- [158] R. I. Carroll and J. H. Beynon, “Rolling contact fatigue of white etching layer. Part 2. Numerical results,” *Wear*, 2007.
- [159] J. Ahlström and B. Karlsson, “Microstructural evaluation and interpretation of the mechanically and thermally affected zone under railway wheel flats,” *Wear*, 1999.
- [160] L. Wang, A. Pyzalla, W. Stadlbauer, and E. A. Werner, “Microstructure features on rolling surfaces of railway rails subjected to heavy loading,” *Mater. Sci. Eng. A*, 2003.
- [161] G. Baumann, H. J. Fecht, and S. Liebelt, “Formation of white-etching layers on rail treads,” *Wear*, 1996.
- [162] C. J. Rasmussen, X. Zhang, H. Danielsen, and S. Fæster, “Grinding induced martensite on the surface of rails,” *Risoe Int. Symp. Mater. Sci. Proc. (ISSN 0907-*

Referencias

- 0079), vol. 35, pp. 439–446, Sep. 2014.
- [163] M. Steenbergen, “Rolling contact fatigue in relation to rail grinding,” *Wear*, vol. 356–357, pp. 110–121, Jun. 2016.
- [164] D. J. Thompson, “On the relationship between wheel and rail surface roughness and rolling noise,” *J. Sound Vib.*, 1996.
- [165] S. L. Grassie, “Rail irregularities, corrugation and acoustic roughness: Characteristics, significance and effects of reprofiling,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, 2012.
- [166] P. C. Dings and M. G. Ditttrich, “Roughness on Dutch railway wheels and rails,” *J. Sound Vib.*, 1996.
- [167] J.-F. Cordier and P. Fodiman, “Experimental Characterization of Wheel and Rail Surface Roughness,” *J. Sound Vib.*, vol. 231, no. 3, pp. 667–672, 2000.
- [168] M. Hiensch *et al.*, “Two-material rail development: Field test results regarding rolling contact fatigue and squeal noise behaviour,” in *Wear*, 2005.
- [169] N. Craven, O. G. Bewes, B. A. Fenech, and R. Jones, “Responding to the Environmental Noise Directive by demonstrating the benefits of rail grinding on the Great Britain’s* railway network,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, 2013.
- [170] F. Bucher, K. Knothe, and A. Theiler, “Normal and tangential contact problem of surfaces with measured roughness,” *Wear*, 2002.
- [171] R. L. Hecker and S. Y. Liang, “Predictive modeling of surface roughness in grinding,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 43, no. 8, pp. 755–761, Jun. 2003.
- [172] E. J. Da Silva, J. F. G. De Oliveira, B. B. Salles, R. S. Cardoso, and V. R. A. Reis, “Strategies for production of parts textured by grinding using patterned wheels,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, 2013.
- [173] J. Lundmark, E. Höglund, and B. Prakash, “Running-in behaviour of rail and wheel contacting surfaces,” in *International Conference on Tribology*, 2006.

Referencias

- [174] Y. Balagurunathan and E. R. Dougherty, *Morphological quantification of surface roughness*, vol. 42. 2003.
- [175] P. Sahoo, “1 - Surface topography,” J. P. B. T.-T. for E. Davim, Ed. Woodhead Publishing, 2011, pp. 1–32.
- [176] S. Malkin and C. Guo, “Ideal Surface Roughness,” *Grind. Technol. Theory Appl. Mach. with Abrasives*, 2008.
- [177] W. P. Dong, P. J. Sullivan, and K. J. Stout, “Comprehensive study of parameters for characterising three-dimensional surface topography. IV: Parameters for characterising spatial and hybrid properties,” *Wear*, 1994.
- [178] W. P. Dong, P. J. Sullivan, and K. J. Stout, “Comprehensive study of parameters for characterizing three-dimensional surface topography I: Some inherent properties of parameter variation,” *Wear*, 1992.
- [179] P. J. Blau, “On the nature of running-in,” *Tribol. Int.*, vol. 38, no. 11, pp. 1007–1012, 2005.
- [180] P. J. Blau, “A Model for Run-In and Other Transitions in Sliding Friction,” *J. Tribol.*, vol. 109, no. 3, pp. 537–543, Jul. 1987.
- [181] L. J. Wilson, “Performance Measurements of Rail Curve Lubricants,” Queensland University of Technology, 2006.
- [182] U. Olofsson and K. Sundvall, “Influence of leaf, humidity and applied lubrication on friction in the wheel-rail contact: Pin-on-disc experiments,” in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2004.
- [183] C. Hardwick, R. Lewis, and D. T. Eadie, “Wheel and rail wear-Understanding the effects of water and grease,” *Wear*, vol. 314, no. 1–2, pp. 198–204, 2014.
- [184] P. Sroba, M. Roney, R. Dashko, and E. Magel, “Canadian pacific railway’s 100% effective lubrication initiative,” in *Proceedings of the AREMA 2001 Annual Conferences*, 2001.

Referencias

- [185] D. Rippeth, J. Kalousek, and J. Simmons, “Case study of the effect of lubrication and profile grinding on low rail roll-over derailments at CSX transportation,” *Wear*, 1996.
- [186] P. Sroba, M. Roney, E. Magel, and J. Kalousek, “The Evolution of rail grinding on Canadian Pacific Railway to address deep seated shells in 100% effective lubrication territories,” in *Proceedings World Congress on Railway Research*, 2006.
- [187] CRC for rail innovation, “Curve Lubrication,” 2014.
- [188] D. Nikas, J. Ahlström, and A. Malakizadi, “Mechanical properties and fatigue behaviour of railway wheel steels as influenced by mechanical and thermal loadings,” *Wear*, vol. 366–367, pp. 407–415, 2016.
- [189] “A grinder used to maintain rail tracks rests in a Melbourne siding.” [Online]. Available: <https://www.dreamstime.com/grinder-used-to-maintain-rail-tracks-rests-melbourne-siding-grinder-travels-over-steel-tracks-needing-maintenance-image209258485>. [Accessed: 21-Jul-2022].
- [190] “Rail Grinder in Action Speno RR 32 M-3.” [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=f2quMXvTP2s>. [Accessed: 21-Jul-2022].
- [191] “Kiefer-Cranes-Engineering.” [Online]. Available: <http://www.kiefer-cranes-engineering.com/>. [Accessed: 21-Jul-2022].
- [192] “Rail Grinding Service.” [Online]. Available: <https://www.ram-rail.com/the-rail-grinding/maintenance/rail-grinding-service>. [Accessed: 21-Jul-2022].
- [193] “SPENO International Group.”
- [194] “Railway Track Subway after rail grinding stock.” [Online]. Available: https://www.google.com/imgres?imgurl=https%3A%2F%2Fimage.shutterstock.com%2Fimage-photo%2Frailway-track-in-subway-after-260nw-553206667.jpg&imgrefurl=https%3A%2F%2Fwww.shutterstock.com%2Fimage-photo%2Frailway-track-subway-after-rail-grinding-553206667&tbnid=U_UdFba8ibZw6M&vet=12ahUKEwjA47jRiob5AhUvlGoFHVLsA4EQMygvegUIARCxAg..i&docid=jAv948JwzpV8DM&w=390&h=280&q=rail

Referencias

grinding&ved=2ahUKEwjA47jRiob5AhUvIGoFHVLsA4EQMygvegUIARCxAg.
[Accessed: 21-Jul-2022].

- [195] I. A. Vásquez-Chacón, E. A. Gallardo-Hernández, M. Moreno-Ríos, and M. Vite-Torres, “Influence of surface roughness and contact temperature on the performance of a railway lubricant grease,” *Mater. Lett.*, vol. 285, p. 129040, 2021.
- [196] M. Sedlaček, P. Gregorčič, and B. Podgornik, “Use of the Roughness Parameters Ssk and Sku to Control Friction—A Method for Designing Surface Texturing,” *Tribol. Trans.*, vol. 60, no. 2, pp. 260–266, Mar. 2017.