



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# **“Análisis experimental del efecto del proceso de reperfilado sobre el desgaste y fatiga por contacto de rodadura de riel en el sistema rueda-riel en el Metro de Medellín”**

**Paula Andrea Cuervo Velásquez**

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

2014



# **“Análisis experimental del efecto del proceso de reperfilado sobre el desgaste y fatiga por contacto de rodadura de riel en el sistema rueda-riel en el Metro de Medellín”**

**Paula Andrea Cuervo Velásquez**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

**Magister en Ingeniería - Materiales y Procesos**

Director:

Ph.D., Alejandro Toro

Línea de Investigación:

Tribología y Superficies.

Grupo de Investigación:

Grupo de Tribología y Superficies

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Materiales y Minerales

Medellín, Colombia

2014



*"Me verás volar*

*Por la ciudad de la furia*

*Donde nadie sabe de mí*

*Y yo soy parte de todo...*

*Un hombre alado*

*...Prefiere la noche"*

Gustavo Cerati



## Agradecimientos

*"La gratitud es un gesto, no para congraciarse con aquel o con aquellos a quienes agradecemos; es más bien, la humildad necesaria en cada cosa que realizamos": Durante nuestra vida nunca caminamos solos, existen personas con las que a diario se tiene contacto, personas que nos brindan la posibilidad de tener un aprendizaje, en donde cada acto es una suma de acontecimientos que permiten este aprendizaje, se crece, pues, en lo personal, en y de la familia, en lo académico y en lo social... estos aprendizajes me han permitido tener la oportunidad de crecer de manera integral como persona, pues, en cada discusión, en cada asesoría y en cada conversación, profunda o banal; cada una de estas formas de interactuar con el otro y con el conocimiento me dieron luces para seguir el camino... Todo los sucesos transcurridos en este tiempo, momentos de profunda alegría y de profunda tristeza, momentos de confusión, momentos de mucho cansancio, momentos esperados e inesperados, fundamentales para el logro de aquello que perseguimos, en fin, los momentos que a diario la vida nos permite tener con las diferentes personas y con las experiencias académicas, de plano científico, me permiten hoy agradecer a las personas que han estado en mi vida y las que llegaron durante este proceso, ya que en cada momento en que se entregó la vida, fueron estas personas, y los momentos con ellas, las que me*

---

<sup>1</sup>MANUEL BERNARDO ROJAS LOPEZ, "El rostro de los arlequines; Tartarín Moreira y León Zafir, dos

*dieron muchísimo en lo personal y, también, en la parte académica, permitiéndome hoy terminar este trabajo del cual me siento agradecida. Es por ello, que podría quedarme corta al agradecer ya que cada persona que ha estado en mi vida y las que me encontré en el camino durante la realización de este trabajo fue parte de lo que se logró.*

*"Por lo tanto, mis agradecimientos comprenden tanto a aquellas personas que colaboraron en lo académico, como aquellas que comparten hechos tan importantes como el sentir y vibrar con la emoción que nos produce la vida. En veces, los dos aspectos se conjuntan y, por ello la deuda afectiva e intelectual es mayor".*

*Agradezco a aquellos donde la deuda afectiva e intelectual es mayor... a Dios, a mi Madre María Rosalba Velásquez, a mi Padre José Cuervo, a mi hermana Viviana Cuervo y a mi Hermano Carlos Cuervo, a mi sobrino Juan Sebastián Gómez, a mi tío León Velásquez y a mi tío Héctor Cuervo QEPD; a mi excelente Asesor Alejandro Toro a quien admiro y respeto por su gran labor académica, su asesoría y la enseñanza desde la argumentación.*

*A todos mis Compañeros y Profesores del Grupo de Tribología y Superficies, (especialmente Juan Meza, Juan Fernando Ramírez, Juan Vélez, Juan Felipe Santa, Alejandro Vásquez, Sergio Zapata, Camilo Sánchez, Laura Ramos, Sebastián Romo, Luis Tobón, Augusto Barrios, Jesús Cornelio, Andrey Perez, Diego López, Juan Pablo Cano, Santiago Maya, Manuela Gallego, Yasser Pabon).*

*A mis Amigos (especialmente Karina Salazar, Zulay Giraldo, Juan Esteban Posada, Alberto López, Daniel Mejía, Felipe Jaramillo, Esteban Correa, Andrea Lopera, Beatriz Guerra, Gabriel Bedoya, Wilmer Molina,*



*Mario Asís Gómez, Giovanny Gómez, Esteban Agudelo, Sindy Barbosa,  
Marlon Henao, Mónica Castañeda, Jorge Giraldo y Eduardo Hernández.*

*Agradezco a las instituciones que me brindaron apoyo, El Grupo de  
Tribología y Superficies, la Escuela de Materiales y al Metro de Medellín  
(especialmente a Mauricio Enrico Palacio, Rodrigo Toro, Miguel Ángel  
Fernández), Industrias HRV (Carlos Vasco, Miguel Rico, Wilmer Pérez,  
Alfredo Pulgarín y Edilson Bermúdez).*

*A mi asesor en lo personal Juan Pablo Jaramillo.*

*Y a todos aquellos con los que compartí la cotidianidad.*

*Mil Gracias.*



## Resumen

Este trabajo comprende un diagnóstico de las curvas de la línea B del Metro de Medellín, en el que se determinaron diferentes correlaciones entre intervenciones de reperfilado, mecanismos de daño, forma de contacto rueda-riel, tipo de riel (hilo alto - hilo bajo), peralte de la curva, radio de curvatura y material que se remueve; estas correlaciones permitieron establecer tipologías de daño y frecuencias de intervención y con ello se formularon recomendaciones específicas de cada curva para realizar operaciones de reperfilado desde un mantenimiento preventivo. Además, se realizaron pruebas de reperfilado y tribológicas en laboratorio y se determinaron estrategias para mejorar la calidad superficial en campo después de las operaciones de reperfilado, así como para disminuir desgaste y fatiga de contacto (RCF).

**Palabras clave:** Reperfilado de rieles, Ensayos tribológicos, Mecanismos de desgaste, Fatiga de contacto, Corrugación.

## Abstract

This work comprises a diagnosis of the curves of the line B of the Medellin Metro, in which a number of correlations among interventions of reprofiling, wear mechanisms, wheel-rail contact mode, type of rail (high or low), superelevation of the curve, radius of curvature and material removed are discussed; these correlations allowed understanding the nature of the damaging mechanisms and the frequency of intervention of the railway, and as a consequence, several recommendations specific to each curve were formulated to improve preventive maintenance operations. In addition, both reprofiling and tribological tests were performed in laboratory to define strategies to improve the surface quality in the field after maintenance operations, as well as to reduce wear and RCF of the rails.

**Key words:** Reprofiling, Tribological tests, Wear mechanisms, Rolling Contact Fatigue, Corrugation.



# Contenido

	Pág.
<b>Resumen</b> .....	<b>XI</b>
<b>Lista de Figuras</b> .....	<b>XVI</b>
<b>Lista de Tablas</b> .....	<b>XXIII</b>
<b>Objetivos</b> .....	<b>XXV</b>
Objetivo general .....	XXV
Objetivos específicos .....	XXV
<b>Introducción</b> .....	<b>27</b>
<b>1. De ideas y teorías actuales</b> .....	<b>29</b>
1.1 Reperfilado .....	29
1.2 Reperfilado de Rieles.....	29
1.3 Mecánica del contacto .....	30
1.4 Textura y rugosidad superficial .....	31
1.5 Área Real de Contacto.....	35
1.6 Desgaste .....	36
1.6.1 Fatiga por Contacto Rodante .....	37
1.6.2 Tasa Mágica de Desgaste.....	38
1.7 Estado actual.....	38
1.7.1 Grinding .....	38
1.7.2 Reperfilado y Mecánica del Contacto .....	40
1.7.3 Fricción .....	43
1.7.4 Reperfilado, Desgaste y RCF .....	45
<b>2. Metodología: Observación y recolección de datos... Formulación y comprobación de hipótesis... Demostración de relaciones y explicación...Retroalimentación</b> .....	<b>47</b>
2.1 Diagnóstico de operaciones de reperfilado en rieles .....	48
2.2 Pruebas de reperfilado en laboratorio .....	51
2.2.1 Selección de parámetros de operación .....	51
2.2.2 Materiales y Recursos.....	53
2.2.3 Ejecución de pruebas de reperfilado .....	53

XIV “Análisis experimental del efecto del proceso de reperfilado sobre el desgaste y fatiga por contacto de rodadura de riel en el sistema rueda-riel en el Metro de Medellín”

---

2.2.4	Análisis de pruebas de reperfilado .....	54
2.3	Ensayos tribológicos .....	55
2.3.1	Diseño de experimentos .....	55
2.3.2	Ejecución de los ensayos .....	56
2.3.3	Análisis de los ensayos tribológicos.....	60
<b>3.</b>	<b>Diagnosis: correlaciones de lo general a lo particular.....</b>	<b>63</b>
3.1	Criterios para reperfilar: inspección visual, medida de perfil con Miniprof y medida de corrugación con CAT.....	63
3.2	Clasificación de mecanismos de desgaste .....	65
3.2.1	Clasificación de curvas según número de intervenciones de reperfilado y mecanismo de desgaste .....	68
3.3	Correlaciones .....	71
3.3.1	Intervenciones de reperfilado, tipo de hilo en curva y mecanismo de desgaste.....	71
3.3.2	Intervenciones de reperfilado, perfil de contacto y mecanismo de desgaste.....	73
3.3.3	Intervenciones de reperfilado, Mecanismos de desgaste principales (fatiga y corrugación) y características de diseño del riel (peralte y radio de curva) 75	75
3.3.4	Frecuencias de Intervenciones de reperfilado, Mecanismos de desgaste principales (fatiga y corrugación), características de diseño del riel (peralte y radio de curva), y material removido .....	78
3.3.5	Corrugación y material removido .....	86
3.4	Discusión.....	89
<b>4.</b>	<b>Desgaste y fricción- La afectación de la calidad superficial. Una mirada micro</b>	<b>95</b>
4.1	Efecto del reperfilado sobre la calidad superficial .....	95
4.1.1	Parámetros de rugosidad significativos para diferentes calidades superficiales.....	97
4.2	Discusión sobre las superficies reperfiladas .....	99
4.2.1	Efecto del reperfilado sobre los parámetros de rugosidad de las superficies.....	99
4.2.2	Comparación de resultados en laboratorio con resultados en campo ..	99
4.3	Ensayos tribológicos a 0% deslizamiento, 0.8GPa y en seco.....	101
4.4	Ensayos tribológicos a 5% deslizamiento, 1.1 GPa, en seco y lubricados....	109
4.4.1	Supuestos al variar calidad superficial y Carga.....	120
4.5	Discusión efecto de las superficies sobre los ensayos tribológicos.....	122
4.5.1	Efecto de calidad superficial en desgaste y coeficiente de fricción.....	122
<b>5.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>125</b>
5.1	Conclusiones.....	125
5.1.1	Sobre el análisis en campo .....	125
5.1.2	Sobre las pruebas de laboratorio .....	127
5.2	Recomendaciones.....	128
<b>A.</b>	<b>Anexo: Especificaciones teóricas y experimentales.....</b>	<b>133</b>

---

A.1 Reperfiladora del Metro de Medellín .....	133
A.2 Estrategias básicas de Reperfilado .....	135
A.3 Cálculo de Área de contacto y presión de contacto para un contacto cilíndrico propuesto por Hertz.....	136
A.4 Parámetros de Rugosidad.....	138
A.5 Área de contacto real modelo G&W .....	141
A.6 El porcentaje de deslizamiento .....	142
A.7 Montaje pruebas de reperfilado.....	143
<b>B. Anexo: Resultados Específicos .....</b>	<b>147</b>
B.1 Análisis estadístico de pruebas de reperfilado .....	147
B.1.1. Procedimiento GLM .....	148
B.1.2 Efectos principales de los factores velocidad y presión,yla interacción de los factores principales en las variables respuesta .....	159
B.2 Especificación de curvas.....	171
B.3 Cálculo área de contacto teórica y real .....	186
B.3.1 Área de contacto para ensayos 0%, 0.8GPa, en seco y lubricado .....	186
B.3.2 Área de contacto para ensayos 5%, 1.1GPa, en seco y lubricado .....	192
<b>Bibliografía .....</b>	<b>195</b>

## Lista de Figuras

<b>Figura I-5-1:</b> Desgaste y fatiga en el Metro de Medellín [2] .....	28
<b>Figura 1-1:</b> Esquema de reperfilado en el riel [12]. .....	30
<b>Figura 1-2:</b> Concepto de longitud de muestreo [20]. Perfil dividido en 5 secciones, de las cuales la primera y la última se descartan y en las 3 intermedias se promedian los valores de los parámetros obtenidos. ....	32
<b>Figura 1-3:</b> Definición gráfica de (a) <i>Skewness</i> (b) kurtosis (Mummary 1990) [22]. ....	35
<b>Figura 1-4:</b> Supuestos de contacto propuestos en el modelo de Greenwood y Williamson [26].....	36
<b>Figura 1-5:</b> Ilustraciones esquemáticas de desgaste comunes de fatiga de riel [1].....	37
<b>Figura 1-6:</b> Tasa "mágica" de desgaste [2].....	38
<b>Figura 1-7:</b> Cambio de rugosidad de la superficie sobre el riel debido al tráfico [40]. ....	43
<b>Figura 2-1:</b> Esquema metodológico para la investigación.....	47
<b>Figura 2-2:</b> Campo de estudio línea comercial. ....	48
<b>Figura 2-3:</b> Formas de Contacto rueda-riel.....	49
<b>Figura 2-4:</b> Esquema de diseño de montaje de pruebas de reperfilado.....	52
<b>Figura 2-5:</b> Montaje para pruebas de reperfilado en laboratorio. ....	52
<b>Figura 2-6:</b> Máquina disco-disco para ensayos a 0% de deslizamiento [60].....	57
<b>Figura 2-7:</b> Máquina Disco-Disco versión 2.0 (MDDv2) [61]. ....	59
<b>Figura 3-1:</b> Perfil de referencia de riel para medición con <i>Miniprof</i> . ....	65
<b>Figura 3-2:</b> Defectos más importantes en rieles encontrados en las inspecciones de campo.....	66
<b>Figura 3-3:</b> Detalles de las operaciones de reperfilado en el campo durante los últimos 10 años en la línea B del Metro de Medellín. ....	67
<b>Figura 3-4:</b> Clasificación general de tipo de daño por intervenciones de reperfilado. ....	68
<b>Figura 3-5:</b> Clasificación de curvas por frecuencia de reperfilado.....	71
<b>Figura 3-6:</b> Correlación: intervenciones de reperfilado, hilo alto y daño.....	72
<b>Figura 3-7:</b> Correlación: intervenciones de reperfilado, hilo bajo y daño.....	72



---

<b>Figura 3-8:</b> Correlación entre intervenciones e reperfilado, perfil de contacto HRC, hilo y tipo de daño. ....	73
<b>Figura 3-9:</b> Correlación entre intervenciones de reperfilado, perfil de contacto CPF, hilo y tipo de daño. ....	74
<b>Figura 3-10:</b> Correlación entre intervenciones de reperfilado, perfil de contacto CPC, hilo y tipo de daño.....	74
<b>Figura 3-11:</b> Correlación entre intervenciones de reperfilado por fatiga, perfil de contacto y peralte. ....	75
<b>Figura 3-12:</b> Correlación entre intervenciones de reperfilado por fatiga, perfil de contacto y radio de curvatura.....	76
<b>Figura 3-13:</b> Correlación entre intervenciones de reperfilado por corrugación, perfil de contacto y peralte. ....	77
<b>Figura 3-14:</b> Correlación entre intervenciones de reperfilado por corrugación, perfil de contacto y radio. ....	77
<b>Figura 3-15:</b> Correlación entre frecuencias de Intervenciones de reperfilado, Fatiga, peralte, radio y material removido. a) Predomina daño por fatiga ante corrugación y b) daño solo de fatiga. ....	81
<b>Figura 3-16:</b> C8 HA a) promedio de material removido, b) curva de intervenciones de reperfilado, c) curva de desgaste. ....	83
<b>Figura 3-17:</b> C5 HA. a) promedio de material removido, b) curva de intervenciones de reperfilado, c) curva de desgaste. ....	84
<b>Figura 3-18:</b> Correlación entre frecuencias de Intervenciones de reperfilado, corrugación, peralte, radio y material removido. a) daño predominante corrugación ante fatiga y b) daño sólo de corrugación. ....	85
<b>Figura 3-19:</b> C1 HB. a) promedio de material removido, b) curva de intervenciones de reperfilado, c) curva de desgaste. ....	87
<b>Figura 3-20:</b> C1 HB, a) medida de RMS, b)% Excedencia.....	88
<b>Figura 3-21:</b> Perfiles de desgaste para C1HB tomados con Miniprof en diferentes fechas. ....	89
<b>Figura 4-1:</b> Imágenes de SEM y del Microscopio óptico de las superficies corte transversal.....	97
<b>Figura 4-2:</b> Análisis estadístico para pruebas de reperfilado.....	98
<b>Figura 4-3:</b> Parámetros de rugosidad de diferentes procedimientos de reperfilado [2, 67]. ....	100

<b>Figura 4-4:</b> Imágenes de capa blanca encontrada en campo en la superficie capa sub-superficial blanca (1) y capa deformada (2). .....	101
<b>Figura 4-5:</b> Superficies desgastadas de riel. a) Antes del ensayo tribológico, b) después de ensayo tribológico. ....	104
<b>Figura 4-6:</b> Superficies desgastadas de rueda. ....	104
<b>Figura 4-7:</b> Perfiles de rugosidad para riel antes y después de ensayo tribológicos. ....	105
<b>Figura 4-8:</b> Perfiles de rugosidad para riel antes y después de ensayo tribológicos. ....	106
<b>Figura 4-9:</b> Coeficientes de fricción para las diferentes superficies ensayadas a 10.000 ciclos, en seco, 0% de deslizamiento y 0.8GPa. ....	107
<b>Figura 4-10:</b> Curvas de coeficientes de fricción para las diferentes superficies ensayadas a 10.000 ciclos, en seco, 0% de deslizamiento y 0.8GPa. ....	107
<b>Figura 4-11:</b> Pérdida de masa para las diferentes superficies ensayadas a 10.000 ciclos, en seco, 0% de deslizamiento y 0.8GPa. ....	108
<b>Figura 4-12:</b> Perfiles de rugosidad para ensayos a 14.000 ciclos en seco y lubricado, 5% de deslizamiento y 1.1GPa. ....	111
<b>Figura 4-13:</b> Superficies desgastadas para ensayos en seco y lubricado, 5% de deslizamiento y 1.1GPa. ....	113
<b>Figura 4-14:</b> Imágenes de SEM longitudinal para superficies antes y después de ensayos en seco y lubricado, 5% de deslizamiento y 1.1GPa. ....	115
<b>Figura 4-15:</b> Imágenes de SEM y en microscopio óptico corte transversal para superficies antes y después de ensayos en seco y lubricado, 5% de deslizamiento y 1.1GPa. ....	116
<b>Figura 4-16:</b> Coeficiente de fricción para superficies ensayos en seco y lubricado, 5% de deslizamiento y 1.1GPa. ....	117
<b>Figura 4-17:</b> Curvas de coeficientes de fricción para ensayos en seco y lubricado, 5% de deslizamiento y 1.1GPa. ....	118
<b>Figura 4-18:</b> Pérdida de masa para ensayos en seco y lubricado, 5% de deslizamiento y 1.1GPa. ....	119
<b>Figura 4-19:</b> Pérdida de masa por ciclos para ensayos en seco y lubricado, 5% de deslizamiento y 1.1GPa. ....	119
<b>Figura 4-20:</b> Pérdida de masa después de ensayos tribológicos realizados en el proyecto Metro a 1.1GPa y 5% de deslizamiento, superficies "lisas". ....	123

<b>Figura C-5-1:</b> Esquema General de mecanismo de desgaste para el sistema rueda-riel del Metro de Medellín. ....	126
<b>Figura R-5-2:</b> Selección de acero grado basada en radios de curva [77]. ....	132
<b>Figura A-5-3:</b> Máquina reperfiladora de rieles. ....	133
<b>Figura A-5-4:</b> Reperfilado en campo. ....	133
<b>Figura A-5-5:</b> Contacto cilíndrico Hertz. ....	136
<b>Figura A-5-6:</b> Imágenes teóricas de los parámetros de rugosidad. ....	138
<b>Figura A-5-7:</b> Proporción de materiales calculado sobre la curva de Abbott-Firestone [20]. ....	140
<b>Figura A-5-8:</b> Construcción gráfica de parámetros [21]. ....	140
<b>Figura A-5-9:</b> Volumen de retención de aceite [20]. ....	141
<b>Figura A-5-10:</b> Pasos montaje de pruebas de reperfilado. ....	143
<b>Figura A-5-11:</b> Alienación del contacto de la piedra con la probeta. ....	144
<b>Figura A-5-12:</b> Ajuste de presión en el montaje. ....	144
<b>Figura A-5-13:</b> Ubicación de dispositivos en el montaje. ....	145
<b>Figura A-5-14:</b> Planos dispositivo unión entre celda de carga, motor, probeta y mesa. ....	145
<b>Figura B-5-15:</b> Ra: efectos principales P y V, interacción PV. ....	160
<b>Figura B-5-16:</b> Rt: efectos principales P y V, interacción PV. ....	160
<b>Figura B-5-17:</b> Rtm: : efectos principales P y V, interacción PV. ....	161
<b>Figura B-5-18:</b> Rpm: efectos principales P y V, interacción PV. ....	161
<b>Figura B-5-19:</b> Rvm: efectos principales P y V, interacción PV. ....	162
<b>Figura B-5-20:</b> Rv: efectos principales P y V, interacción PV. ....	162
<b>Figura B-5-21:</b> Rku: efectos principales P y V, interacción PV. ....	163
<b>Figura B-5-22:</b> Rz: efectos principales P y V, interacción PV. ....	163
<b>Figura B-5-23:</b> RyJS efectos principales P y V, interacción PV. ....	164
<b>Figura B-5-24:</b> RzJS efectos principales P y V, interacción PV. ....	164
<b>Figura B-5-25:</b> Rmax efectos principales P y V, interacción PV. ....	164
<b>Figura B-5-26:</b> RHSC efectos principales P y V, interacción PV. ....	165
<b>Figura B-5-27:</b> Rpc efectos principales P y V, interacción PV. ....	165
<b>Figura B-5-28:</b> Rda: efectos principales P y V, interacción PV. ....	166
<b>Figura B-5-29:</b> Rdq: efectos principales P y V, interacción PV. ....	166
<b>Figura B-5-30:</b> RSm: efectos principales P y V, interacción PV. ....	167
<b>Figura B-5-31:</b> Rk efectos principales P y V, interacción PV. ....	167
<b>Figura B-5-32:</b> Rp: efectos principales P y V, interacción PV. ....	168

<b>Figura B-5-33:</b> Rpk: efectos principales P y V, interacción PV. ....	168
<b>Figura B-5-34:</b> Rvk: efectos principales P y V, interacción PV. ....	169
<b>Figura B-5-35:</b> Mr1%: efectos principales P y V, interacción PV. ....	169
<b>Figura B-5-36:</b> Mr2%: efectos principales P y V, interacción PV. ....	169
<b>Figura B-5-37:</b> Rmr%: efectos principales P y V, interacción PV.....	170
<b>Figura B-5-38:</b> Rq: efectos principales P y V, interacción PV. ....	170
<b>Figura B-5-39:</b> Rsk: efectos principales P y V, interacción PV. ....	171
<b>Figura B-5-40:</b> C1 HA a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste. .....	171
<b>Figura B-5-41:</b> C1 HB a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste. .....	172
<b>Figura B-5-42:</b> C1 HB. a) RMS $\mu\text{m}$ , b)% excedencia .....	172
<b>Figura B-5-43:</b> C2 HA. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste. .....	172
<b>Figura B-5-44:</b> C2 HB. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste. .....	173
<b>Figura B-5-45:</b> C2 HB. a) RMS $\mu\text{m}$ , b)% excedencia .....	173
<b>Figura B-5-46:</b> C3 HA. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste. .....	173
<b>Figura B-5-47:</b> C3 HB. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste. .....	174
<b>Figura B5-48:</b> C3 HB. a) RMS $\mu\text{m}$ , b)% excedencia.....	174
<b>Figura B-5-49:</b> C4 HA. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste. .....	174
<b>Figura B-5-50:</b> C4 HB. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste. .....	175
<b>Figura B-5-51:</b> C5 HA. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste. .....	175
<b>Figura B-5-52:</b> C5 HA. a) RMS $\mu\text{m}$ , b)% excedencia. ....	175
<b>Figura B-5-53:</b> C5 HB. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste. .....	176

**Figura B-5-54:** C6 HA. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste. ....176

**Figura B-5-55:** C6 HB. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste. ....176

**Figura B-5-56:** C7 HA. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste. ....177

**Figura B-5-57:** C7 HB. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste. ....177

**Figura B-5-58:** C8 HA. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste. ....177

**Figura B-5-59:** C8 HB. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste. ....178

**Figura B-5-60:** C9 HA. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste. ....178

**Figura B-5-61:** C9 HB. a) RMS  $\mu\text{M}$ , b)% excedencia. ....178

**Figura B-5-62:** C9 HB. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste. ....179

**Figura B-5-63:** C11 HA. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste. ....179

**Figura B-5-64:** C11 HB. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste. ....179

**Figura B-5-65:** C11 HB. a) RMS  $\mu\text{M}$ , b)% excedencia. ....180

**Figura B-5-66:** C12 HA. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste. ....180

**Figura B-5-67:** C12 HB. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste. ....180

**Figura B5-68:** C12 HB. a) RMS  $\mu\text{m}$ , b)%excedencia. ....181

**Figura B-5-69:** C13 HA. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste. ....181

**Figura B-5-70:** C13 HB. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste. ....181

**Figura B-5-71:** C14 HA. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste. ....182

<b>Figura B-5-72:</b> C14 HB. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste. .....	182
<b>Figura B-5-73:</b> C15 HA. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste .....	182
<b>Figura B-5-74:</b> C15 HB. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste. .....	183
<b>Figura B-5-75:</b> C16 HA. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste. .....	183
<b>Figura B-5-76:</b> C16 HB. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste. .....	183
<b>Figura B-5-77:</b> C18 HA. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste. .....	184
<b>Figura B-5-78:</b> C18 HB. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste. .....	184
<b>Figura B-5-79:</b> C19 HA. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste. .....	184
<b>Figura B-5-80:</b> C19 HB. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste. .....	185
<b>Figura B-5-81:</b> C20 HA. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste. .....	185
<b>Figura B-5-82:</b> C20 HB. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste. .....	185
<b>Figura B-5-83:</b> C22 HA. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste. .....	186

## Lista de Tablas

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1-1:</b> Definiciones de algunos parámetros de rugosidad [17].	33
<b>Tabla 2-1:</b> Formas de contacto rueda-riel según radios de curva.	49
<b>Tabla 2-2:</b> Perfiles NRC para cada curva de la Línea B.	50
<b>Tabla 2-3:</b> Composición química y propiedades mecánicas del riel utilizado en los ensayos [61].	53
<b>Tabla 2-4:</b> Diseño de experimentos pruebas de reperfilado.	54
<b>Tabla 2-5:</b> Diseño de experimentos ensayos tribológicos para condición de simulación de recta.	55
<b>Tabla 2-6:</b> Diseño de experimentos ensayos tribológicos para condición de simulación de curva.	56
<b>Tabla 3-1:</b> Perfiles NRC para cada curva de la Línea B del Metro de Medellín.	64
<b>Tabla 3-2:</b> Especificaciones de las curvas de la línea B del Metro de Medellín.	64
<b>Tabla 3-3:</b> Clasificación de Mecanismos de desgaste.	65
<b>Tabla 3-4:</b> Clasificación de curvas por frecuencias de reperfilado.	69
<b>Tabla 3-5:</b> Porcentajes de daños principales (fatiga y corrugación) en función de las características de diseño de la vía.	78
<b>Tabla 3-6:</b> Promedio de material removido y desgaste para cada curva.	79
<b>Tabla 4-1:</b> Parámetros de rugosidad y dureza obtenidos para los diferentes ensayos.	96
<b>Tabla 4-2:</b> Parámetros de rugosidad significativos para los ensayos.	98
<b>Tabla 4-3:</b> Parámetros de rugosidad y dureza antes de ensayos a 10.000 ciclos en seco, 0% de deslizamiento y 0.8GPa.	102
<b>Tabla 4-4:</b> Parámetros de rugosidad y dureza después de ensayo en seco, 0% de deslizamiento y 0.8GPa.	103
<b>Tabla 4-5:</b> Parámetros de rugosidad para ensayos a 14.000 ciclos en seco y lubricado, 5% de deslizamiento y 1.1GPa.	110

<b>Tabla 4-6:</b> Cálculos de área y presión de contacto mediante Modelo de Greenwood - Williamson para E4 3724N.....	120
<b>Tabla 4-7:</b> Cálculos de área y presión de contacto mediante Modelo de Greenwood - Williamson para Superficie reperfilada del ensayo 5% y 1.1GPa, carga 1470N. ....	121
<b>Tabla R-5-1:</b> Recomendación.....	131
<b>Tabla A-5-2:</b> Especificaciones generales máquina reperfiladora del Metro de Medellín[10]. ....	134
<b>Tabla B-5-3:</b> Datos tomados para el análisis estadístico. ....	147
<b>Tabla B-5-4:</b> Área teórica por método de Hertz. ....	186
<b>Tabla B-5-5:</b> Área real por método de G&W para superficie E1. ....	187
<b>Tabla B-5-6:</b> Área real por método de G&W para superficie E2. ....	188
<b>Tabla B-5-7:</b> Área real por método de G&W para superficie E3. ....	189
<b>Tabla B-5-8:</b> Área real por método de G&W para superficie E4. ....	190
<b>Tabla B-5-9:</b> Área real por método de G&W para superficie E5. ....	191
<b>Tabla B-5-10:</b> Cálculos de área y presión de contacto mediante la teoría de contacto de Hertz para ensayos en seco y lubricado, 5% de deslizamiento y 1.1GPa. ....	192
<b>Tabla B-5-11:</b> Cálculos de área y presión de contacto mediante Modelo de Greenwood - Williamson para superficie reperfilada para ensayos 5% y 1.1 GPa.....	193
<b>Tabla B-5-12:</b> Cálculos de área y presión de contacto mediante Modelo de Greenwood - Williamson para superficie sin reperfilar para ensayos 5% y 1.1 GPa. ....	194



## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Estudiar los efectos del proceso de reperfilado sobre el desgaste de rieles en el sistema rueda-riel del Metro de Medellín.

### **Objetivos específicos**

Identificar las variables principales del proceso de reperfilado actual de rieles en el Metro de Medellín.

Diseñar un experimento de reperfilado en laboratorio e identificar las principales características superficiales del riel al variar los parámetros de reperfilado.

Identificar los parámetros de reperfilado que tienen un efecto significativo sobre el desgaste de rieles en pruebas de laboratorio usando máquina disco-disco.



# Introducción

Una de las preguntas fundamentales en el mantenimiento de sistemas rueda-riel es ¿Cuál estrategia de reperfilado debe aplicarse y/o desarrollarse para reducir el desgaste y fatiga de contacto (RCF) en sistemas férreos?

Para abordar esta pregunta es necesario identificar las investigaciones que han pretendido responderla. Estas investigaciones muestran unas nuevas estrategias de reperfilado para sistemas férreos en Europa, Japón y otros, desarrolladas con base en las condiciones de operación específicas de cada sistema férreo, puesto que cada sistema rueda-riel tiene condiciones específicas de operación como lo son la carga, velocidades, tonelaje anual, lubricación, tipo de material y condiciones ambientales.

De acuerdo con lo anterior, se hace necesario estudiar el efecto del proceso de reperfilado en el riel para las condiciones específicas de operación del Metro de Medellín. Para ello se requiere modificar variables de operación de reperfilado, como el tipo de muela abrasiva, la velocidad de avance y la presión, aspectos estos que influyen en la superficie de contacto, con el fin de obtener una mejor estrategia de reperfilado que sea adecuada en los rieles.

En este contexto, la investigación sobre tribología es fundamental para comprender y optimizar la interfaz rueda-riel. Las investigaciones en curso se refieren a modelos de mecanismos de desgaste, desarrollo y aplicación de modificadores de fricción para combatir la corrugación, el ruido y para mejorar las características de tracción [1, 2, 3, 4, 5].

Así pues, como consecuencia, las investigaciones que se han desarrollado en sistemas férreos para mitigar tanto el desgaste como la RCF son a partir del mantenimiento. El mantenimiento desde la aplicación de lubricantes con modificadores de fricción, y el mantenimiento a partir del proceso de reperfilado correctivo y preventivo; esto con el fin de obtener ciclos de vida mayores en los componentes en contacto rueda-riel.

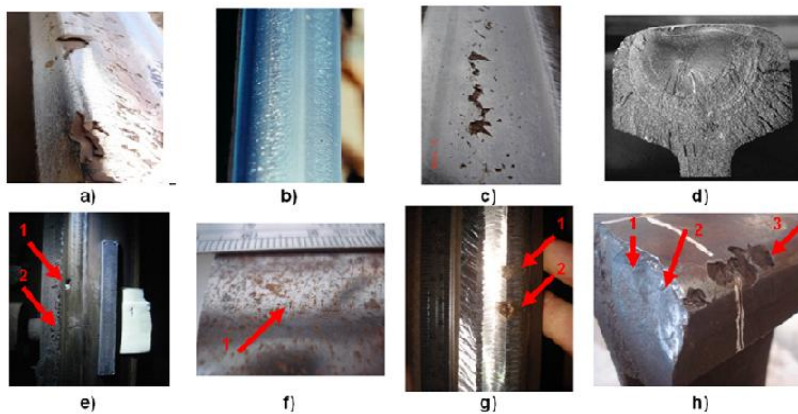
En el problema específico de reducción de desgaste y RCF, el mantenimiento a partir del proceso de reperfilado es un componente crítico puesto que permite una optimización del

perfil así como la eliminación de defectos superficiales asociados a RCF y corrugación. De acuerdo con lo anterior este proceso también ayuda a controlar el ruido y mejora las condiciones de operación [1, 6].

El sistema Metro de Medellín tiene problemas de desgaste ondulatorio relacionados con las condiciones de funcionamiento, primer problema detectado hace ya varios años. Sin embargo, el problema se ha controlado mediante la reducción del tiempo medio de reperfilado de rieles en algunas curvas cerradas y con el cambio de rieles en casos críticos. Otro problema común del sistema es la fatiga. Los tipos de desgaste y fatiga presentes en el metro de Medellín se pueden ver en la Figura I-1-1 [2].

En todo caso, pretendiendo solucionar las problemáticas específicas expuestas en las líneas inmediatamente anteriores, a continuación se hace emerger la particularidad del sistema Metro de la ciudad de Medellín, que requiere por lo demás tener un programa de mantenimiento no correctivo sino más bien preventivo, como punta de lanza de un sistema, que a futuro, haga las veces de un sistema predictivo, en pro de alargar la vida útil de los rieles del sistema.

**Figura I-5-1:** Desgaste y fatiga en el Metro de Medellín [2]



# 1. De ideas y teorías actuales...

## 1.1 Reperfilado

El reperfilado es un proceso de mantenimiento correctivo y preventivo que se realiza tanto en ruedas como en rieles, como su nombre lo indica consiste en dar de nuevo el perfil que ha sido modificado por mecanismos de desgaste en el contacto rueda-riel, específicamente para remover parte de la superficie que presenta grietas y corregir el desgaste ondulatorio o corrugación, antes de que los daños sean severos. El proceso de reperfilado es un desgaste artificial, cuyo mecanismo es la abrasión, este mecanismo, también es llamado *grinding* o amolado o esmerilado. El reperfilado hace referencia a una operación de pulido del riel, necesaria para eliminar grietas antes de que alcancen una longitud en la cual su tasa de crecimiento se dispara y en unos pocos ciclos podrían causar la fractura total del riel [7, 8, 9, 10]. En el Anexo A.1 se muestra información sobre la reperfiladora del Metro de Medellín y en el Anexo A.2 se describen algunas estrategias básicas de reperfilado llevadas a cabo en dicha empresa.

## 1.2 Reperfilado de Rieles

El proceso de reperfilado de rieles consiste en quitar material de modo puntual y preciso en la cabeza de los rieles, con una piedra que tiene diferentes tamaños de grano con la que se hace el desgaste abrasivo superficial. Así pues, un reperfilado de calidad consiste en quitar exactamente la cantidad justa de material y en el lugar adecuado. El reperfilado es una tecnología de mecanizado abrasivo, que se ha convertido en uno de los más utilizados en el mecanizado industrial y de las operaciones de acabado de superficie. El mecanizado abrasivo hace hincapié en los principios físicos subyacentes, tales como parámetros de reperfilado, los mecanismos de absorción, las características abrasivas,

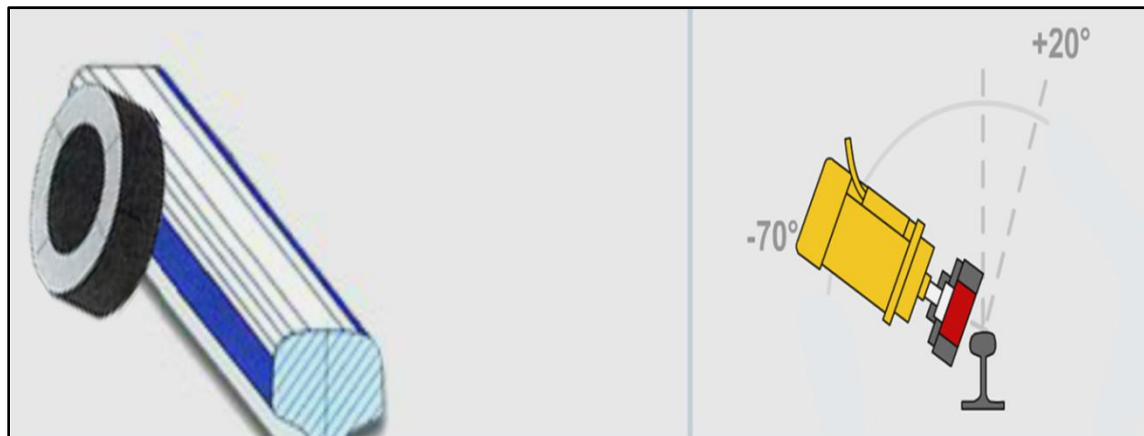
la eficiencia económica, el tipo de material, las máquinas rectificadoras y la calidad de la superficie [11, 12, 13].

Muelas o piedras de esmerilado: El resultado y la calidad del reperfilado dependen en gran medida de la calidad de las muelas. Se busca obtener una capacidad máxima de abrasión de metal y una duración elevada.

Las muelas deben ser capaces de trabajar en distintos puntos de la cabeza del riel, con superficies de apoyo y presiones de aplicación variables.

Unidades de reperfilado: Las unidades de reperfilado pueden ser orientadas alrededor de la cabeza del riel sobre un amplio sector. El ángulo de inclinación deseado puede regularse para una operación determinada y los motores pueden concentrarse sobre las superficies donde debe eliminarse material. El perfil deseado es alcanzado bajo la forma de un polígono, con una superposición de las diferentes caras, permitiendo finalmente la realización de cualquier perfil deseado [12].

**Figura 1-1:** Esquema de reperfilado en el riel [12].



### 1.3 Mecánica del contacto

Los cuerpos entran en contacto a través de superficies. La superficie de un cuerpo sólido es una discontinuidad, con características diferentes a las del material en la zona interna del cuerpo [14].

La mecánica del contacto es un área que permite, entre otras cosas, modificar parámetros de acabado de superficies para obtener mejores condiciones de operación

tribológica. La teoría clásica de contacto elástico fue desarrollada por Hertz (1882) cuando tenía 24 años y era un asistente de investigación en la Universidad de Berlín. La teoría de Hertz es estrictamente limitada a superficies lisas y sólidos perfectamente elásticos, pero todavía proporciona un valioso punto de partida para la mayoría de problemas de contacto y está incluida en numerosos programas de computadora que se ocupan de contacto rueda-riel [1, 15, 16, 17, 18]. Las ecuaciones más ampliamente utilizadas en mecánica de contacto se derivaron de los trabajos de Hertz y se aplican a los contactos normalmente cargados entre sólidos con superficies lisas que, en la zona cercana a la región de contacto, pueden ser descritas por polinomios de segundo orden [1]. Los supuestos para aplicar la teoría de Hertz son: los materiales de los elementos involucrados en el contacto son homogéneos e isotrópicos, las fuerzas aplicadas sobre los cuerpos crean en la zona de contacto sólo deformaciones elásticas sujetas a la ley de Hooke, las fuerzas son normales a las superficies de contacto, y el área de contacto es pequeña comparada con la superficie de los elementos en contacto. En el [Anexo A.3](#) se describe el contacto cilíndrico dado por Hertz más utilizado para hallar presiones y áreas de contacto en ensayos tribológicos rueda-riel, por la geometría de las probetas utilizadas.

## 1.4 Textura y rugosidad superficial

La rugosidad de superficie es el componente de textura de la superficie dada por un proceso de mecanizado y/o producción, pero excluyendo la ondulación y desviación de la forma.

De acuerdo con lo anterior, las superficies en contacto pueden tener un aspecto suave, pero en una escala microscópica pueden ser ásperos. Al estar las superficies en contacto, en rodadura, deslizamiento y carga, el contacto se realizará en los picos de rugosidad de las superficies donde el área de contacto puede ser mucho menor que el área aparente o nominal. Para darse deslizamiento de una superficie sobre otra, una fuerza tiene que aplicarse y por ende las rugosidades en contacto pueden tener un aplastamiento y si hay presencia de adhesión una ruptura. Es por ello, que la rugosidad de las superficies en contacto del sistema rueda-riel es un factor importante para tener una mayor durabilidad.

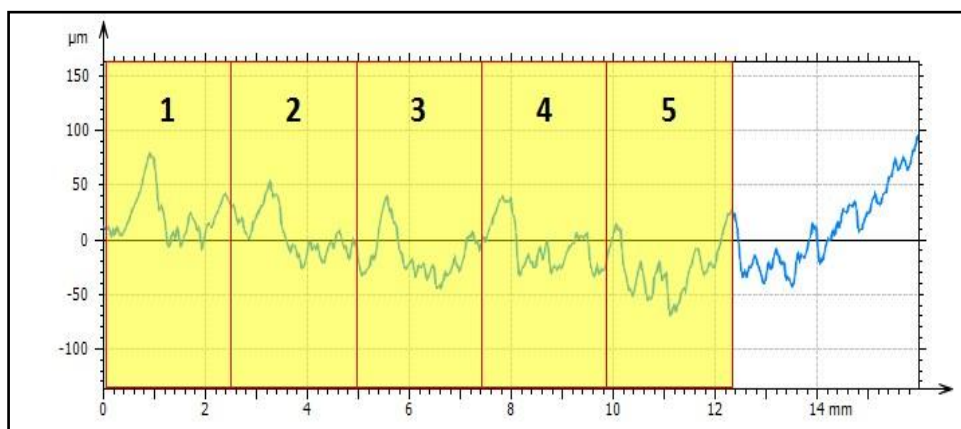
La textura de la superficie de los componentes mecánicos ha sido considerada hace más de 80 años con el fin de mejorar el rendimiento de los productos manufacturados. Durante mucho tiempo, sólo un parámetro era conocido y utilizado, bajo el nombre **Ra** (rugosidad media). Luego vinieron RMS o Rq, Rz y Rmáx, y más tarde muchos más parámetros [19, 20].

Hoy en día, los parámetros de textura superficial se definen en un puñado de estándares internacionales que a veces tienen las variaciones locales debido a las normas nacionales o sectoriales. 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 [20].

- **Longitud de muestreo vs Longitud de evaluación**

Con el fin de superar los problemas que surgen en las primeras zonas del perfil, tales como el ruido o la falta de repetitividad, algunos parámetros están destinados a ser calculados en base a segmentos de perfil (longitudes de muestreo) y estos se promedian. La longitud de muestreo se define generalmente como la longitud de corte ( $\lambda_c$ ) del filtro utilizado para la rugosidad y ondulación separada. Los detalles figuran en la norma ISO 4288 [20].

**Figura 1-2:** Concepto de longitud de muestreo [20]. Perfil dividido en 5 secciones, de las cuales la primera y la última se descartan y en las 3 intermedias se promedian los valores de los parámetros obtenidos.





- **Algunos parámetros de rugosidad relevantes**

La rugosimetría es la medición de una dimensión que genera parámetros de rugosidad superficial como **R<sub>a</sub>** (rugosidad aritmética media), **R<sub>q</sub>** (rugosidad media cuadrática) y **R<sub>t</sub>** (distancia pico-valle), algunos de estos parámetros están definidos en la Tabla 1-1 y se explican en detalle en esta sección, mientras que otros se presentan en el [Anexo A.4](#).

**Tabla 1-1:** Definiciones de algunos parámetros de rugosidad [17].

Símbolo	Nombre	Definición
R <sub>a</sub>	Rugosidad Media	$\frac{1}{L} \int_0^L  z  dx$
R <sub>máx</sub>	Máximo pico a valle	Mayor longitud de pico a valle en cinco longitudes de muestreo continuo.
R <sub>q</sub>	Rugosidad RMS	$\sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L z^2 dx}$
R <sub>t</sub>	Altura de pico a valle	Separación del pico más alto y el valle más bajo
R <sub>z</sub> (DIN)	Altura media de pico a valle	promedio de los valores individuales R <sub>t</sub> en cinco longitudes de muestreo contiguas
R <sub>z</sub> (ISO)	10 puntos de altura	Separación media de los cinco picos más altos y los cinco valles más bajos dentro de la longitud de muestreo simple.

**R<sub>a</sub>**, desviación media aritmética del perfil evaluado: se utiliza como una evaluación global de la amplitud de rugosidad en un perfil. No dice nada sobre la frecuencia espacial de las irregularidades o la forma del perfil. R<sub>a</sub> es significativa en análisis aleatorio (estocástico) cuando la rugosidad superficial se obtiene por mecanizado con herramientas que no dejan marcas en la superficie, como *sandblasting*, fresado y pulido.

Rq, desviación cuadrática media del perfil evaluado: corresponde a la desviación estándar de la distribución de la altura, que se define en la longitud de muestreo. Rq proporciona fundamentalmente la misma información que Ra.

Rt, altura total del perfil: altura entre el valle más profundo y el pico más alto del perfil medido.

Rp, máxima altura de pico: altura del pico más alto de perfil medido.

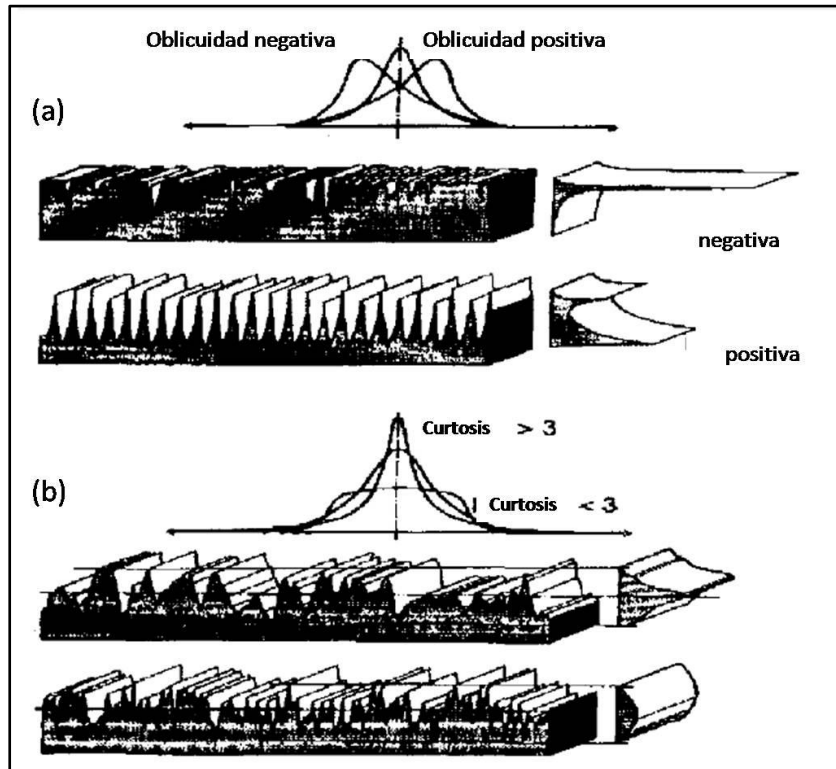
Rv, máxima profundidad de valle: la profundidad del valle más profundo del perfil medido.

Rz, altura máxima del perfil: este parámetro se utiliza con frecuencia para comprobar si el perfil que sobresale hay picos que podrían afectar estática o de deslizamiento función de contacto.

Rsk, la asimetría del perfil de evaluado: la asimetría de la distribución de la altura. Este parámetro es importante ya que proporciona información sobre la morfología de la textura de la superficie. Los valores positivos corresponden al caso en que los altos picos se extienden sobre una superficie regular, mientras que los valores negativos se encuentran en las superficies con poros y arañazos. Por lo tanto, es interesante cuando se requieren funciones de contacto o de lubricación. Este parámetro no da ninguna información sobre la altura absoluta del perfil, al contrario de Ra.

Rku, *kurtosis* del perfil evaluado: Este parámetro expresa el valor medio de la cuarta potencia de las alturas de picos y profundidades de valles con respecto a la línea media del perfil. Esto significa que la *kurtosis* informa sobre la distribución de picos y valles de una superficie y gráficamente indica la agudeza de la función de distribución de alturas. Para una función de distribución de alturas normal (*Gaussiana*) el valor de Rku es 3 [21].

**Figura 1-3:** Definición gráfica de (a) *Skewness* (b) *kurtosis* (Mummary 1990) [22].



## 1.5 Área Real de Contacto

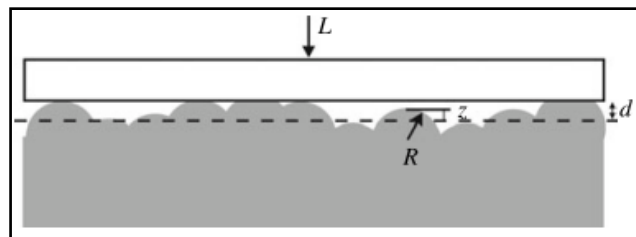
Greenwood y Williamson [14, 17, 23, 24] desarrollaron un modelo hoy considerado clásico y fundamental para el análisis de contacto entre sólidos. El modelo establece criterios para determinar la magnitud del área real de contacto entre sólidos considerando superficies nominalmente lisas (formas geométricas simples) pero con una textura superficial definida, representada por los parámetros de rugosidad adecuados. El área total de contacto es la suma de varias áreas de contacto individuales, de manera que la aproximación al problema es estadística y se fundamenta en la estimación de la cantidad efectiva de asperezas en contacto. En esta teoría es fundamental relacionar la carga aplicada, las propiedades de los materiales en contacto ( $E$ ,  $\nu$ ) y el área real de contacto dada por parámetros de la textura de las superficies. Esta relación permite analizar la fricción y el desgaste durante el contacto de los cuerpos.

Para aplicar el modelo de Greenwood y Williamson en su formulación básica se asumen los siguientes criterios:

Una de las superficies involucradas en el contacto es un plano indeformable y la otra es una superficie rugosa elásticamente deformable.

Se asume que las asperezas de la superficie rugosa, presentan forma esférica, todas con el mismo radio de curvatura  $R$ , tal como se muestra en la Figura 1-4. Las alturas de las asperezas varían de forma aleatoria, ya sea con una distribución Gaussiana o cualquiera otra de las alturas de los picos. Las ecuaciones y parámetros para estimar el área real de contacto se presentan en el [Anexo A.5](#).

**Figura 1-4:** Supuestos de contacto propuestos en el modelo de Greenwood y Williamson [26].



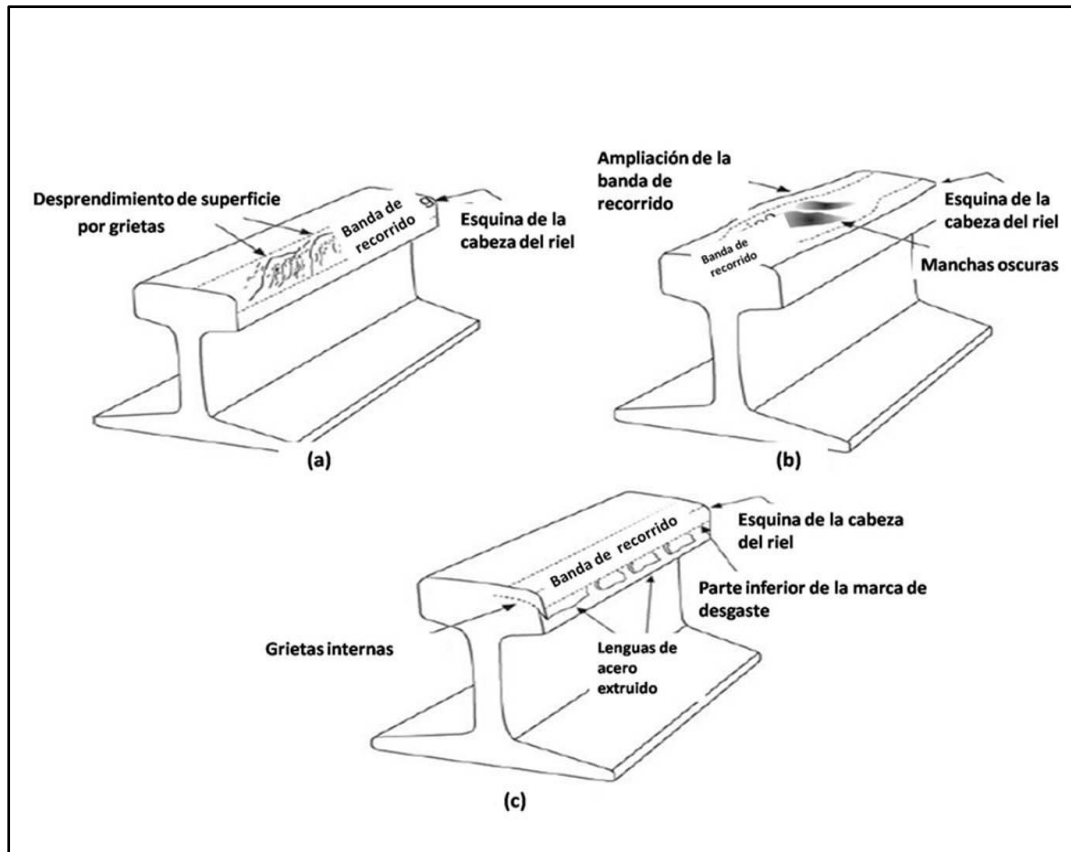
Greenwood y Williamson demostraron que el área real de contacto puede determinarse con la presión media y el número de asperezas en contacto con las ecuaciones (1.5.1) y (1.5.2) respectivamente. Para un contacto de tipo elástico entre una superficie plana y una superficie rugosa se tiene [25, 26]:

$$A_r = \left(\frac{\pi R}{\sigma}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{L}{E_c}\right) \quad (1.5.1)$$

$$P_m = \frac{L}{A_r} \quad (1.5.2)$$

## 1.6 Desgaste

El desgaste es la pérdida de material de una superficie de contacto. Un material puede desgastarse por diferentes mecanismos como la adhesión, la abrasión, desgaste triboquímico y la fatiga de superficie. En el sistema rueda-riel el desgaste está determinado por las tensiones normales y tangenciales en la zona de contacto y la velocidad de deslizamiento. En la Figura 1-5 siguiente se pueden apreciar los diferentes mecanismos.

**Figura 1-5:** Ilustraciones esquemáticas de desgaste comunes de fatiga de riel [1].

### 1.6.1 Fatiga por Contacto Rodante

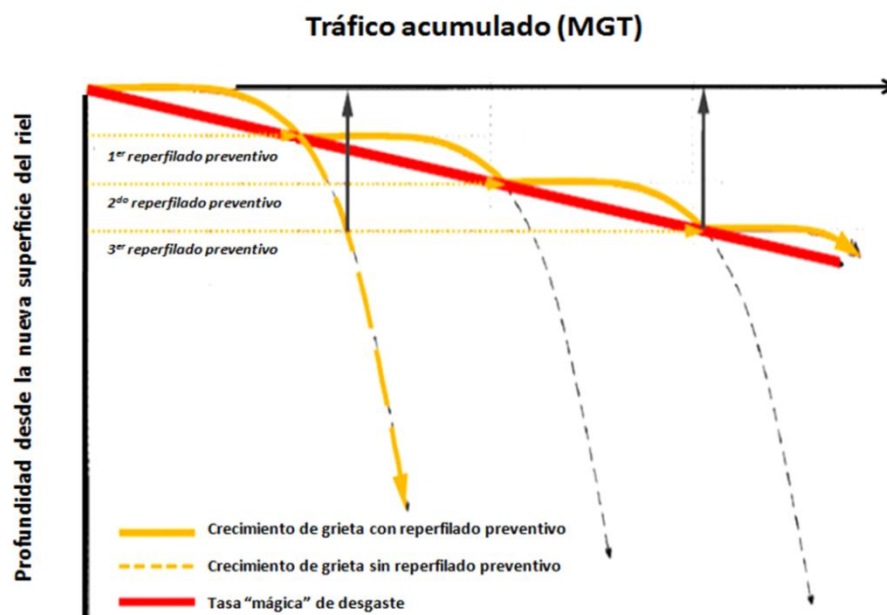
Una causa importante de falla en componentes sometidos a contacto rodante o rodante/deslizante (rodamientos, engranajes, cojinetes, rueda-riel) es la fatiga por contacto rodante (*Rolling Contact Fatigue* -RCF), la cual se puede definir como el mecanismo de propagación de grietas causado por la alteración del campo de esfuerzos sub-superficial dentro cuerpos en contacto rodante.

En sistemas rueda-riel el proceso de fatiga se presenta muy rápido, ya que las grandes cargas localizadas en pequeñas áreas de contacto llevan a grandes deformaciones, y por tanto a la formación y crecimiento de grietas [7].

## 1.6.2 Tasa Mágica de Desgaste

Se refiere a la cantidad efectiva de metal que se elimina al considerar tanto el desgaste “natural” (debido al contacto rueda-riel) como el desgaste artificial (reperfilado) para optimizar la vida de servicio de los rieles. Esta tasa mágica es específica para cada sistema ferroviario, puesto que cada sistema tiene condiciones de operación propios como lo son la carga axial, la velocidad, el tonelaje anual, la lubricación, el tipo de material, el tipo de *boggie*, condiciones ambientales como temperatura y humedad, entre otros. En la Figura 1-6 se puede apreciar gráficamente el concepto de la tasa mágica, donde se puede ver que rieles con una tasa de desgaste superior a la tasa de desgaste óptima tendrán una vida útil por debajo de su potencial.

Figura 1-6: Tasa "mágica" de desgaste [2].



## 1.7 Estado actual

### 1.7.1 Grinding

Uno de los aspectos importantes es el contacto rueda-riel es la introducción del mantenimiento por reperfilado que también es conocido como *grinding*, esmerilado,

pulido o amolado. El reperfilado de rieles ha sido utilizado desde la década de 1980 para el mantenimiento óptimo de riel, así como la eliminación de defectos superficiales como corrugación (desgaste ondulatorio) y grietas en la zona de contacto. El proceso de reperfilado ha pasado de ser una técnica de eliminación de corrugación a una técnica de mantenimiento polivalente de alta tecnología, esto es, esta técnica ahora se utiliza para la corrección de perfil del riel, reducción de ruido y eliminación de fatiga por contacto. Actualmente se pueden agregar unidades de tren de reperfilado para aumentar la productividad del proceso [27, 28].

Así pues, los componentes fundamentales del mantenimiento de la interfaz rueda-riel son control de fricción, control de los perfiles de rueda y riel, control de desgaste y RCF [1]. Durante el tiempo se ha investigado en el cómo realizar y/o cuál es la estrategia del mantenimiento de los rieles efectiva, los planteamientos hasta ahora conocidos planteados y notificados por diferentes investigadores [27, 29], estos planteamientos son las relativas ventajas y desventajas de reperfilado como mantenimiento correctivo frente al reperfilado como mantenimiento preventivo. Las ventajas establecidas por las investigaciones son que mediante la adopción del mantenimiento preventivo por reperfilado, puede reducirse el volumen total del material eliminado y prolongar vida de riel ya que el reperfilado correctivo elimina sólo la capa endurecida por el trabajo dejando una superficie con acero blando y con algunas grietas que siguen presentes debido a que no se pueden quitar las grietas profundas. Por otro lado, cuando se utiliza un reperfilado de mantenimiento preventivo queda una superficie libre de grietas [1].

En este contexto, el reperfilado de rieles se ha convertido en una parte esencial del mantenimiento de las vías modernas. Si bien en el pasado el reperfilado fue una simple acción para eliminar irregularidades de superficie, ahora es una herramienta de mejora de eficiencia, un proceso que ha tenido enormes progresos recientemente. En primer lugar, el "*hardware*" de máquinas de reperfilado se ha desarrollado en dos formas: por un lado, las máquinas se han convertido en herramientas flexibles capaces de producir cualquier perfil deseado, sobre todos los tipos de perfiles de los rieles incluyendo áreas críticas en desvíos. Por otro lado, se han incorporado motores de mayor capacidad y se ha avanzado especialmente en el desarrollo de piedras lo cual ha multiplicado las tasas de producción, la capacidad y el aumento en la eliminación de metal.

Aún más llamativo es el desarrollo de "software" [30, 31]. Hoy en día, el pulido en las vías del riel se concentra en la alta productividad, con equipos modernos generalmente que incorporan un gran número de unidades que proporcionan alta producción minimizando el tiempo de mantenimiento en la vía, pues el software actualmente disponible tiene sistemas para monitorear continuamente los perfiles longitudinales y transversales del riel con perfiles que están estandarizados; además las máquinas tienen incorporados sistemas para la recolección de polvo y protección de chispa dada por la operación. Actualmente el desarrollo de nuevos materiales de piedras permite un tiempo de reperfilado efectivo y piedras de formas especiales, para asegurar el pulido en el perfil completo [13].

### **1.7.2 Reperfilado y Mecánica del Contacto**

La influencia de la rugosidad de la superficie en el rendimiento del contacto rueda-riel no ha sido bien investigada y aún no se conocen las consecuencias de rieles que tienen una superficie "burda". Hoy en Europa es común especificar una rugosidad máxima de la superficie con el valor de  $R_a=10\mu\text{m}$ , este valor también se ha aplicado en las especificaciones del proyecto de norma CEN EN 13231-3:2012 y se considera un valor aceptable entre la rugosidad de la superficie y eliminación de metal, pero no son abundantes (o al menos no de manera abierta) las investigaciones sobre la influencia de la rugosidad [1, 27, 28], esta norma europea especifica los requisitos técnicos y las mediciones para la aceptación de los trabajos para cambiar el perfil longitudinal y/o transversalmente para fines de aceptación. Esta norma se aplica a reperfilado de rieles de 46kg/m en adelante.

La situación actual de mantenimiento ferroviario en Europa se ha centrado en la eliminación de ondulación y la corrección simultánea del perfil de cabeza del riel en su sección transversal, por lo general llevado a cabo como una acción correctiva, pero con la aparición cada vez mayor de la fatiga por contacto rodante (RCF) en la última década, el mantenimiento ferroviario ha cambiado desde las intervenciones de reperfilado, haciéndolas más estratégicamente planificadas para asegurar la eliminación oportuna de la capa superficial de fatiga mediante la aplicación de perfiles diferentes del riel para



diferentes formas específicas de contacto reduciendo así las tensiones de contacto en la superficie [32, 33].

Hoy la optimización de la geometría del riel se ha convertido en parte integral del mantenimiento de las vías, con ello se ha implementado el reperfilado inicial para las nuevas líneas, que se ha contemplado dentro del mantenimiento preventivo y este reperfilado inicial se ha convertido en un estándar, una de las herramientas que tienen un gran potencial para el desarrollo del mantenimiento preventivo es basado principalmente en la experiencia y para llevar a cabo optimización de la eliminación de metal. Puesto que el reperfilado se ha convertido en una rutina y, por tanto, una técnica aplicada con frecuencia y repetidamente, el desgaste 'artificial' o el desgaste dado por el reperfilado debe mantenerse al mínimo y por ende debe pretender conseguir la vida de servicio más larga posible de los rieles.

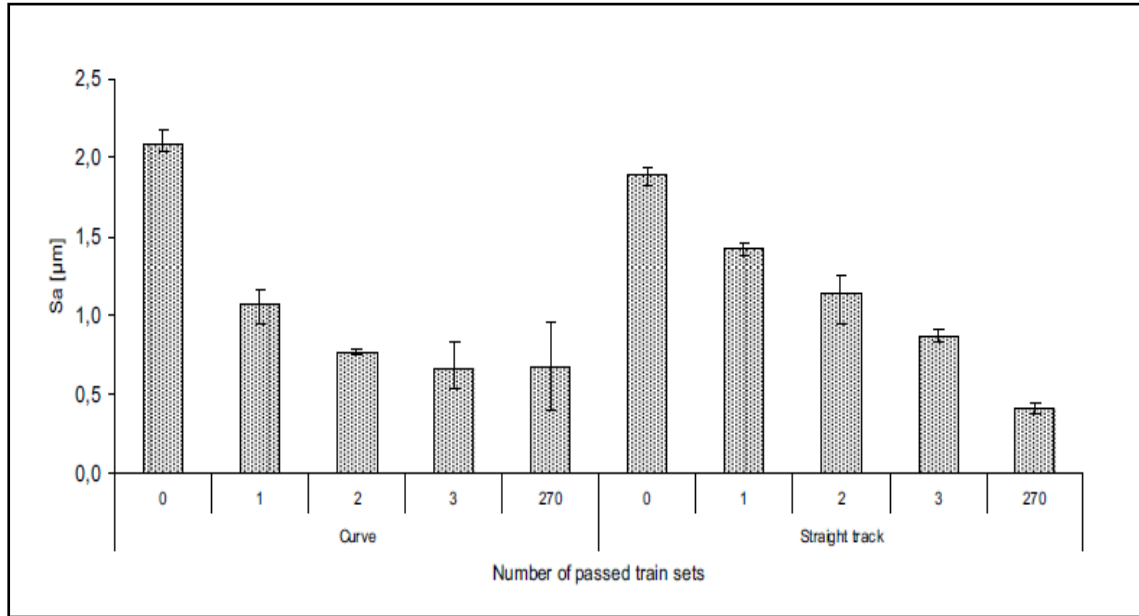
En este sentido, la innovación no significa necesariamente nuevos desarrollos o revolucionarios diseños, la innovación en este tiempo está enmarcada en la optimización de los equipos existentes y su aplicación requiere pensamiento innovador, puesto que desde la máquina el desarrollo se centra en el aumento de la productividad a través de mejoras en las piedras de reperfilar, mayor velocidad de trabajo y puesta a punto, esto acompañado por ejemplo de programas de simulación que ayudan a patrones de reperfilado óptimo de diseño, que permiten una selección de patrón semiautomática, mientras que el operador se concentra más en el control de calidad. Otro foco actual es la elaboración de perfiles de contacto optimizado para ruedas específicas (desgaste adaptado en perfiles), reducción de fatiga, reducción de desgaste (perfiles anti-*Headcheck*), *Running* (perfiles de ampliación de trocha, perfiles de conicidad equivalente, perfiles asimétricos, etc. Otro campo de actividad en paralelo es el desarrollo de sistemas de perfeccionamiento tanto para el perfil longitudinal (corrugación) como para el perfil transversal así como para la rugosidad (condición de superficie) [33]. De acuerdo con esto se puede decir que hoy hay un interés investigativo importante en el perfil de rieles y ruedas para un mejor contacto, en donde la pregunta fundamental es: ¿Cuál sería el mejor perfil para aplicarse? Como los rieles están instalados en diferentes ubicaciones y las características de tráfico cambian, no hay un perfil único para todas las condiciones, máxime si se tiene en cuenta que la experiencia ha demostrado que incluso los nuevos

perfiles de riel laminados e instalados en la vía no ofrecen las condiciones ideales de contacto con las ruedas [30].

El papel de la rugosidad de la superficie resultante en los rieles y su influencia en el desgaste en el contacto de rueda-riel se ha estudiado pero persisten múltiples interrogantes tanto teóricos como tecnológicos [34, 35]. Por ejemplo, el efecto de la rugosidad de la superficie en cuanto al ruido y a las vibraciones ha sido objeto de estudio de numerosos investigadores [36, 37, 38] ya que los problemas con el ruido y las vibraciones se encuentran principalmente en las zonas urbanas con tráfico frecuente.

Actualmente no hay precedentes científicos “estándar” de las especificaciones de reperfilado para las condiciones de transporte pesado. La rugosidad de la superficie máxima admisible ( $R_a$ ) en los rieles después del reperfilado aceptable para la Administración Nacional Sueca de trenes es de  $10\mu\text{m}$ , igual que lo propuesto en Norma Europea antes mencionada. En cuanto a la normatividad acerca del cómo realizar los procesos de mantenimiento por reperfilado las diferentes empresas ferroviarias tienen sus propias directrices, principalmente sobre la base de su experiencia y sus “reglas de oro” [39, 40].

La rugosidad de la superficie inicial rueda-riel según las investigaciones actuales tiene influencia casi insignificante en el comportamiento de la superficies ya que los trenes disminuyen rápidamente la rugosidad hasta casi el mismo valor luego de un proceso de acomodación de las superficies de ruedas y rieles. Sin embargo, hay muchos interrogantes sobre el efecto de la rugosidad del par rueda-riel inicial sobre la tracción, el desgaste y la fatiga por contacto y se necesitan más estudios para investigar estos aspectos, los cuales le den continuidad a trabajos como el de Lundmark et al [40], quienes mostraron cómo cambia la rugosidad con el paso del tren en una vía comercial de alto tráfico (ver Figura 1-7).

**Figura 1-7:** Cambio de rugosidad de la superficie sobre el riel debido al tráfico [40].

Lundmarket al [41] llevaron a cabo un estudio sistemático experimental para estudiarla influencia de la rugosidad de la superficie en el desempeño tribológico del contacto rueda-rielen el laboratorio mediante el uso de un dispositivo disco-disco. Las conclusiones principales de este estudio fueron que la influencia de la rugosidad de la superficie, así como el tipo de material de las ruedas, es muy significativa en el desgaste de los componentes . En todos los experimentos, las muestras de la rueda de mayor rugosidad dieron como resultado un menor desgaste que las muestras más lisas.

### 1.7.3 Fricción

Las características de fricción en el contacto rueda-riel son difíciles de caracterizar y de cuantificar, ya que son fuertemente dependientes de las condiciones meteorológicas y la contaminación. El coeficiente de fricción puede variar entre 0.08 y 0.50 en sistemas rueda-riel, en donde naturalmente esto pone un límite a la tracción posible para el frenado. Una muy baja fricción puede resultar en que se produzca alto deslizamiento con las ruedas mientras que una fricción puede conducir aún mayor consumo de energía y desgaste excesivo tanto de la rueda como del riel. Los métodos tradicionales para controlarla fricción incluyen el reperfilado del riel y la lubricación de las pestañas de las ruedas o en las esquinas de riel donde las vías tienen curvas. Además de esto, en los

últimos años los modificadores de fricción se han introducido, con la idea de que no sólo se altere el coeficiente de fricción, sino también se mejore la condición de adherencia del contacto entre el riel y la rueda en las curvas [1].

En este sentido, en búsqueda de encontrar los coeficientes de fricción óptimos se ha simulado el contacto rueda-riel en donde la fricción tiene una influencia muy fuerte sobre el desempeño y el comportamiento de los sistemas rueda-riel. El grupo de investigación en elementos de máquinas del *Royal Institute of Technology en Stockholmy* la Universidad Lulea en Lulea, junto con una serie de empresas suecas, han seguido un programa de investigación denominado *Interfaz* en donde el objetivo es desarrollar modelos relevantes de fricción y desgaste para las simulaciones en la industria con distintos tipos de dispositivos mecánicos, este programa se basó en un trabajo previo realizado por Sellgren, en el cual desarrolló los principios generales para el modelado de sistemas; su enfoque es modelar y establecer directrices estrictas para los modelos de comportamiento de elementos de máquinas, módulos e interfaces [1, 42, 43].

La fricción desempeña un papel clave en el desgaste de la rueda/riel, en la fatiga del contacto, y otras tareas de mantenimiento de trenes, además de la relacionada con problemas de funcionamiento. El coeficiente de fricción en la interfaz rueda-riel es fuertemente dependiente de la composición y las propiedades reológicas de la capa interfacial, comúnmente conocido como el "tercer cuerpo". Normalmente, esta capa interfacial comprende óxidos de hierro, así como posiblemente aceite o grasa, arena y agua. Algunas prácticas recientemente introducidas han demostrado que el coeficiente de fricción de esta capa interfacial puede ser *controlado* mediante la introducción de un compuesto seco llamado modificador de fricción (FM) en la intercara rueda-riel. Trabajo de campo posterior ha demostrado una reducción significativa en el desgaste del riel mediante la adopción de esta tecnología [44, 45].

Muchas investigaciones han estado enfocadas en el desarrollo, mejora y efectos de lubricantes con modificadores de fricción [46, 47, 48, 49, 50, 51], para el control de desgaste y fatiga, esto indica que mantener un control de fricción es un área importante en los sistemas ferroviarios. Actualmente en el Grupo Tribología y Superficies de la

Universidad Nacional de Colombia en Medellín se está desarrollando un lubricante para el control de desgaste y fricción [2].

#### **1.7.4 Reperfilado, Desgaste y RCF**

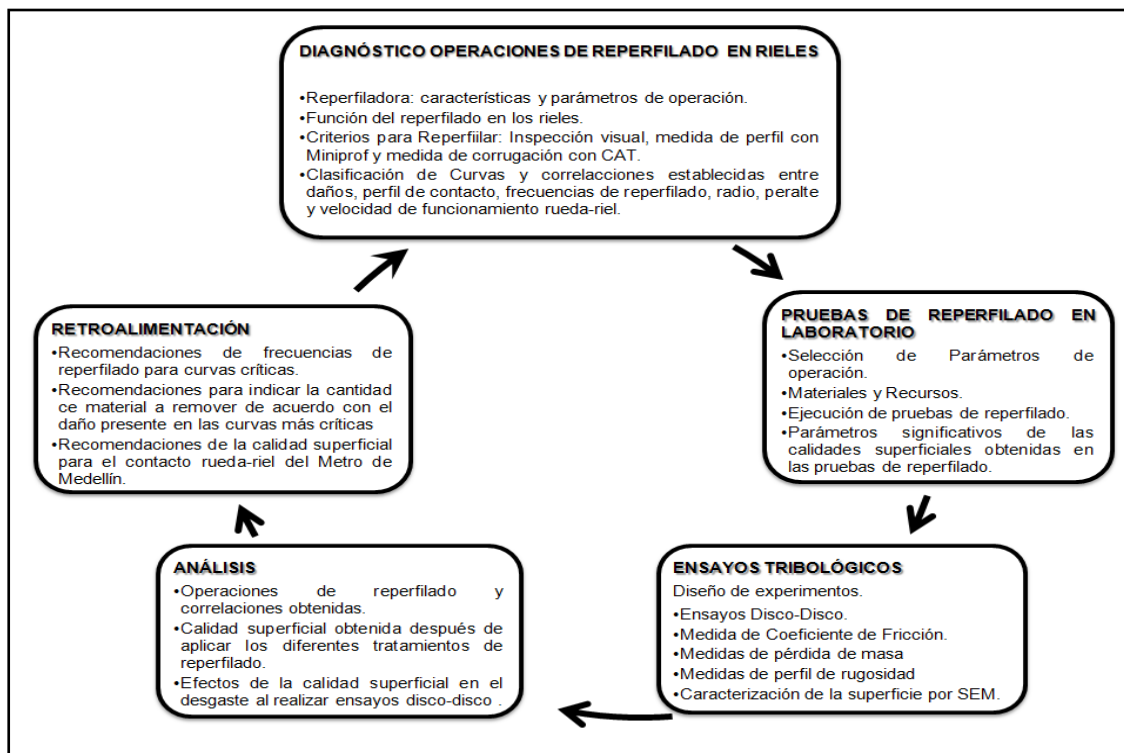
Los estudios frente a este tema han estado enfocados en contacto de rodadura y desgaste adhesivo de dos tipos de acero para encontrar microestructuras más resistentes y duraderas para combatir el desgaste por adhesión en sistemas férreos [52]; En 2006, los desarrollos estaban concentrados en avances de estrategias en reperfilado mediante el desarrollo de máquinas más precisas y nuevos perfiles del riel [33]. En 2009, el desarrollo de nuevos perfiles específicos de reperfilado para el control de RCF llevó a que estos perfiles desarrollados permitieran la reducción de RCF y del desgaste, con una eliminación de metal entre 0.1mm y 0.3mm por intervención [53]. Otro estudio realizado en Japón muestra que son las piedras las que permiten reducir de manera más significativa el desgaste y RCF, de este estudio salieron nuevas piedras para reperfilado de rieles [54, 55]. En general entonces, los estudios han estado enfocados en buscar nuevas estrategias de reperfilado para reducir desgaste, RCF y la tasa de desgaste artificial adecuada [30, 31, 34, 53, 55, 56,57, 58, 59].



## 2. Metodología: Observación y recolección de datos... Formulación y comprobación de hipótesis... Demostración de relaciones y explicación...Retroalimentación

La metodología en este trabajo se llevó a cabo siguiendo de manera conservadora los lineamientos del método científico partiendo de la observación macro de lo que sucede a nivel tribológico en el sistema rueda-riel del Metro de Medellín. Luego, las superficies tratadas y evaluadas en el laboratorio se analizaron a partir de su funcionamiento tribológico, simulando condiciones de operación encontradas en campo y llevando toda esta experimentación al análisis que permitió una retroalimentación de las operaciones que se dan en el proceso de mantenimiento.

Figura 2-1: Esquema metodológico para la investigación.



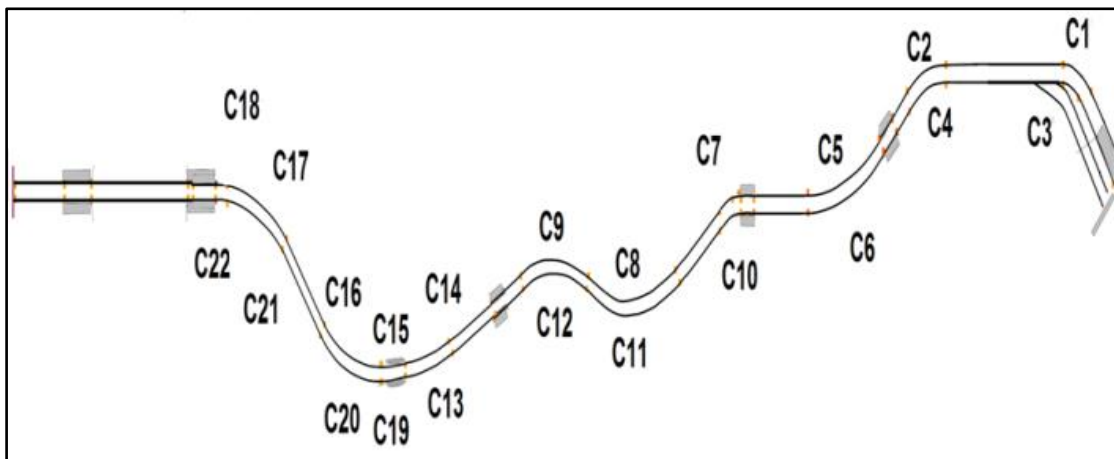
## 2.1 Diagnóstico de operaciones de reperfilado en rieles

Con el objetivo de adquirir un conocimiento del proceso de reperfilado se efectuaron visitas en el Metro de Medellín en donde se observó y se estudió cómo se realizaban las operaciones de reperfilado de rieles y de ruedas, lo que incluye el análisis de la operación de la máquina, los tipos de defectos encontrados antes de reperfilar, entre otros. En estas visitas se tomaron datos de intervenciones por curva de reperfilado, cantidad de material que se retira en el riel desde el *Miniprof* y medidas de corrugación con *CAT* desde el 2002 hasta 2012, además se realizó inspección visual que se registró en fotografías.

PROCEDIMIENTO DE VISITA: En un sistema férreo comercial se seleccionó una de las líneas (línea B del Metro de Medellín); este tramo cuenta con rieles rectos y con 22 curvas (ver Figura 2-2), de las cuales se escogieron 2 para el análisis. El segundo paso consistió en mirar las especificaciones de radio de curva y tipo de contacto de los rieles seleccionados para este estudio, que se describen en la Tabla 2-1 y 2-2.

En las visitas se realizaron actividades de inspección de vía, registro fotográfico de los mecanismos de desgaste presentes en el riel, informe de operación de la reperfiladora, medidas de perfil con *Miniprof* y medidas de corrugación con *CAT*. Todas estas operaciones se realizaban antes y después de reperfilar en la Línea B del Metro de Medellín.

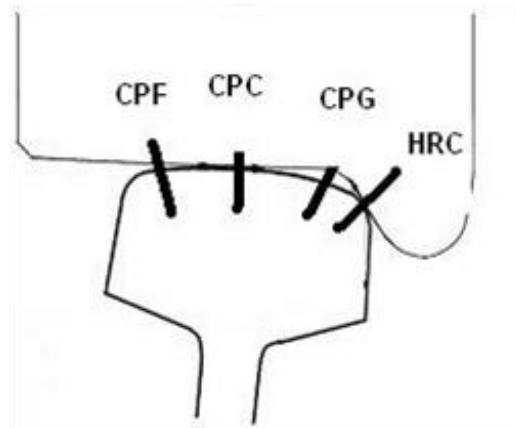
**Figura 2-2:** Campo de estudio línea comercial.





La función del reperfilado en los rieles es remover material afectado por fatiga, corrugación y deformación, en el cual se tiene que dar el perfil adecuado al trayecto del riel; estos perfiles o formas de contacto rueda-riel son definidos según la norma NRC:HRC: Contacto en el riel alto (*High Rail Contact*), CPF: Contacto en el exterior del riel (*Contact Profile Field*), CPG: Contacto en el interior del riel (*Contact Profile Gauge*), CPC : Contacto en el centro del riel (*Contact Profile Center*) y dependen del radio de la curva, como se observa en la Tabla 2-1. La forma de contacto rueda-riel se nombró en el diagnóstico como perfil de contacto.

**Figura 2-3:** Formas de Contacto rueda-riel.



**Tabla 2-1:** Formas de contacto rueda-riel según radios de curva.

HRC	CPG		CPC		CPF		
Sharp	Mild	Tang	Curva	Tang	Tang	Mild	Sharp
R<400	400<R<900	Estaciones	R>900			400<R<900	R<400

Los perfiles que se identificaron para las curvas de la Línea B, se observan en la Tabla 2-2. De acuerdo con los datos que el Metro recoge al realizar el mantenimiento, los cuales son información del *historial de reperfilado*, archivos de medidas de perfil con *Miniprof* y archivos de medida de ondulación con *CAT*, se estructuraron tres bases de datos, una primera llamada *historial de Reperfilado* que cuenta con especificación de la curva, radio

de la curva, tipo de riel alto o bajo, fecha en que se hizo la intervención y tipo de mecanismo de desgaste por el cual se realizó intervención de reperfilado. En este caso se clasificaron en tres mecanismos de desgaste a saber fatiga, desgaste ondulatorio (corrugación) y ajuste de perfil, que más adelante serán explicados.

**Tabla 2-2:** Perfiles NRC para cada curva de la Línea B.

IDENTIFICACION	PERFIL NRC	
	ALTO	BAJO
Curva 3, Curva 4, Curva 1, Curva 2, Curva 5, Curva 8, Curva 9, Curva 16, Curva 3, Curva 4, Curva 6, Curva 11, Curva 12, Curva 20.	HRC	CPF
Curva 7, Curva 15 SAM, Curva 17, Curva 10, Curva 19 SAM, Curva 21.	CPC	CPC
Curva 13, Curva 18, Curva 14, Curva 22.	CPF	CPF

La segunda base de datos es *el historial de Miniprof* el cual tiene los registros de las medidas de perfil W1, W2 y W3 para cada curva de riel tanto para hilo alto como para hilo bajo, con sus respectivas fechas en las que se obtuvieron las medidas, estos datos son útiles para realizar las correlaciones entre los perfiles de contacto rueda-riel y las frecuencias de reperfilado, lo que permite identificar la pérdida de perfil para cada zona de contacto.

Por último una base de datos con *historial de CAT* que son archivos de medida de corrugación de RMS y porcentajes de excedencia para cada curva de riel tanto para hilo alto como para hilo bajo, la cual contiene las fechas en que se realizaron las medidas. Estas bases de datos contienen información desde 2002 hasta 2012 para cada curva de la Línea B del metro de Medellín, obteniendo resultados particulares del proceso con respecto a los mecanismos de mecanismo de desgaste fatiga, desgaste ondulatorio y pérdida de perfil presentes en cada curva, además de las frecuencias en que estos mecanismos de desgaste aparecen y las relaciones con respecto al perfil de contacto rueda-riel, radio de curvatura, peralte y el proceso de reperfilado.

Con el fin de entender el comportamiento de los mecanismos de desgaste presentes en cada curva desde el proceso de reperfilado en los rieles se estudió la cantidad de material en el perfil del riel que se remueve (en mm) con el reperfilado, este análisis se realizó con base en el histórico de *Miniprof*.

Se estudiaron también las medidas de ondulación desde *CAT* para cada curva antes y después de realizar el reperfilado; todas estas medidas de *Miniprof* y *CAT* se analizaron con el fin de diagnosticar el proceso de reperfilado en los rieles de acuerdo al mecanismo de desgaste encontrado en cada curva y establecer correlaciones con el fin de obtener hipótesis que pueden ser evaluadas en otros procesos de investigación.

## **2.2 Pruebas de reperfilado en laboratorio**

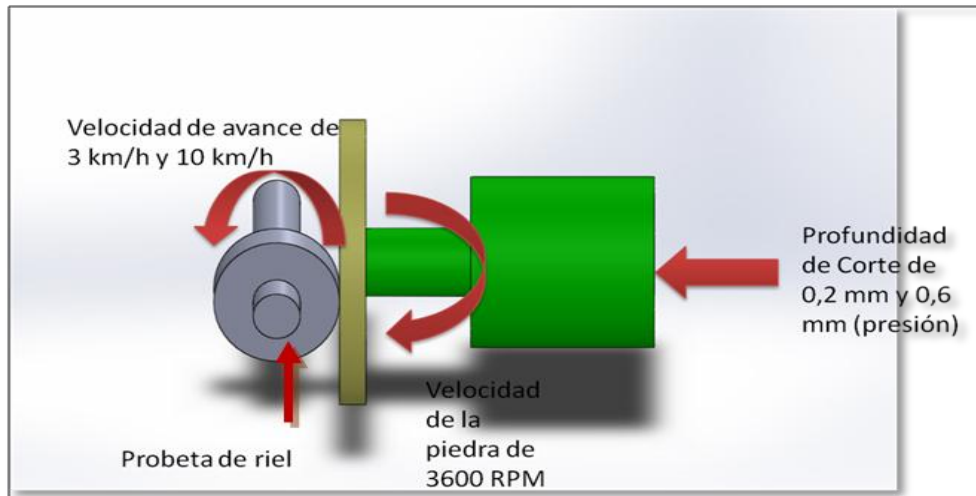
Sé identificaron las variables que intervienen en el funcionamiento de la máquina esmeriladora de rieles en el Metro de Medellín, a saber:

- Velocidad de avance de 1.6 a 13 km/h.
- Velocidad angular de 4200 a 4800 rpm.
- Presión de las piedras y profundidad de corte definidas de acuerdo a la potencia consumida, entre 6 y 14 Watt.
- Ángulo de corte para los motores delanteros es de 20° a 70° y para los cuatro motores traseros el ángulo está entre -45° y 45°.
- Tipo de piedra, de 16 ó 32 partículas abrasivas por cm<sup>2</sup>.

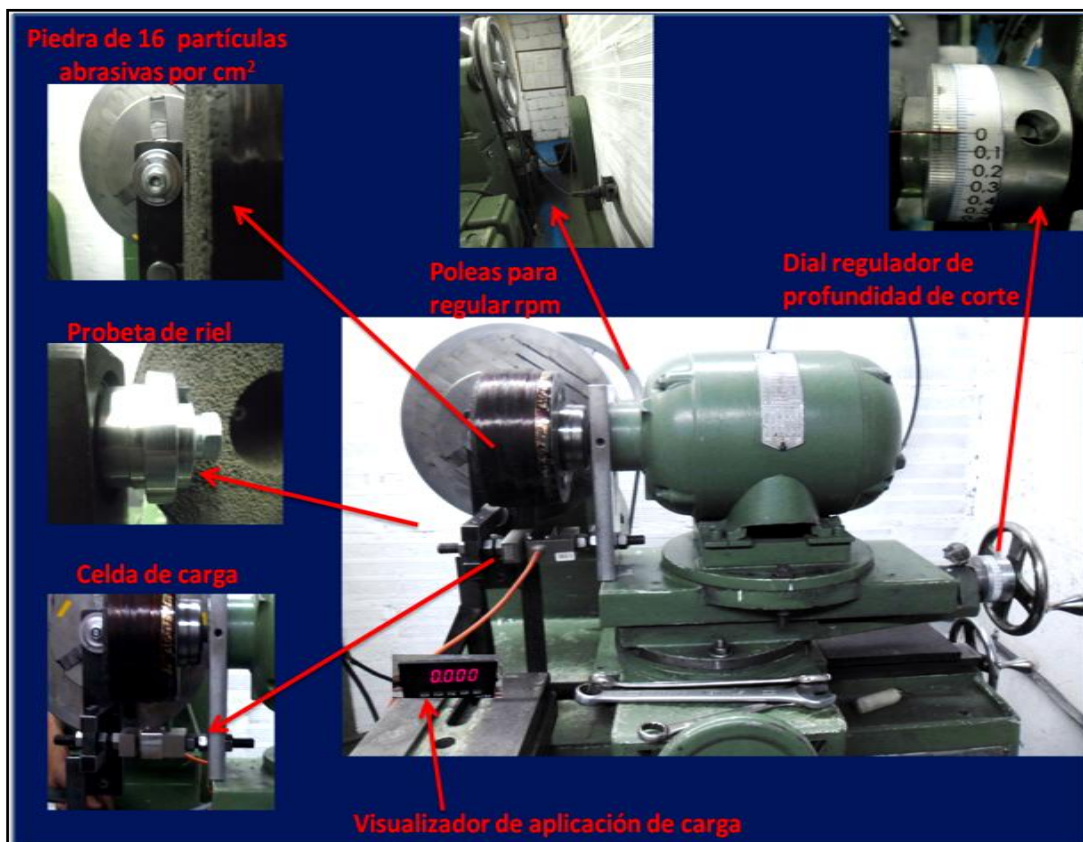
### **2.2.1 Selección de parámetros de operación**

De acuerdo a lo anterior, para el diseño de experimento se seleccionaron las variables de velocidad de avance de 3km/h y 10km/h y profundidad de corte de 0.2 y 0.6 mm por avance, y ángulo de corte de 0°, estas variables se adaptaron a una máquina de pulido y se diseñó un montaje que se ilustra en las Figuras 2-4 y 2-5.

**Figura 2-4:** Esquema de diseño de montaje de pruebas de reperfilado.



**Figura 2-5:** Montaje para pruebas de reperfilado en laboratorio.



## 2.2.2 Materiales y Recursos

Todas las probetas de riel fueron extraídas de tramos de riel R370CrHT, manufacturados por la empresa *Voestalpine Schienen GMBH-Austria* y suministradas por la Empresa de Transporte Masivo del Valle de Aburrá (*Metro de Medellín*). La composición química medida por Espectroscopía de Emisión Óptica y las propiedades mecánicas de los rieles y de la rueda, en concordancia con las normas europeas EN 13674-1:2011 y EN 13262:2004, se muestran en la Tabla 2-3 respectivamente [60, 61].

**Tabla 2-3:** Composición química y propiedades mecánicas del riel utilizado en los ensayos [61].

Composición química de los rieles y de la rueda (% en peso).												
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	V	Cu	Ti	Ni	Mo
R370CrHT	0.762	0.394	1.062	0.011	0.015	0.506	0.000	0.002	0.038	0.002	0.058	0.019
ER8	0.542	0.253	0.734	0.011	0.006	0.141	0.027	0.006	0.165	0.002	0.120	0.048

Propiedades mecánicas de los rieles.			
	Resistencia a Tracción (MPa)	Limite Elástico (MPa)	Dureza HV (HB)
R370CrHT	1373	767	386.9 (366.4)

Se implementó en una máquina pulidora convencional de la empresa Industrias HRV, un sistema con control de las variables de velocidad de avance lineal de la máquina reperfiladora de 3 km/h y 10km/h para probetas de 0.47mm de diámetro y profundidad de corte entre 0.2 y 0.6 mm. Para el sistema abrasivo se seleccionó la piedra de 16 partículas abrasivas por cm<sup>2</sup> como se ilustra en la Figura 2-5. En el [Anexo A.7](#) se dan detalles del montaje para las pruebas.

## 2.2.3 Ejecución de pruebas de reperfilado

Los experimentos se realizaron simulando 4 condiciones de reperfilado, donde se causó un desgaste controlado de 0.6mm en todos los casos y se variaron las RPM de acuerdo con las velocidades lineales seleccionadas de 3km/h y 10km/h teniendo así dos primeras condiciones. Para obtener las otras dos condiciones se varió la profundidad de corte,

teniendo un valor alto de 0.6mm (una solo avance) y uno bajo de 0.2mm (3 avances). De acuerdo con lo anterior, las cuatro condiciones del experimento son, reperfilado con alta velocidad (10km/h) y alta profundidad de corte (0.6mm), reperfilado de alta velocidad y baja profundidades de corte (0.2mm), reperfilado con baja velocidad (3km/h) y a alta profundidad de corte (0.6mm) y reperfilado con baja velocidad (3km/h) y baja profundidad de corte (0.2mm). La Tabla 2-4 sintetiza estas las condiciones de ensayo descritas.

**Tabla 2-4:** Diseño de experimentos pruebas de reperfilado.

DISEÑO DE EXPERIMENTOS PRUEBAS DE REPERFILADO			
2k 4 réplicas			
VARIABLES CONTROLABLES	FACTORES	NIVELES	VARIABLES RESPUESTA
RPM de la piedra	VELOCIDAD LINEAL	ALTA: 3km/h ( <b>Va</b> )	Dureza, perfil de rugosidad.
Tamaño de grano de la piedra		Baja: 10km/h ( <b>Vb</b> )	
Ángulo de contacto igual a 0°	PRESIÓN DE CORTE Para los dos niveles fue de 40pasadas/ciclo.	Alta: remover 0.6 en un solo avance ( <b>Pa</b> )	
Material a remover igual a 0.6mm		Baja: remover en 3 avances, cada uno de 0.2 mm ( <b>Pb</b> )	

### 2.2.4 Análisis de pruebas de reperfilado

Con el objeto de observar los cambios en las probetas de riel con el reperfilado se tomaron registros de peso, diámetro, dureza, aspecto superficial, caracterización de los materiales antes y después de reperfilar y se usaron las técnicas de Microscopía Electrónica de Barrido (*SEM*) y rugosimetría de contacto (usando software *Truesurf*).

En La caracterización de las superficies se tomaron parámetros según los siguientes estándares:

- **Norma ISO 4287:** Parámetros de amplitud Rt, Rp, Rv, Rz, Ra, Rq, Rsk, Rku; Parámetros espaciales RSm; Parámetros híbridos RDQ, RPC; y parámetros funcionales Rmr.

- Norma ISO 13565-2: Rk, Rpk, Rvk, MR1 y MR2.

## 2.3 Ensayos tribológicos

### 2.3.1 Diseño de experimentos

Los experimentos tribológicos se realizaron en dos etapas, la primera para determinar la mejor condición de reperfilado, es decir, la que generaba menor desgaste y también ver la diferencia con probetas no sometidas a reperfilado. Para ello, se tomaron las probetas con y sin prueba de reperfilado, y se realizó un ensayo tribológico en una máquina disco-disco con la condición menos crítica de operación que consiste en simular un recorrido en línea recta. Las condiciones en esta primera etapa fueron 0% de deslizamiento (*creepage*), presión de contacto de 0.8GPa y en seco.

**Tabla 2-5:** Diseño de experimentos ensayos tribológicos para condición de simulación de recta.

DISEÑO DE EXPERIMENTOS ENSAYOS TRIBOLÓGICOS			
Primera etapa			
VARIABLES CONTROLABLES	FACTORES	NIVELES	VARIABLES RESPUESTA
Presión de contacto 0.8GPa	SUPERFICIE	<i>Vb Pb</i>	Perfil de rugosidad, COF, Pérdida de masa, mecanismo de desgaste.
		<i>Va Pb</i>	
		<i>Vb Pa</i>	
Rodadura pura 0% de deslizamiento.		<i>Va Pa</i>	
Sin lubricar (Seco)		<i>Sin reperfilar</i>	
Ciclos: 10.000 ciclos			

En la segunda etapa se tomó de la primera etapa la condición de reperfilado que menor desgaste produjo y se hicieron probetas con esta condición superficial; para los ensayos

disco-disco se tomaron estas probetas y se compararon con probetas sin pruebas de reperfilado y se cambió la condición del ensayo por una más crítica, la cual fue equivalente a simular una curva con porcentaje de deslizamiento de 5% (*creepage*), presión de contacto de 1.1GPa y adición de lubricante, además en el ensayo se corrieron primero 4.000 ciclos en seco con el fin de promover el crecimiento de grietas y los 10.000 ciclos siguientes fueron lubricados con HLK.

Para cada condición se hicieron tres réplicas. Antes de empezar cada ensayo las probetas fueron lavadas y pesadas para las mediciones de pérdida de masa. Además se tomaron medidas de perfil de rugosidad y fotografías para ver la apariencia superficial.

**Tabla 2-6:** Diseño de experimentos ensayos tribológicos para condición de simulación de curva.

<b>DISEÑO DE EXPERIMENTOS ENSAYOS TRIBOLÓGICOS</b>			
<b>Segunda etapa</b>			
<b>VARIABLES CONTROLABLES</b>	<b>FACTORES</b>	<b>NIVELES</b>	<b>VARIABLES RESPUESTA</b>
Presión de contacto 1.1GPa	<b>SUPERFICIE</b>	<i>Reperfilado</i>	<b>Perfil de rugosidad, COF, Pérdida de masa, mecanismo de desgaste.</b>
5% de deslizamiento.		<i>Sin Reperfilar</i>	
Ciclos: 10.000			
Dureza	<b>LUBRICADO</b>	<i>Seco</i>	
Material		<i>Lubricado (HLK)</i>	
Geometría			

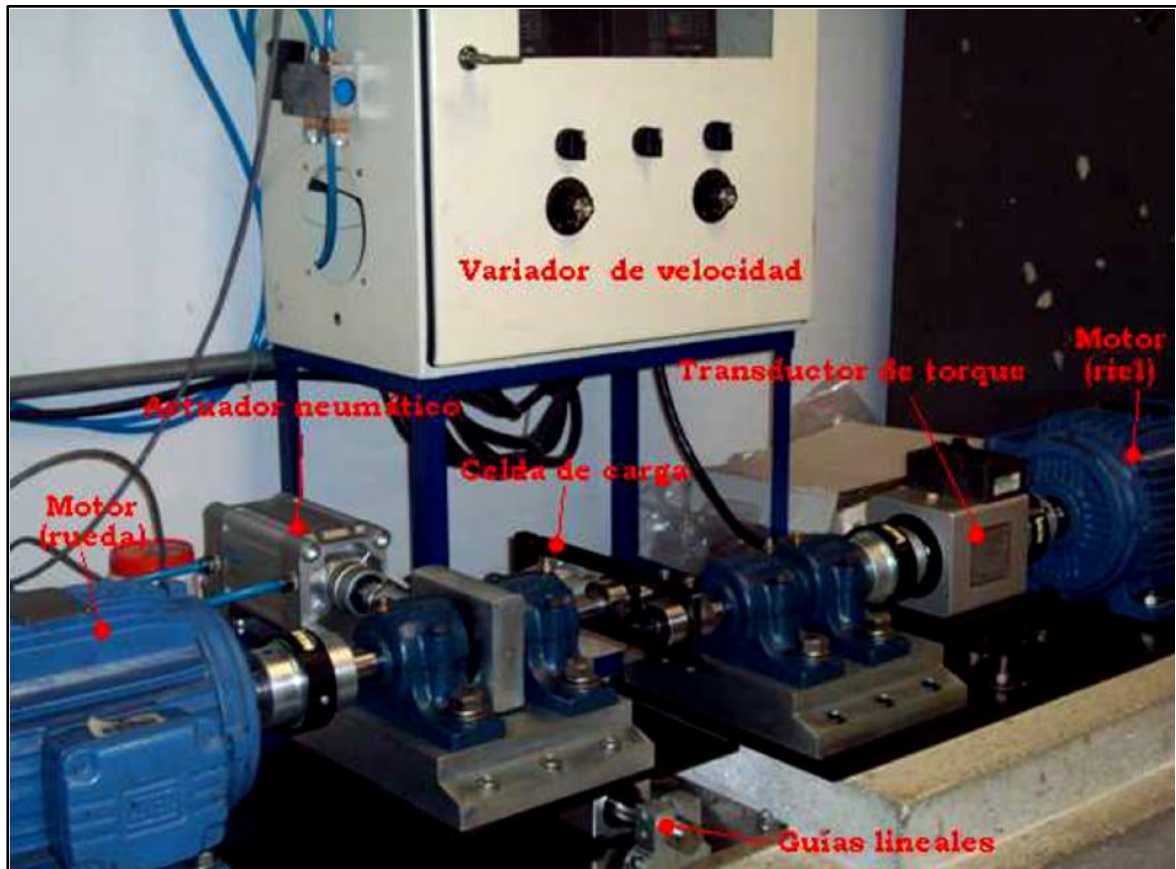
### 2.3.2 Ejecución de los ensayos

- **Primera Etapa**

Para la ejecución de los ensayos en la primera etapa en el diseño de experimentos se usó una máquina tipo disco sobre disco que permite realizar ensayos a 0% de deslizamiento, la cual es mostrada en la Figura 2-6.



**Figura 2-6:** Máquina disco-disco para ensayos a 0% de deslizamiento [60].



Su funcionamiento se basa en dos motores independientes de 3HP que mueven dos ejes paralelos en donde se colocan las probetas que simulan la rueda y el riel. Cada uno de los motores tiene un variador de velocidad con el fin de controlar la rodadura pura (ambos ejes con la misma velocidad angular); esta máquina no simula porcentaje de deslizamiento (diferente velocidad en cada uno de los ejes) porque el control de la velocidad tiene un error en la medida que es del mismo orden de magnitud de las diferencias de velocidad que son de interés para estudiar.

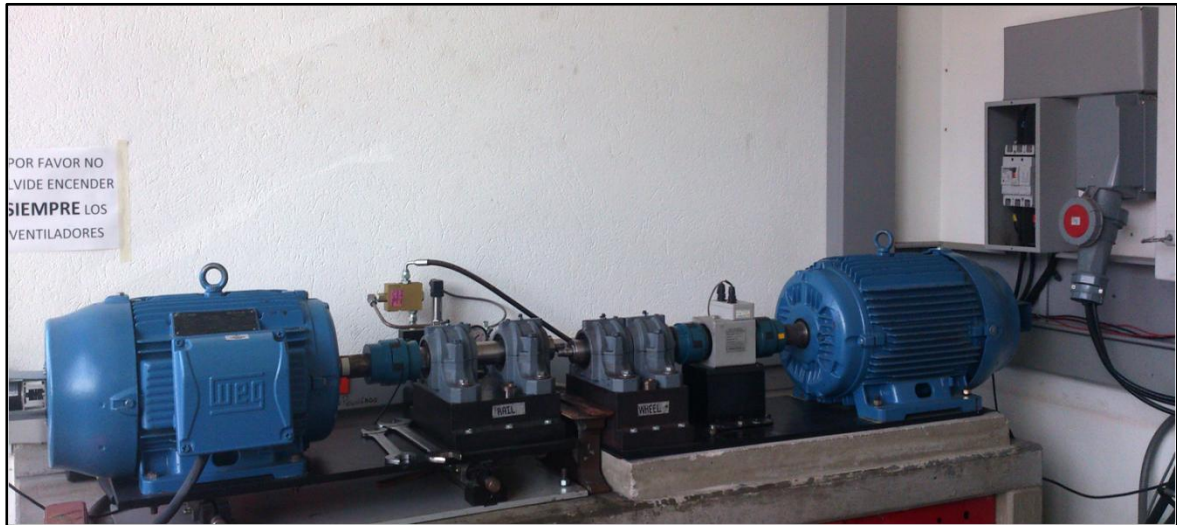
Sobre el eje en donde se coloca la probeta de rueda se encuentra acoplado un actuador neumático con el fin de proporcionar la carga radial necesaria sobre las probetas para conseguir la presión de contacto deseada, este eje está soportado por una base colocada sobre dos guías lineales que permiten el mínimo de fricción al momento en que

las dos superficies entran contacto. En el eje donde está la probeta de riel (que es fijo), se encuentra acoplado entre el motor y la probeta un transductor de torque que permite la medición de la fuerza de tracción en el contacto, los datos reportados por este dispositivo son almacenados en un computador. Antes de cada ensayo se usa una celda de carga que permite hacer la medición de la fuerza aplicada por el actuador, para garantizar el valor de la presión de contacto [60].

- **Segunda etapa**

Las pruebas tribológicas para esta etapa simulan la Fatiga por Contacto Rodante (RCF) de los sistemas rueda-riel, razón por la cual es necesaria una máquina que aplique altas presiones de contacto durante ensayos dinámicos con porcentajes de deslizamiento constantes, para ello fue utilizada una Máquina Disco contra Disco (MDDv2), instalada en el laboratorio de tribología y superficies de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín la cual corresponde a la segunda generación de dispositivos de este tipo desarrollados en el laboratorio. La MDDv2 es usada para simular el tribo-sistema Rueda-Riel, para obtener condiciones similares a las de operación en sistemas férreos. La MDDv2 consta de dos discos encontrados donde la velocidad, presión de contacto y porcentaje de deslizamiento (*creepage*) son controlados precisamente, para ello se cuenta con un motor de 10HP de 8polos para las probetas de riel y un motor de 15HP de 8polos para las probetas de rueda; el motor de rueda tiene mayor potencia porque siempre debe girar más rápido y el otro motor lo intentará frenar. De manera análoga, al motor que va más lento lo intentan acelerar y al tratar de girar más rápido empieza a funcionar como si fuera un generador, cuenta con un sistema hidráulico con aceite para aplicar la presión y tener mayor control de aplicación. Los ensayos en esta etapa son para medir desgaste al 5% de deslizamiento y presión de contacto de 1.1GPa, la máquina utilizada se ilustra a continuación [61].

**Figura 2-7:** Máquina Disco-Disco versión 2.0 (MDDv2) [61].



El porcentaje de deslizamiento en los ensayos se calculó de acuerdo con Fletcher y Beynon [61, 62] siguiendo el procedimiento mostrado en el [Anexo A.6](#).

Para garantizar que las grietas por fatiga de contacto crezcan adecuadamente es necesario un periodo de fatiga en condición seca puesto que al aplicar un lubricante se produce un aumento súbito en el deslizamiento y se disminuyen las fuerzas tangenciales, por lo cual no se produce tanta deformación en esta dirección y se dificulta el crecimiento de las grietas [61].

En las pruebas, al cumplir entonces los 4.000 ciclos en seco se empezaba a adicionar una cantidad fija de modificador de fricción (entre 0.02g y 0.03g) a la superficie de la probeta de rueda por medio de un pincel, esta aplicación se repetía cada 400 ciclos (cada minuto). Una vez se empieza a aplicar el modificador de fricción la carga aumenta y el coeficiente de tracción cae pero se estabiliza al poco tiempo, este aumento en la carga se compensa para que la presión de contacto sea siempre la misma durante todo el ensayo [61].

Una vez finaliza el ensayo las probetas son lavadas con desengrasante y luego sumergidas en alcohol con ultrasonido para remover todo resto de modificador de fricción que pudiera haber quedado producto del ensayo, finalmente son pesadas para cuantificar

la pérdida de masa. De no remover la totalidad del modificador se afecta el resultado de pérdida de masa.

### 2.3.3 Análisis de los ensayos tribológicos

Las variables analizadas en los ensayos de desgaste para las dos etapas fueron:

- Pérdida de masa (g).
- Coeficiente de fricción.
- Mecanismo de desgaste superficial (presencia de Fatiga y/o deformación).
- Medida de perfil de rugosidad

Primera etapa: Las variables fueron seleccionadas de acuerdo con la condición tribológica que se indujo, esto es, como es un ensayo en seco. Las variables que interesan son las que influyen en el contacto directo con la rueda, estos parámetros fueron: **Rp, Rq, Rsk, Rku, RSm, RPs-**

Segunda etapa: Con el fin de predecir lo que sucede con el contacto y el desgaste con las superficies obtenidas en pruebas de reperfilado se determinó que los parámetros a observar y analizar serían **Rt, Rp, Rv, Rq, Rsk, Rku, RSm, RPs, Rdq, Vo (Rvk, MR2).**

#### Área de contacto por Método de Hertz

A continuación se presentan las ecuaciones que se utilizarán en el cálculo, en el Anexo A.3 se describen las variables.

$$F = \frac{1}{2} \pi a L P_{\max}, \quad P_{\max} = \frac{2F}{\pi a L}, \quad P_{\text{promedio}} = \frac{F}{\text{area}} = \frac{F}{2aL},$$
$$B = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad a = \sqrt{\frac{2F}{\pi L} \left( \frac{m_1 + m_2}{B} \right)}, \quad m_1 = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} m_2 = \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}$$
$$A_a = 2aL$$

- Área real de contacto por Modelo de Greenwood - Williamson (G&W)

A continuación se presentan las ecuaciones que se utilizaron en el cálculo, en el Anexo A.5 se describen las variables en detalle.

$$\frac{1}{E_c} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} , \quad \psi = \left(\frac{\sigma}{R}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{E_c}{H}\right) ,$$

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

$$P_m = \frac{L}{A_r} , \quad n = \frac{L}{\pi^{\frac{1}{2}} \times E_c \times \sigma^{\frac{3}{2}} \times R^{\frac{1}{2}}}$$



### **3. Diagnóstico: correlaciones de lo general a lo particular**

De acuerdo con la metodología planteada se realizó un diagnóstico de las curvas de la línea B del Metro de Medellín con el fin de obtener correlaciones que permitieran diagnosticar la situación actual. En este sentido en un primer momento se obtuvieron las especificaciones de radio de curva y tipo de contacto de los rieles seleccionados para este estudio, que se describen en las Tablas 3-1 y 3-2.

#### **3.1 Criterios para reperfilado: inspección visual, medida de perfil con Miniprof y medida de corrugación con CAT**

Los criterios para realizar operaciones de reperfilado de los rieles son tres. El primero es la inspección visual de los defectos en vía especialmente cuando se trata de fatiga, deformación plástica y geometría negativa por soldadura. El segundo es inspección de corrugación o desgaste ondulatorio realizado con el equipo *CAT (Corrugation Analysis Trolley)*, el cual calcula dos datos de desplazamiento estadísticos: la raíz cuadrada media de desplazamiento (RMS) y la proporción del riel que tiene una medida de desplazamiento fuera de la banda especificada por  $\pm le$  (expresado como un porcentaje y también como una medida absoluta en km), donde  $le$  es el *nivel de excedencia* definido de manera arbitraria de acuerdo a criterios basados en la experiencia. El tercero es la medida de perfil por el equipo de *Miniprof* el cual mide la altura del riel en tres puntos W1, W2 y W3 como se observa en la Figura 3-1, y se usa para ver pérdida de perfil en los rieles de acuerdo al perfil NRC, estas medidas se toman tanto para hilo alto como para hilo bajo.

64 “Análisis experimental del efecto del proceso de reperfilado sobre el desgaste y fatiga por contacto de rodadura de riel en el sistema rueda-riel en el Metro de Medellín”

---

**Tabla 3-1:** Perfiles NRC para cada curva de la Línea B del Metro de Medellín.

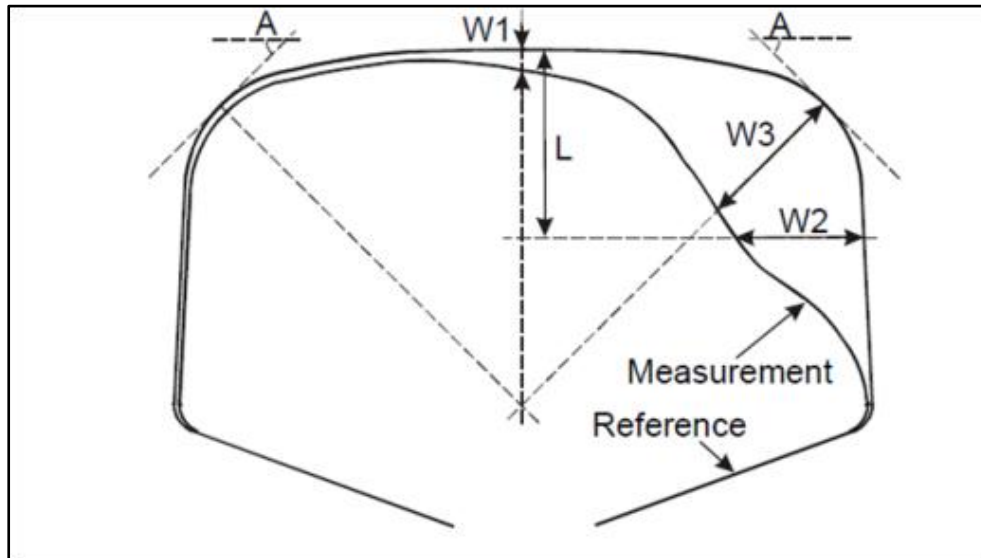
IDENTIFICACION DE LAS CURVAS	PERFIL NRC	
	ALTO	BAJO
<b>C3, C4, C1, C2, C5, C8, C9, C16, C6, C11, C12, C20</b>	HRC	CPF
<b>C7, C15, C17, C 10, C19, C21</b>	CPC	CPC
<b>C13, C18, C14, C22</b>	CPF	CPF

**Tabla 3-2:** Especificaciones de las curvas de la línea B del Metro de Medellín.

IDENTIFICACIÓN DE LAS CURVAS	RADIO (m)	PERALTE (mm)
C1	200	75
C2	303,75	150
C3	200	0
C4	300	150
C5	300	150
C6	303,75	145
C7	3500	0
C8	300	150
C9	303,75	150
C10	3496,25	0
C11	303,75	150
C12	300	148,15
C13	750	50
C14	753,75	30
C15	1500	0
C16	360	105
C17	2500	0
C18	600	95
C19	1503,75	0
C20	363,75	110
C21	2496,25	0
C22	596,25	75



**Figura 3-1:** Perfil de referencia de riel para medición con *Miniprof*.



### 3.2 Clasificación de mecanismos de desgaste

Los mecanismos de desgaste de riel se clasificaron como corrugación, fatiga y pérdida de perfil, y se realizaron inspecciones de campo para identificar estos mecanismos de desgaste en campo. En la Tabla 3-3 y en la Figura 3-2 se muestra como se realizó esta clasificación.

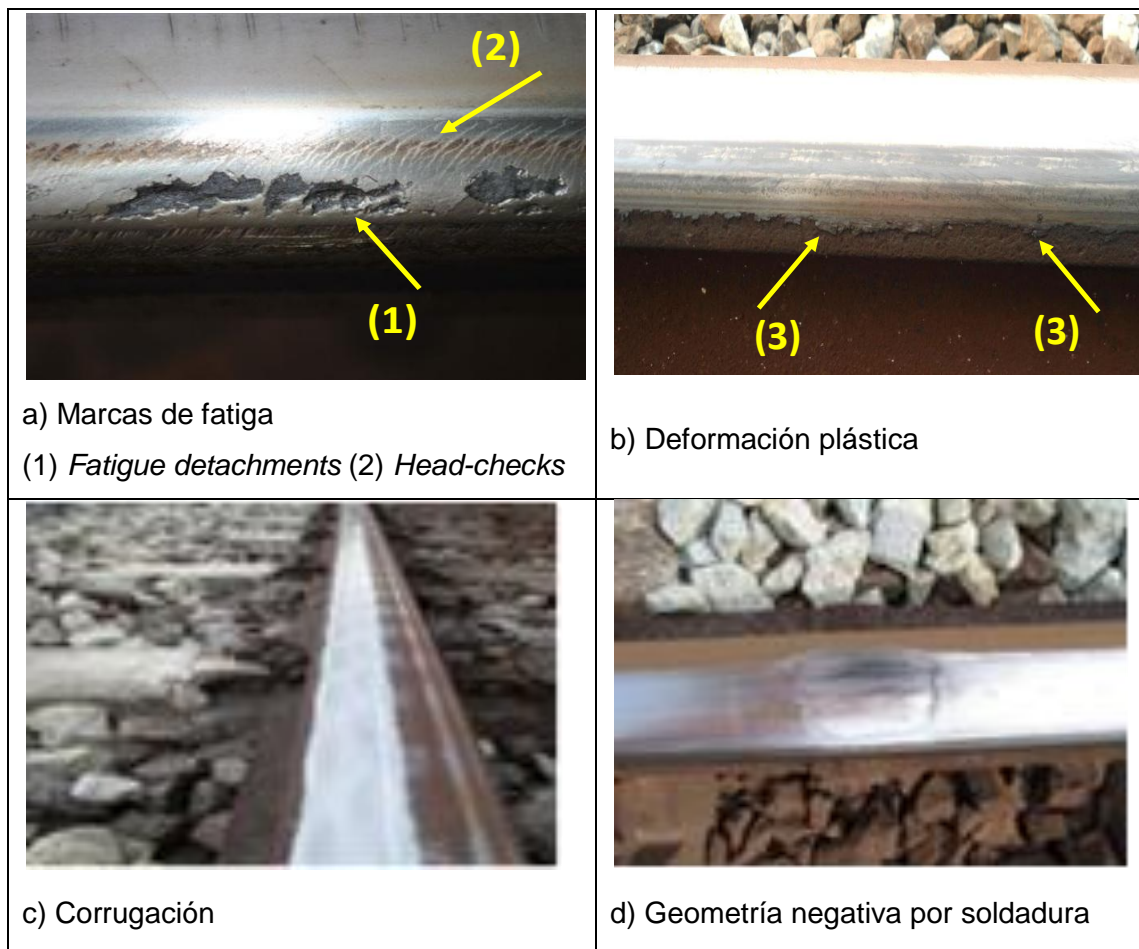
**Tabla 3-3:** Clasificación de Mecanismos de desgaste.

Síntoma/ Evidencia	Mecanismo
Grietas y desprendimiento por fatiga.	Fatiga
Desgaste ondulatorio.	Corrugación
Deformación plástica, pérdida de perfil de contacto, huellas de aceleración, huellas de frenado, huellas de reperfilado, ruido, vibraciones, soldadura por geometría negativa.	Ajuste de Perfil
Intervenciones de reperfilado que se realizaron pero de los cuales se desconoce el mecanismo de desgaste por el que se realizó.	Desconocimiento de causa

La Figura 3-2 muestra los defectos más importantes encontrados en las inspecciones de

campo. La Figura 3-2a muestra marcas de fatiga (flecha 1) y grietas de fatiga (flecha 2) conocidos en la literatura como *Head-checks* [68, 73]. La Figura 3-2b muestra deformación plástica (3) en el riel, pulido de riel debido a la pérdida de perfil. La Figura 3-2c muestra desgaste ondulatorio conocido como corrugación y la Figura 3-2d muestra geometría negativa por soldadura, en cuyo caso se realiza ajuste de perfil.

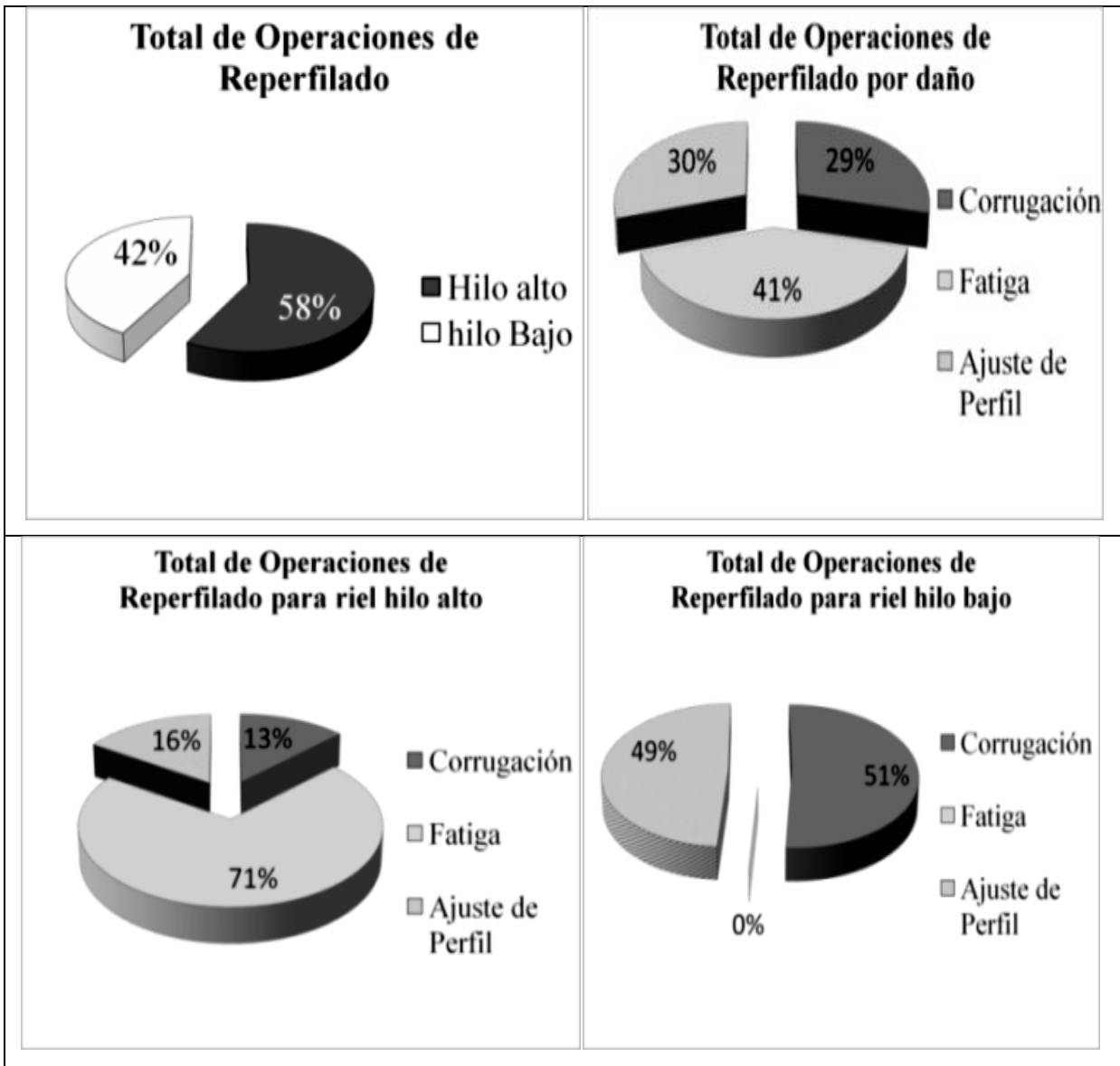
**Figura 3-2:** Defectos más importantes en rieles encontrados en las inspecciones de campo.



La Figura 3-3 muestra el resumen de los resultados de las operaciones de pulido para el riel alto y bajo (Figura 3-3a) y la causa principal (Figura 3-3b). En la figura que se puede concluir que en el riel de hilo alto, el reperfilado es la operación más frecuente en el campo y que, en la mayoría de los casos los procedimientos de mantenimiento se

realizan porque aparecen marcas de fatiga en la superficie del riel. De las Figuras 3-3c y 3-3d se puede concluir que para el hilo alto se realiza la mayor cantidad de operaciones de reperfilado por fatiga y para el hilo bajo por corrugación.

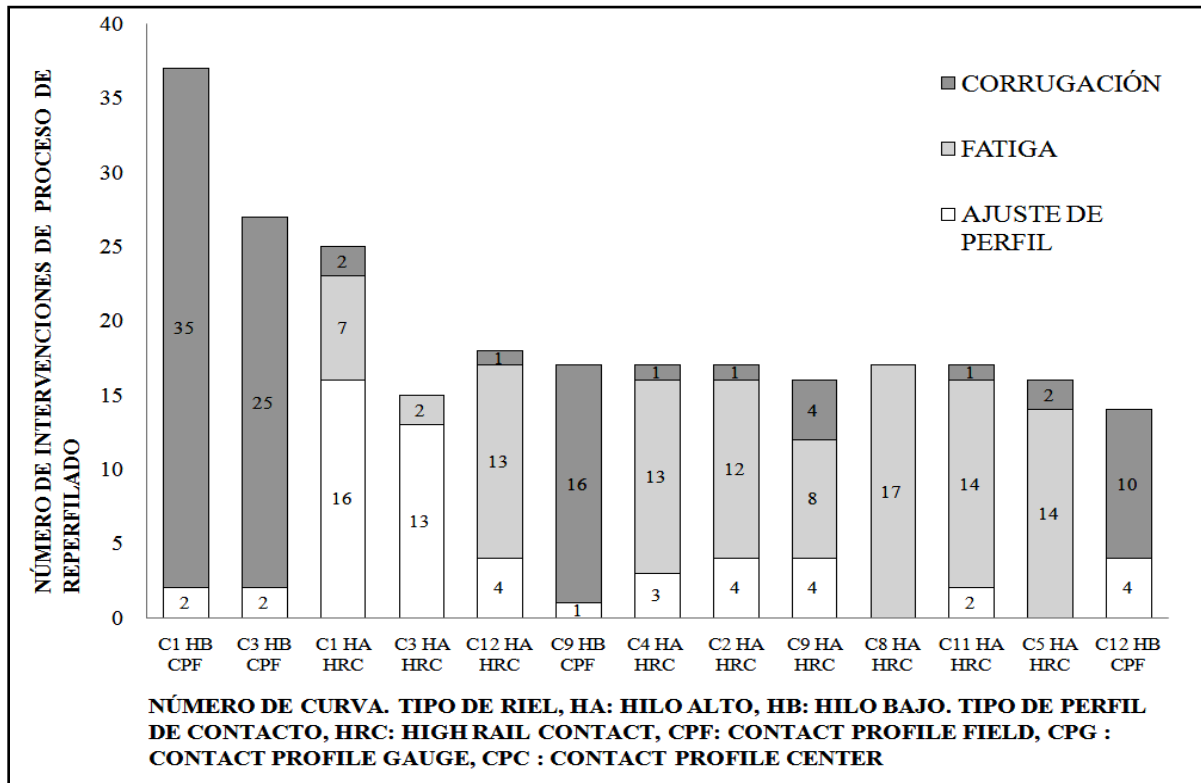
**Figura 3-3:** Detalles de las operaciones de reperfilado en el campo durante los últimos 10 años en la línea B del Metro de Medellín.



La Figura 3-4 muestra el 80% de las curvas evaluadas, en donde se puede apreciar el número de operaciones de reperfilado en riel debido a la causa principal de daño, mostrando las curvas que presentan mayores tasas de desgaste. De esa cifra se puede

concluir que la corrugación se presentó preferencialmente en el hilo bajo, mientras que la fatiga es predominante en el hilo alto.

**Figura 3-4:** Clasificación general de tipo de daño por intervenciones de reperfilado.



### 3.2.1 Clasificación de curvas según número de intervenciones de reperfilado y mecanismo de desgaste

Esta clasificación se realizó para cada 200 días de reperfilado, se hizo un promedio con los días de intervención de cada reperfilado como se muestra en la Tabla 3-4, en donde se puede determinar cuáles son las curvas críticas a nivel de mantenimiento, las cuales son las que se reperfilan con intervalo de 0 a 200 días. Las curvas más críticas en este rango son: C1 HB CPF, C3 HB CPF y HA HRC.

**Tabla 3-4:** Clasificación de curvas por frecuencias de reperfilado.

NÚMERO DE CURVA, TIPO DE PERFIL Y PERFIL DE CONTACTO	RADIO (m)	PROMEDIO DE DÍAS DEL PROCESO DE REPERFILADO	CLASIFICACIÓN (días)
C1 HB CPF	200,00	90,86	<b>0-200</b>
C3 HB CPF	200,00	112,56	
C1 HA HRC	200,00	121,72	
C3 HA HRC	200,00	172,45	
C12 HA HRC	300,00	172,64	
C9 HB CPF	303,75	179,90	
C4 HA HRC	300,00	182,53	
C2 HA HRC	303,75	191,20	
C8 HA HRC	300,00	191,89	
C9 HA HRC	303,75	198,84	
C12 HB CPF	300,00	203,67	<b>200-400</b>
C11 HA HRC	303,75	210,83	
C5 HA HRC	300,00	228,59	
C4 HB CPF	300,00	247,71	
C6 HA HRC	303,75	252,40	
C2 HB CPF	303,75	254,93	
C16 HA HRC	360,00	261,79	
C11 HB CPF	303,75	276,85	
C5 HB CPF	300,00	277,57	
C22 HA CPF	596,25	296,83	
C 8 HB CPF	300,00	300,58	

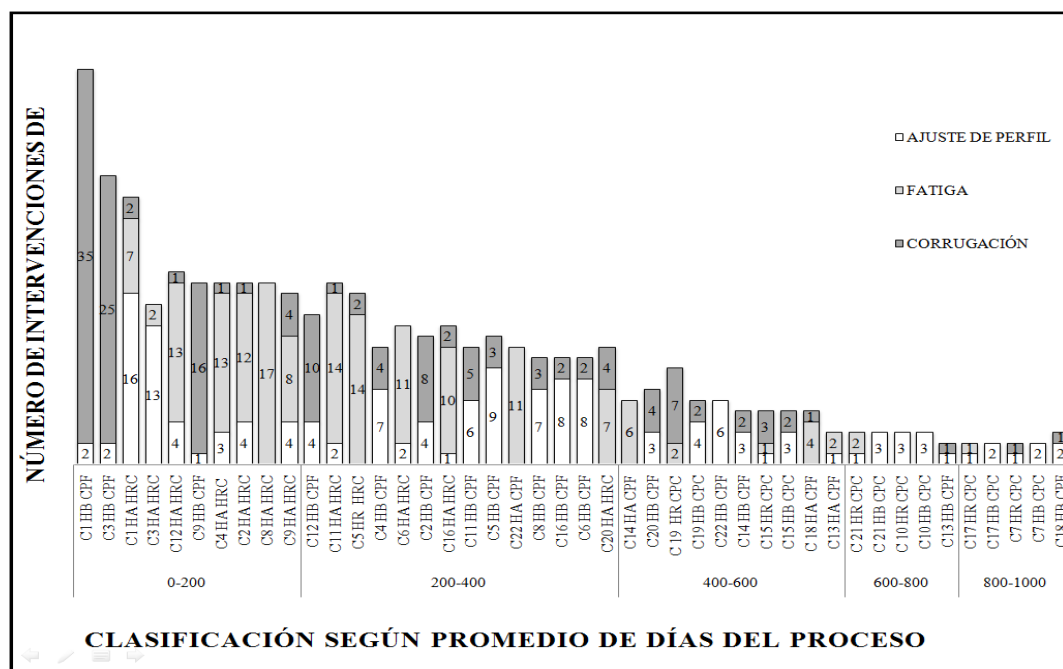
70 “Análisis experimental del efecto del proceso de reperfilado sobre el desgaste y fatiga por contacto de rodadura de riel en el sistema rueda-riel en el Metro de Medellín”

**Tabla 3-4:** (Continuación).

<b>NÚMERO DE CURVA, TIPO DE PERFIL Y PERFIL DE CONTACTO</b>	<b>RADIO (m)</b>	<b>PROMEDIO DE DÍAS DEL PROCESO DE REPERFILADO</b>	<b>CLASIFICACIÓN (días)</b>
C16 HB CPF	360,00	305,42	
C6 HB CPF	303,75	315,50	
C20 HA HRC	363,75	355,00	
C14 HA CPF	753,75	405,50	<b>400-600</b>
C20 HB CPF	363,75	421,89	
C19 HA CPC	1503,75	433,78	
C19 HB CPC	1503,75	434,25	
C22 HB CPF	596,25	439,00	
C14 HB CPF	753,75	463,43	
C15 HA CPC	1500,00	514,14	
C15 HBCPC	1500,00	514,14	
C18 HA CPF	600,00	588,50	
C13 HA CPF	750,00	596,40	
C21 HA CPC	2496,25	621,80	
C21 HB CPC	2496,25	621,80	
C10 HA CPC	3496,00	687,80	
C10 HB CPC	3496,00	687,80	
C13 HB CPF	750,00	745,50	
C17 HA CPC	2500,00	854,75	<b>800-1000</b>
C17 HB CPC	2500,00	854,75	
C7 HA CPC	3500,00	869,25	
C7 HB CPC	3500,00	869,25	
C18 HB CPF	600,00	882,75	

El comportamiento de los mecanismos de desgaste de acuerdo con la clasificación obtenida se muestra en la Figura 3-5 en donde el reperfilado por fatiga tiene una mayor frecuencia, con intervalo de reperfilado entre 0 a 600 días. El reperfilado por corrugación se repite a intervalos entre 0 a 1.000 días y en menor cantidad que el de fatiga. Las operaciones para ajuste de perfil son menos frecuentes con respecto a las debidas a fatiga y corrugación. Además, la mayor parte de las curvas que tienen un reperfilado entre 0 a 400 días son las que tienen un perfil de contacto rueda-riel HRC.

**Figura 3-5:** Clasificación de curvas por frecuencia de reperfilado.

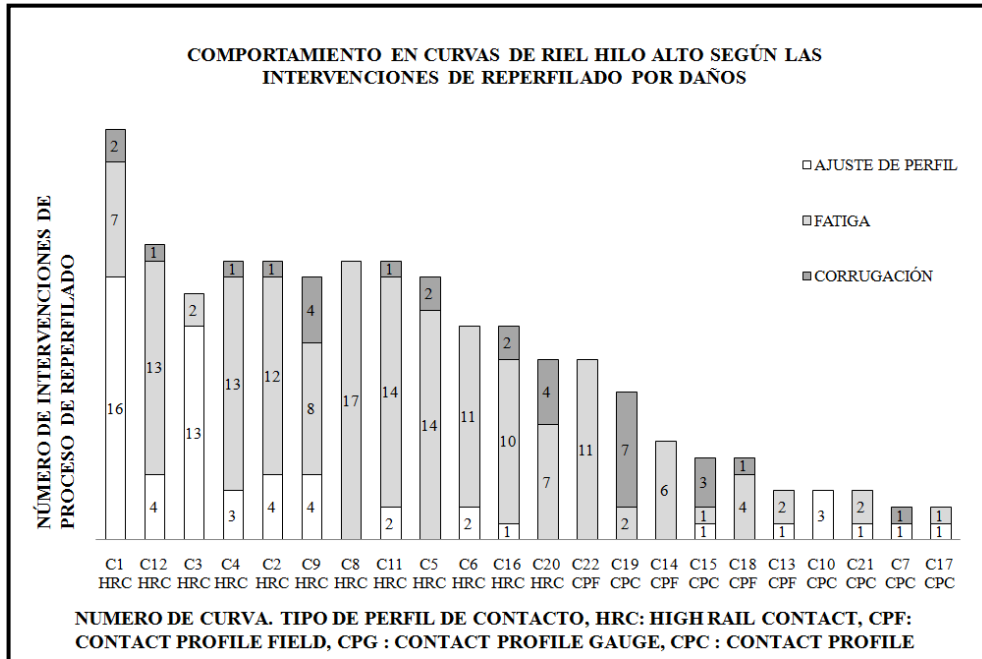


### 3.3 Correlaciones

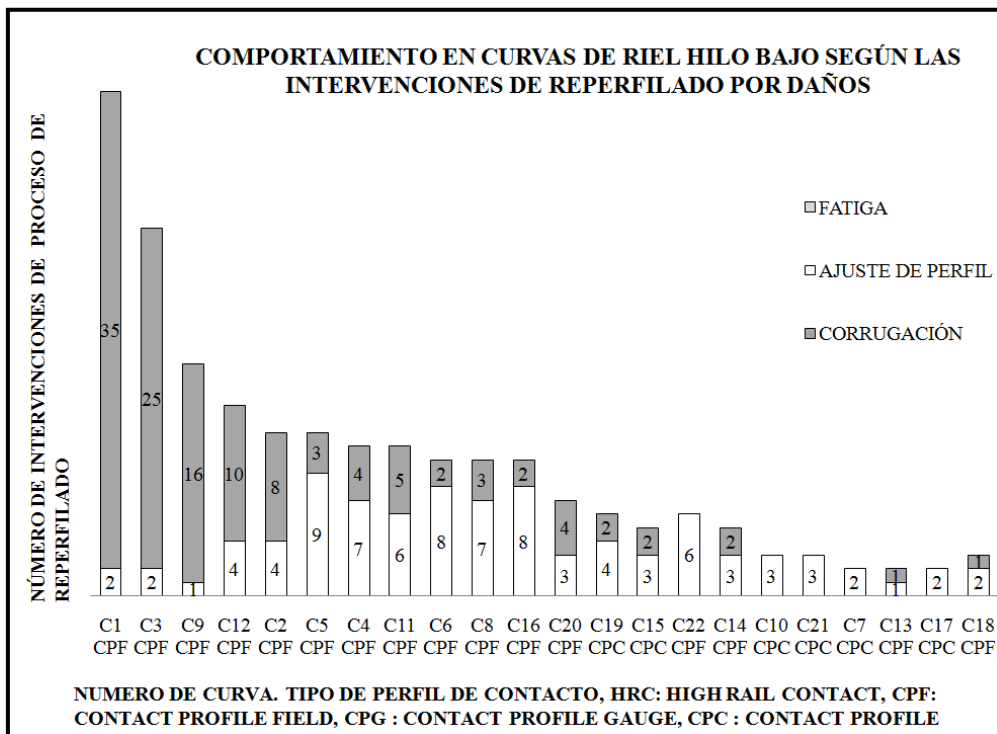
#### 3.3.1 Intervenciones de reperfilado, tipo de hilo en curva y mecanismo de desgaste

Las intervenciones de reperfilado en hilo alto se llevan a cabo para corregir problemas asociados en un 64% a fatiga, un 23% a corrugación y un 12% a ajuste de perfil, como se muestra en la Figura 3-6. A diferencia de hilo bajo donde no hay presencia de fatiga y sí un 60% de operaciones asociadas a corrugación. Con estos resultados se observa que para curvas con hilo alto es predominante la fatiga y para curvas con hilo bajo es predominante la corrugación.

**Figura 3-6:** Correlación: intervenciones de reperfilado, hilo alto y daño.



**Figura 3-7:** Correlación: intervenciones de reperfilado, hilo bajo y daño.



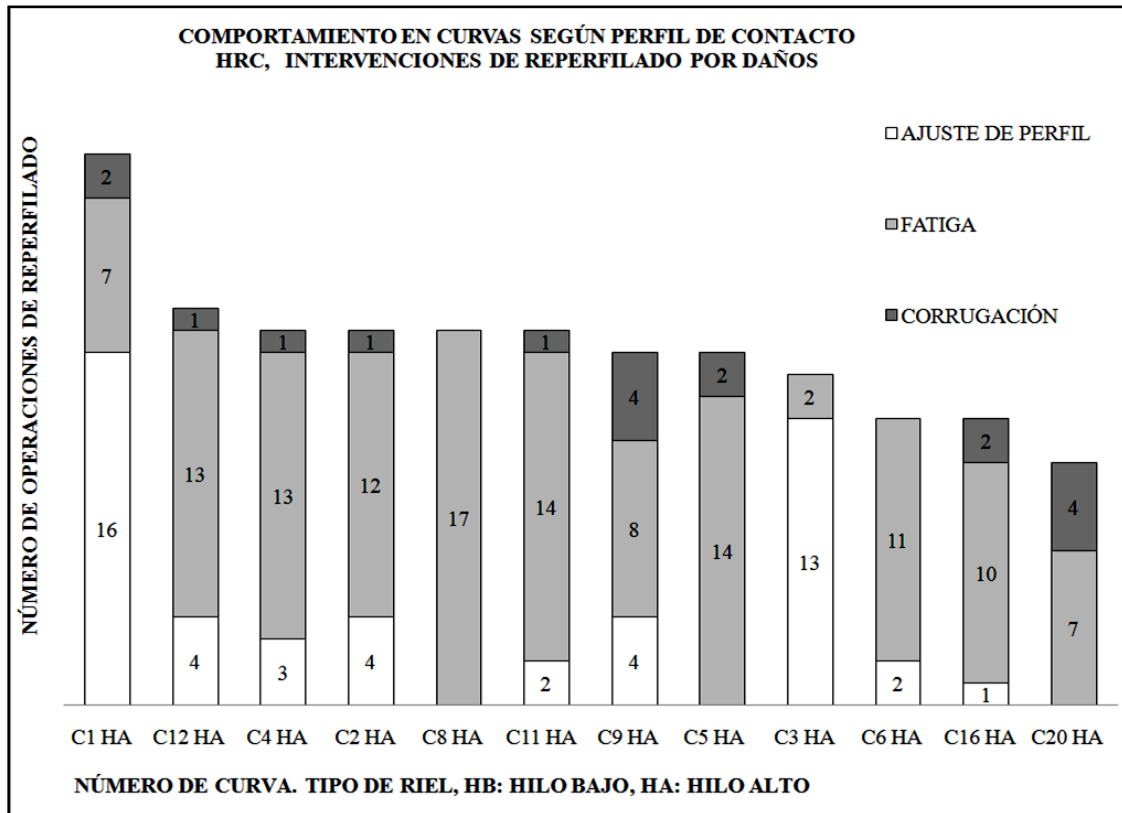


### 3.3.2 Intervenciones de reperfilado, perfil de contacto y mecanismo de desgaste

En este análisis de la correlación entre intervención de reperfilado, tipo de mecanismo de desgaste y tipo de perfil de contacto se muestra en las Figuras 3-8, 3-9, 3-10 que se presenta mayor fatiga cuando el perfil de contacto es de tipo HRC, las curvas que presentan mayor fatiga son C8 HA, C5 HA, C11 HA, C4 HA Y C12 HA.

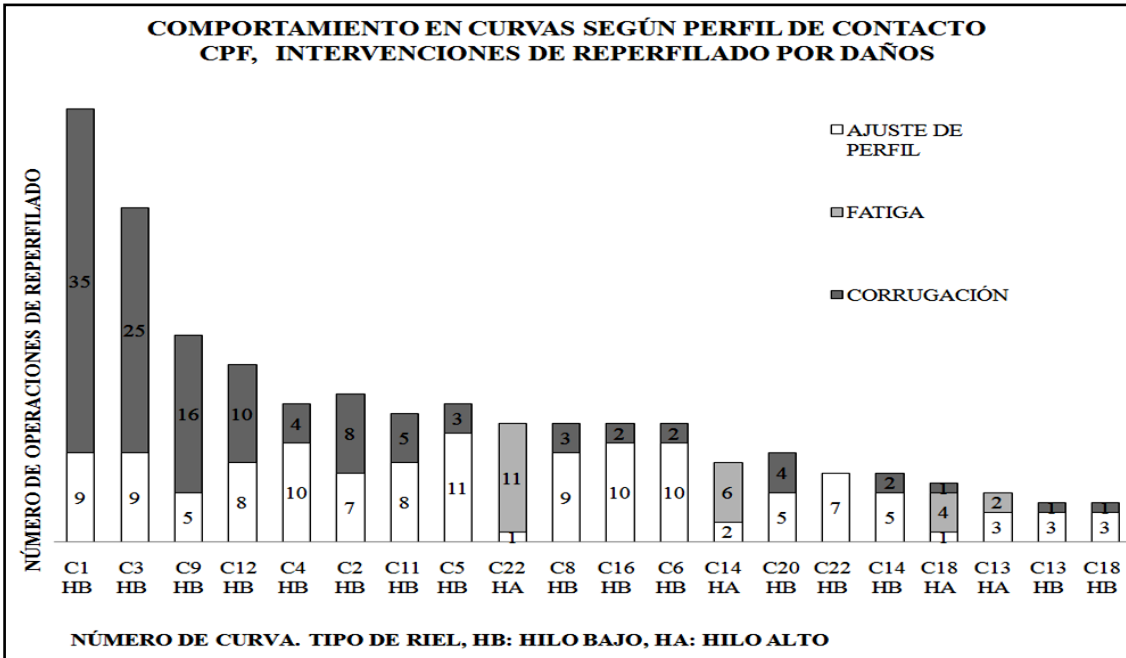
Por otro lado, la corrugación se presenta en mayor medida en perfiles de contacto CPF, continuado por contacto HRC y en menor medida en contacto CPC, las curvas que presentan mayor corrugación son C1 HB, C3 HB, C9 HB, C1 HA Y C3 HA.

**Figura 3-8:** Correlación entre intervenciones e reperfilado, perfil de contacto HRC, hilo y tipo de daño.

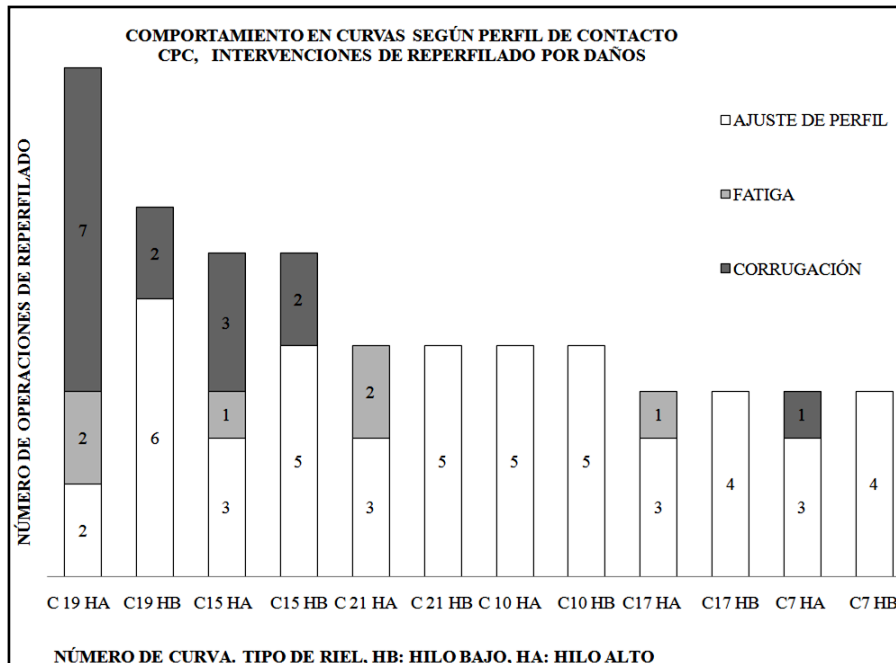


74 “Análisis experimental del efecto del proceso de reperfilado sobre el desgaste y fatiga por contacto de rodadura de riel en el sistema rueda-riel en el Metro de Medellín”

**Figura 3-9:** Correlación entre intervenciones de reperfilado, perfil de contacto CPF, hilo y tipo de daño.



**Figura 3-10:** Correlación entre intervenciones de reperfilado, perfil de contacto CPC, hilo y tipo de daño.



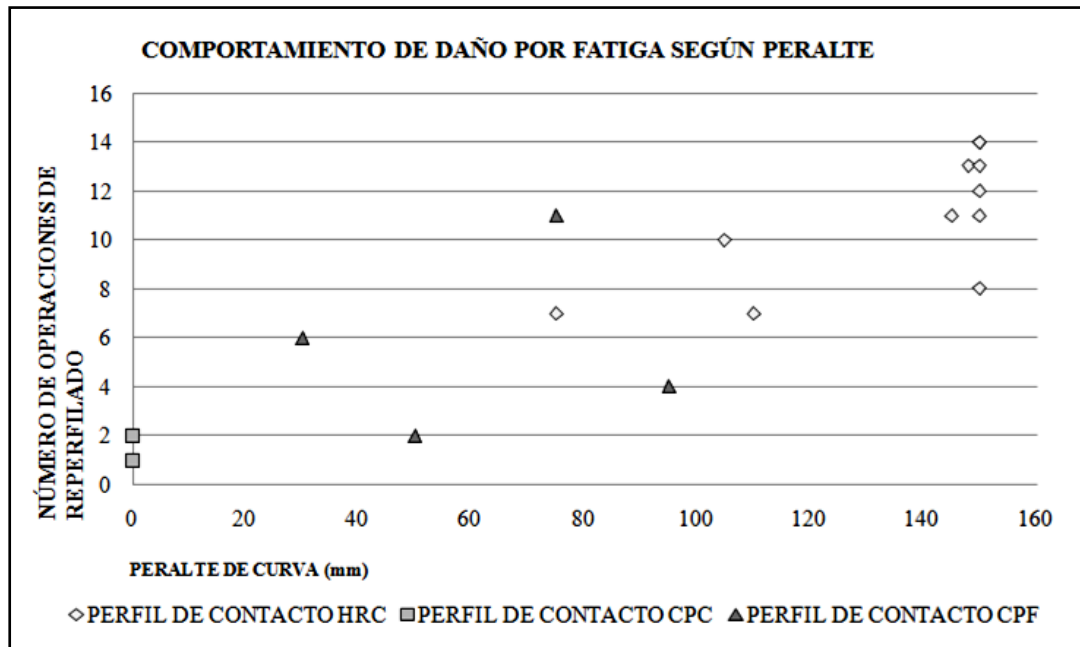
### 3.3.3 Intervenciones de reperfilado, Mecanismos de desgaste principales (fatiga y corrugación) y características de diseño del riel (peralte y radio de curva)

En este análisis se conoce el número de intervenciones por mecanismo de desgaste en cada curva en correlación con el peralte, el radio de curvatura de cada riel (ver Tabla 3-2) y el tipo de contacto rueda riel y el mecanismo de desgaste.

- **Intervenciones de reperfilado por fatiga, perfil de contacto y peralte**

Cuando el peralte es cero donde el perfil de contacto es CPC, la presencia de fatiga es responsable por el 4% de intervenciones de reperfilado mientras que para perfiles de contacto CPF la fatiga se presenta en el 15% de intervenciones de reperfilado con un peralte entre 30 y 95 mm. Cuando el perfil de contacto es HRC se presenta mayor fatiga que en los demás perfiles de contacto, siendo el 17% de intervenciones para peraltes entre 75 y 110 mm y 64% de intervenciones cuando el peralte está entre 140 y 150 mm, como se aprecia en la Figura 3-11.

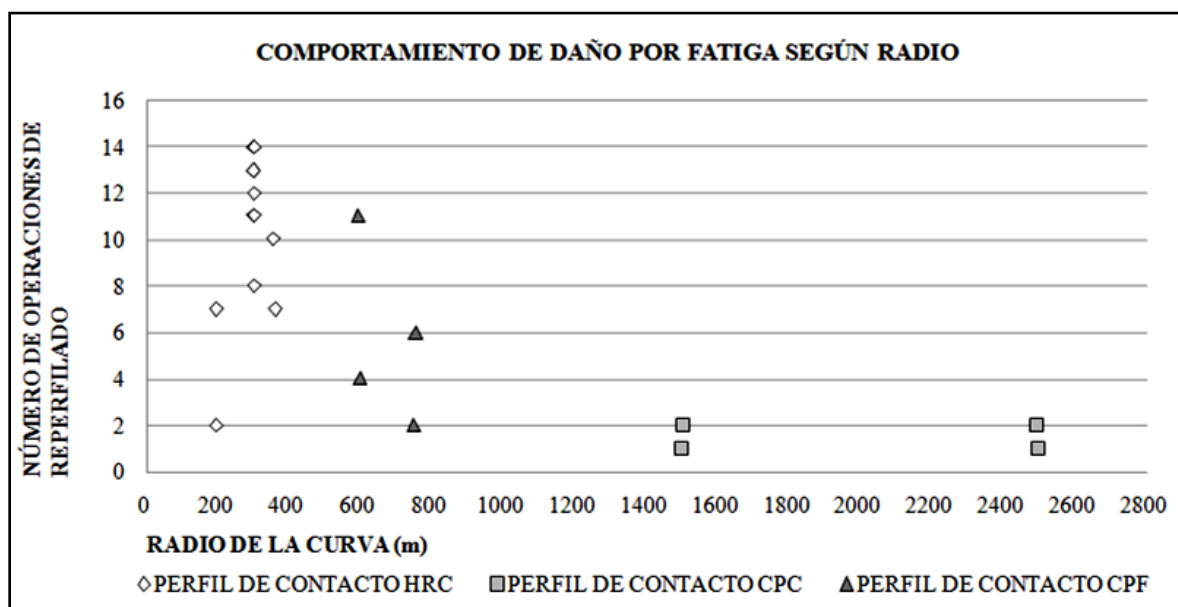
**Figura 3-11:** Correlación entre intervenciones de reperfilado por fatiga, perfil de contacto y peralte.



▪ **Intervenciones de reperfilado por fatiga, perfil de contacto y radio de curva**

Para perfiles de contacto HRC donde el radio de curvatura del riel está entre 200 y 400 m se presenta un 81% de intervenciones de reperfilado por fatiga. Para radios de curva entre 600 y 800 m hay un 15% de intervenciones menos que para perfiles CPC, y ya cuando el contacto es CPF el número de intervenciones de reperfilado por fatiga es de 4% mayor con respecto al resto de perfiles de contacto (ver Figura 3-12).

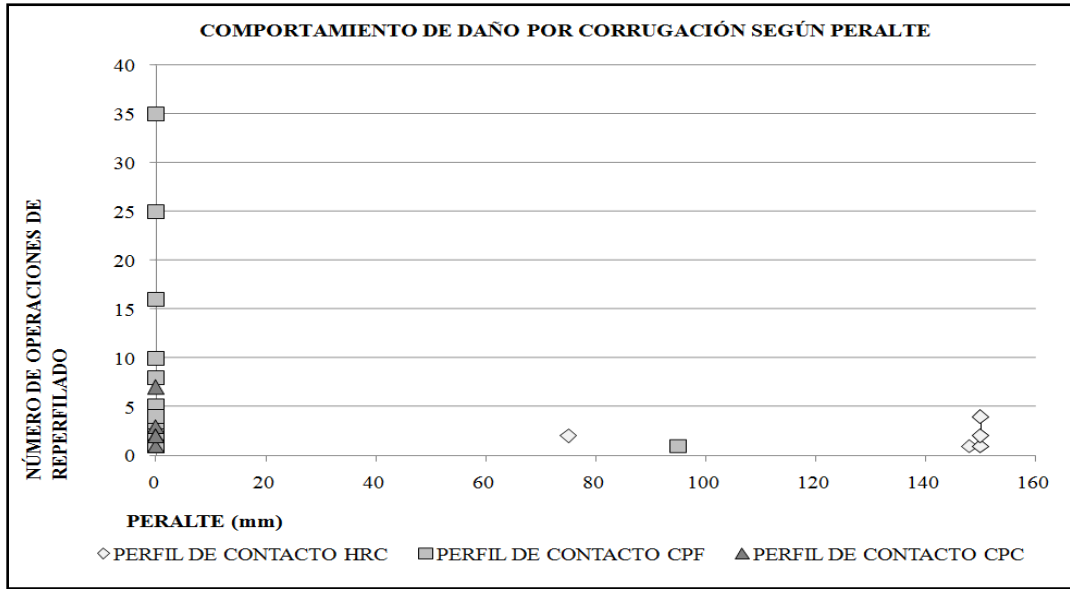
**Figura 3-12:** Correlación entre intervenciones de reperfilado por fatiga, perfil de contacto y radio de curvatura.



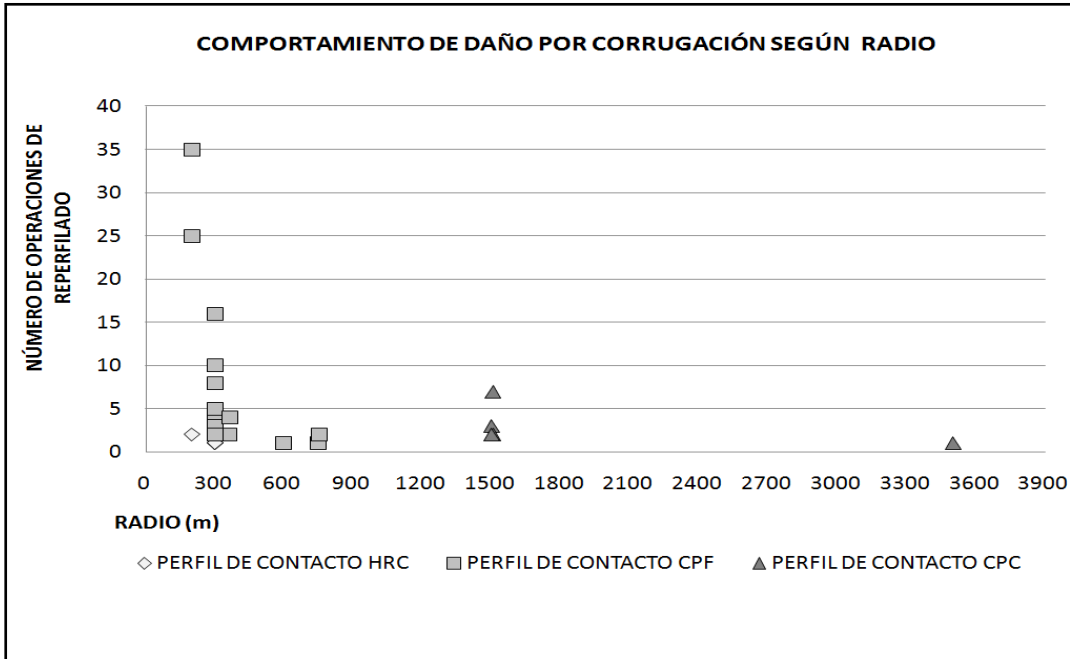
▪ **Intervenciones de reperfilado por Corrugación, perfil de contacto y peralte**

La corrugación se presenta en mayor medida cuando el perfil de contacto es CPF con un 79%, un 10% para perfil de contacto CPC y un 11% para contacto HRC. El análisis de corrugación vs radio de curva muestra que para radios entre 200 y 800 m las intervenciones por reperfilado son de un 90%, con ello, cuando el peralte es cero y cuando el radio de curva del riel están entre 200 y 800 m se presenta mayor corrugación, como se observa en las Figuras 3-13 y 3-14.

**Figura 3-13:** Correlación entre intervenciones de reperfilado por corrugación, perfil de contacto y peralte.



**Figura 3-14:** Correlación entre intervenciones de reperfilado por corrugación, perfil de contacto y radio.



Haciendo correlaciones de acuerdo con el daño presente, se encuentra la clasificación general mostrada en la Tabla 3-5.

78 “Análisis experimental del efecto del proceso de reperfilado sobre el desgaste y fatiga por contacto de rodadura de riel en el sistema rueda-riel en el Metro de Medellín”

**Tabla 3-5:** Porcentajes de daños principales (fatiga y corrugación) en función de las características de diseño de la vía.

FATIGA PREDOMINA			
PERFIL DE CONTACTO	RADIO	PERALTE	FRECUENCIA DE INTERVENCIÓN DE REPERFILADO
91% HRC HA - 9% CPF HA	300 a 596,25	75 a 150	221,42
CORRUGACIÓN PREDOMINA			
PERFIL DE CONTACTO	RADIO	PERALTE	FRECUENCIA DE INTERVENCIÓN DE REPERFILADO
100% CPF HB	200 a 300,75	0	275,98
FATIGA PREDOMINA Y CORRUGACIÓN MENOR			
PERFIL DE CONTACTO	RADIO	PERALTE	FRECUENCIA DE INTERVENCIÓN DE REPERFILADO
89% HRC HA- 11% CPF HA	200 a 363,75	0 a 150	250,65
CORRUGACIÓN PREDOMINA Y FATIGA MENOR			
PERFIL DE CONTACTO	RADIO	PERALTE	FRECUENCIA DE INTERVENCIÓN DE REPERFILADO
100% CPC HA	1500 a 3500	0	473,96

### 3.3.4 Frecuencias de Intervenciones de reperfilado, Mecanismos de desgaste principales (fatiga y corrugación), características de diseño del riel (peralte y radio de curva), y material removido

Dado que en el historial de *Miniprof* se tienen las medidas de perfil con sus respectivas fechas se realizó una correlación con reperfilado y se hizo el estudio para fatiga y corrugación y se presentaron los resultados de las curvas más representativas. En la Tabla 3-6 se presenta un promedio del material removido para cada curva y el desgaste total, los cuales indican que las curvas que mayor desgaste tienen, como por ejemplo las C12 HA, C4 HA, C8 HA, C1 HB, C3 HB, C9 HB, C12 HB Y C4 HB, tienen un promedio de material removido para fatiga por encima de 0.5mm para el parámetro W3 y para corrugación por encima de 0.8mm para W1, y para el resto de las curvas el material

supera los 0.5mm, lo que indica que aunque la cantidad de material es alta, cada curva tiene una frecuencia diferente en la que aparece el daño. Además, en cada curva hay una frecuencia donde aparece un mecanismo específico sea fatiga, corrugación, deformación plástica u otros daños, también como se especificará más adelante en las figuras de frecuencia para las curvas más críticas. Es posible que como la frecuencia de daño es diferente el daño sea bastante mayor en unas curvas que en otras y por ende el material removido sea excesivamente pequeño en las curvas con mayor desgaste y excesivamente elevado en las curvas con menores daños.

**Tabla 3-6:** Promedio de material removido y desgaste para cada curva.

Mecanismo de desgaste	Curva	Tipo de peralte	Forma de contacto	Número de reperfilados por mecanismo de desgaste		Parámetros de diseño del riel		Frecuencia de intervención de reperfilado (días)	Material que se remueve (mm)			Desgaste (mm)			Parámetro de operación
				F	C	Radio (m)	Peralte (mm)		W1	W2	W3	W1	W2	W3	Velocidad (km/h)
Predomina fatiga ante corrugación	C5	HA	HRC	14	2	300	150	228	0,44	0,42	0,44	6,59	6,28	6,54	65
	C12	HA	HRC	13	1	300	148,15	172	0,45	0,67	0,49	8,94	13,47	9,83	72
	C4	HA	HRC	13	1	300	150	182	0,45	0,58	0,48	8,05	10,46	8,55	70
	C11	HA	HRC	14	1	303,75	150	210	0,48	0,53	0,48	7,75	8,48	7,69	80
	C2	HA	HRC	12	1	303,75	150	191	0,5	0,58	0,49	8,58	9,85	8,27	80
	C9	HA	HRC	8	4	303,75	150	198	0,39	0,46	0,43	6,67	7,77	7,35	80
	C16	HA	HRC	10	2	360	105	261	0,54	0,65	0,59	6,97	8,41	7,68	50
	C20	HA	HRC	7	4	363,75	110	355	0,08	0,06	0,07	6,45	4,79	5,61	50
	C1	HA	HRC	7	2	200	75	121	0,2	0,21	0,25	5,69	6	7,16	38
C18	HA	CPF	4	1	600	95	589	1,07	0,23	0,58	5,37	1,14	2,9	80	
Predomina corrugación ante fatiga	C19	HA	CPC	2	7	1503,75	0	434	0,67	0,27	0,54	4,68	1,92	3,78	40
	C15	HA	CPC	1	3	1500	0	514	0,56	0,03	0,3	3,37	0,17	1,77	50
Sólo fatiga	C14	HA	CPF	6	0	753,75	30	405	0,84	0,76	0,81	6,72	6,12	6,47	50
	C13	HA	CPF	2	0	750	50	596	0,89	0,03	0,46	4,46	0,15	2,28	50
	C8	HA	HRC	11	0	300	150	191	0,5	0,63	0,5	8,5	10,69	8,58	82
	C6	HA	HRC	11	0	303,75	145	252	0,5	0,55	0,53	6,45	7,1	6,95	70
	C22	HA	CPF	11	0	596,25	75	296	0,94	0,52	0,87	7,51	4,18	6,96	40
	C3	HA	HRC	2	0	200	0	172	0,18	0,12	0,17	3,51	2,42	3,37	38
	C21	HA	CPC	2	0	2496,25	0	622	0,76	0,36	0,65	3,78	1,79	3,27	80
C17	HA	CPC	1	0	2500	0	855	0,92	0,28	0,26	2,75	-0,83	0,79	80	

**Tabla 3-6:** (Continuación)

Mecanismo de desgaste	Curva	Tipo de peralte	Forma de contacto	Número de reperfilados por mecanismo de desgaste		Parámetros de diseño del riel		Frecuencia de intervención de reperfilado (días)	Material que se remueve (mm)			Desgaste (mm)			Parámetro de operación
				F	C	Radio (m)	Peralte (mm)		W1	W2	W3	W1	W2	W3	Velocidad (km/h)
Solo corrugación	C1	HB	CPF	0	35	200	0	90	0,58	0,69	0,54	12,23	14,47	11,3	38
	C3	HB	CPF	0	25	200	0	112	0,61	0,49	0,47	13,43	10,84	10,34	38
	C9	HB	CPF	0	16	303,75	0	179	0,63	0,44	0,55	10,69	7,48	9,36	80
	C2	HB	CPF	0	8	303,75	0	254	0,73	0,85	0,68	8,79	10,23	8,21	75
	C11	HB	CPF	0	5	303,75	0	277	0,5	0,17	0,34	6,5	2,18	4,38	80
	C6	HB	CPF	0	2	303,75	0	316	0,61	0,23	0,44	6,66	2,58	4,82	70
	C12	HB	CPF	0	10	300	0	203	0,71	0,93	0,69	12,11	15,74	11,65	70
	C4	HB	CPF	0	4	300	0	248	0,79	1,11	0,69	10,24	14,43	8,99	70
	C5	HB	CPF	0	3	300	0	278	0,55	0,22	0,38	6,54	2,61	4,59	68
	C8	HB	CPF	0	3	300	0	301	0,58	0,27	0,42	6,43	3	4,59	85
	C20	HB	CPF	0	4	363,75	0	422	0,77	0,22	0,5	5,4	1,56	3,53	50
	C16	HB	CPF	0	2	360	0	305	0,55	0,11	0,35	6,04	1,16	3,84	50
	C19	HB	CPC	0	2	1503,75	0	434	0,39	0,01	0,31	4,26	0,12	3,38	45
	C15	HB	CPC	0	2	1500	0	514	0,56	0,08	0,14	3,39	0,48	0,85	45
	C14	HB	CPF	0	2	753,75	0	463	0,71	0,14	0,44	4,98	0,97	3,11	50
	C13	HB	CPF	0	1	750	0	746	0,92	0,07	0,25	3,67	0,28	0,98	40
C18	HB	CPF	0	1	600	0	883	1,63	0,02	0,7	4,89	0,05	2,11	80	

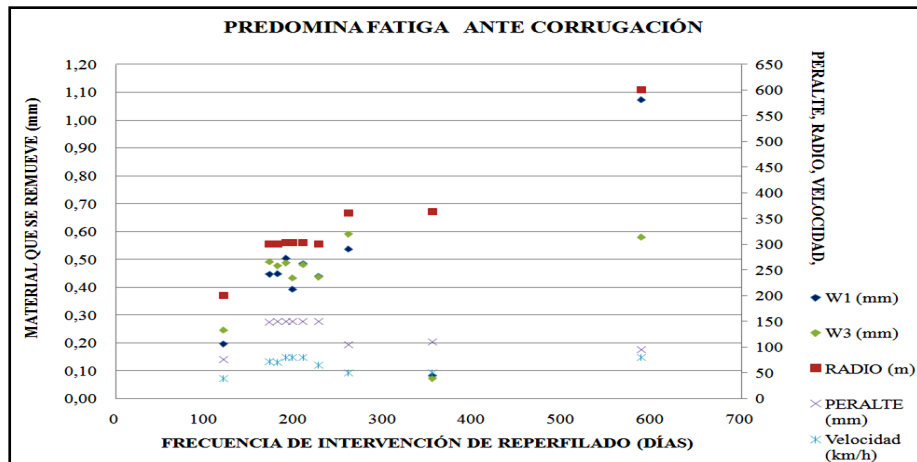
- **Frecuencias de Intervenciones de reperfilado, fatiga, peralte, radio de curva y material removido.**

El material removido que se obtuvo en los datos de *Miniprof* muestra que en la mayoría de los reperfilados por fatiga se remueve tanto para W1 y W3 ~0.5mm, observando detalladamente las curvas que mayor frecuencia de reperfilado tienen para fatiga son las de radio ~200m, peralte menor a 100mm y velocidad de operación ~50km/h y en estos casos en material removido fue inferior a 0.5mm indicando que la frecuencia del daño puede darse porque no se removió el material defectuoso completamente; las curvas que tienen un radio del orden de 300m y un peralte cercano a 150mm y con velocidad por encima de los 50km/h tienen una frecuencia de reperfilado de aproximadamente 200 días

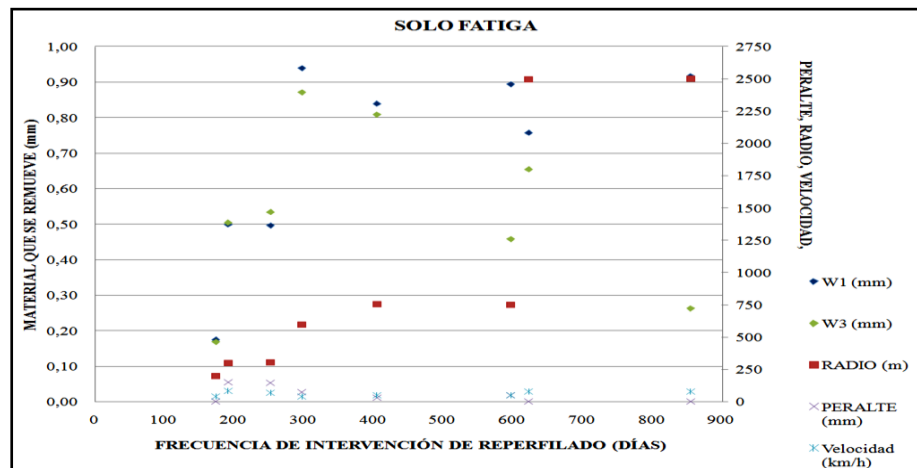


y la cantidad de material que se removió estuvo entre 0.45 y 0.5 mm, tanto donde predomina fatiga ante corrugación, como donde se presenta sólo fatiga. Para las curvas con radio mayor a 300m la frecuencia de reperfilado es menor y la cantidad de material es mayor o igual a 0.6mm para W1 y para W3 es menor a 0.5mm indicando que es posible que haya una frecuencia específica relacionada con el radio, el peralte y la velocidad de operación que hace que se potencie cada mecanismo de daño, aunque se observa también que teniendo una buena cantidad de material la vida útil del riel aumenta: Esto se puede observar en las dos gráficas a continuación.

**Figura 3-15:** Correlación entre frecuencias de Intervenciones de reperfilado, Fatiga, peralte, radio y material removido. a) Predomina daño por fatiga ante corrugación y b) daño solo de fatiga.



a)



b)

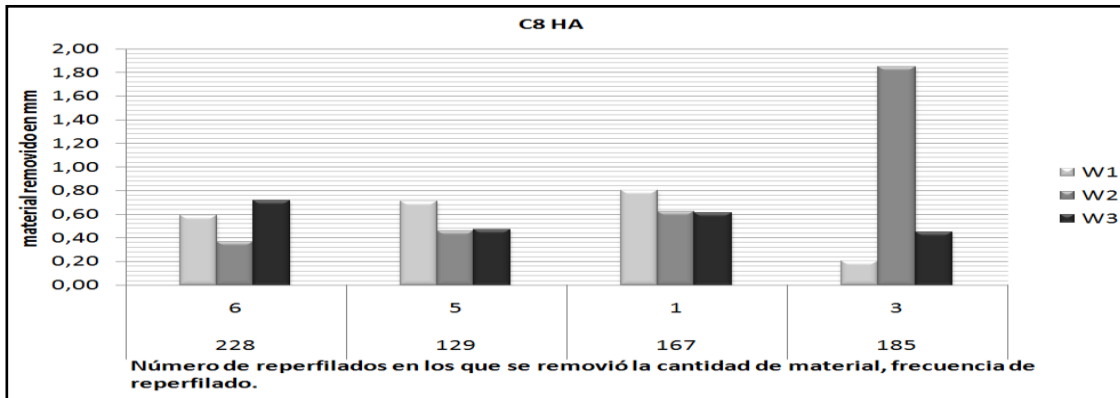
De acuerdo con las medidas de referencia del *Miniprof* y a que los mecanismos de desgaste, en este caso fatiga, se presentan en mayor medida cuando el perfil de contacto rueda-riel es HRC, el dato del material removido que más interesa es W3 (ver Figura 2-3 y 3-1), que es donde se da esta forma de contacto. Cuando se remueve en los primeros reperfilados una cantidad mayor a 0.9mm de material del riel la tendencia es a subir en número de días de reperfilados hasta alcanzar hasta 665 días sin realizar nuevas intervenciones; cuando el material removido en el riel en la zona W3 es menor el número de días para realizar la próxima intervención baja a valores entre 70 y 135 días.

De las curvas C8 HA y C5 HA analizadas para la relación entre fatiga y material removido, se observa que la que mayor desgaste presenta es la Curva C8 HA y es la que tiene mayor número de intervenciones de reperfilado. Al observar la curva C14 HA (Anexo B.2), ésta presenta menor desgaste por fatiga y el material que se removió en esta curva la mayoría de las intervenciones de reperfilado fue mayor a 0.8 mm en W2, esta cantidad de material es mayor que la cantidad de material que se removió en las otras curvas C8 HA y C5 HA, existiendo así un aumento significativo en la vida útil del riel (ver Figura 3-15).

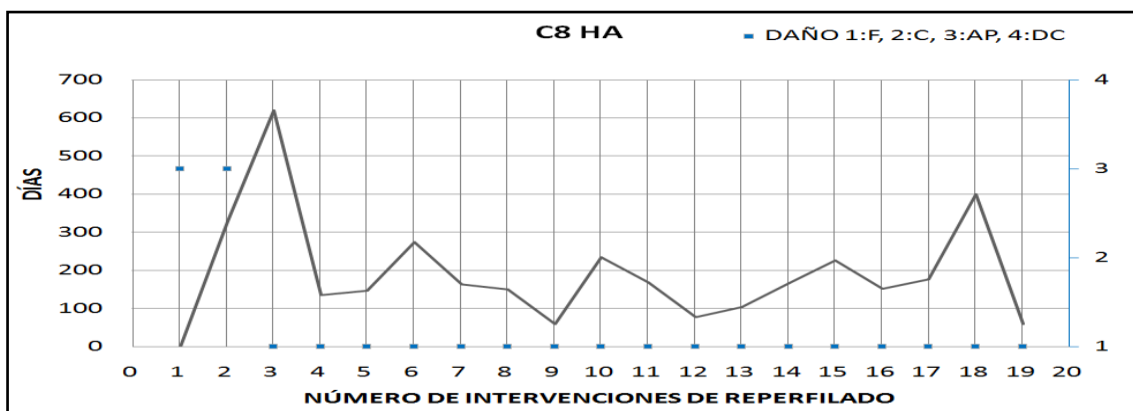
En la Figura 3-16 se puede ver que es posible que los intervalos entre reperfilados se hagan menores porque el daño por fatiga no se removió completamente, ya que la frecuencia en las intervenciones de reperfilado alcanza en algunas intervenciones más de 400 días, indicando que cuando se remueve lo suficiente o lo adecuado el daño se mitiga, y además de encontrar de manera evidente que es importante remover cierta cantidad de material de la superficie del riel para que el daño en el riel sea mitigado, se observó que en algunas curvas el desgaste reportado por las medidas de *Miniprof*, que hay presencia de deformación plástica dado por los valores negativos de desgaste, indicando que no es sólo pérdida de masa sino también esta deformación de perfil, lo que nos lleva a concluir que el material que se remueve es menor que el calculado.

En la Figura 3-17 se puede observar lo descrito anteriormente para las curvas C8 y C5 donde se gráfica el promedio de material removido, la curva de intervenciones de reperfilado y la curva de desgaste, y en el Anexo B.2 se encuentran las gráficas para cada curva y se evidencia el comportamiento que cada una presenta.

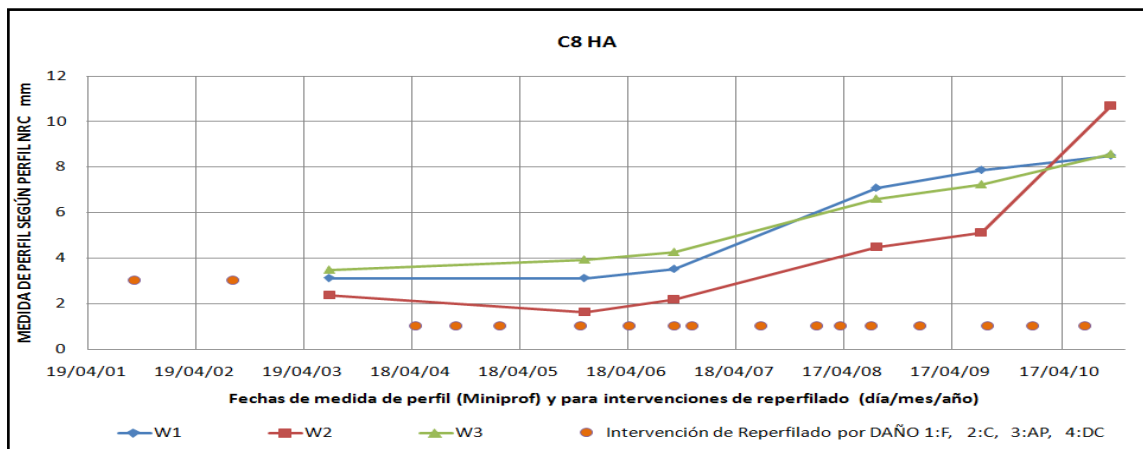
**Figura 3-16:** C8 HA a) promedio de material removido, b) curva de intervenciones de reperfilado, c) curva de desgaste.



a)

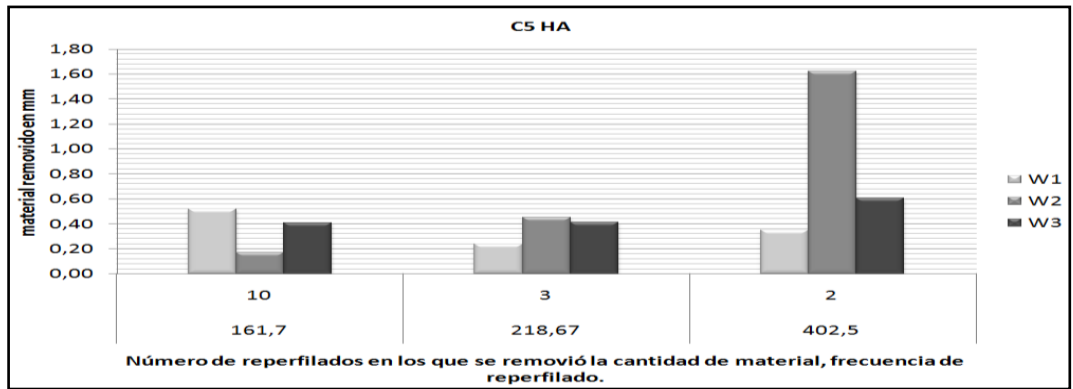


b)

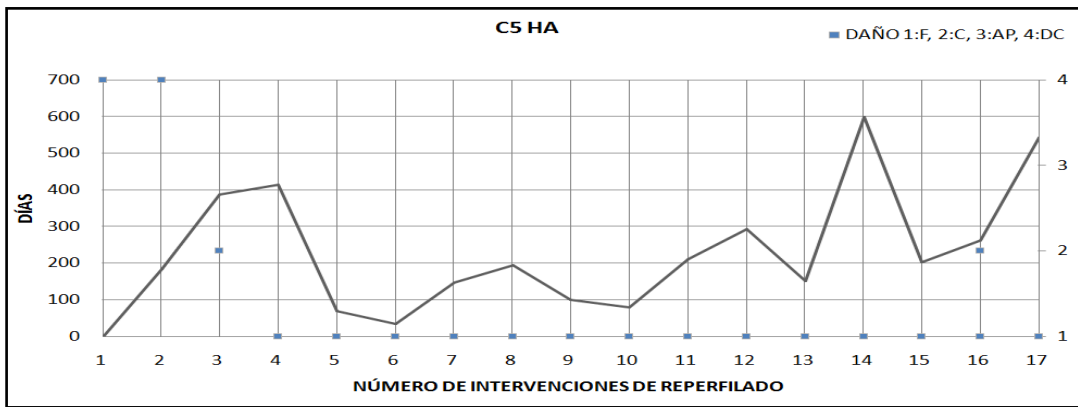


c)

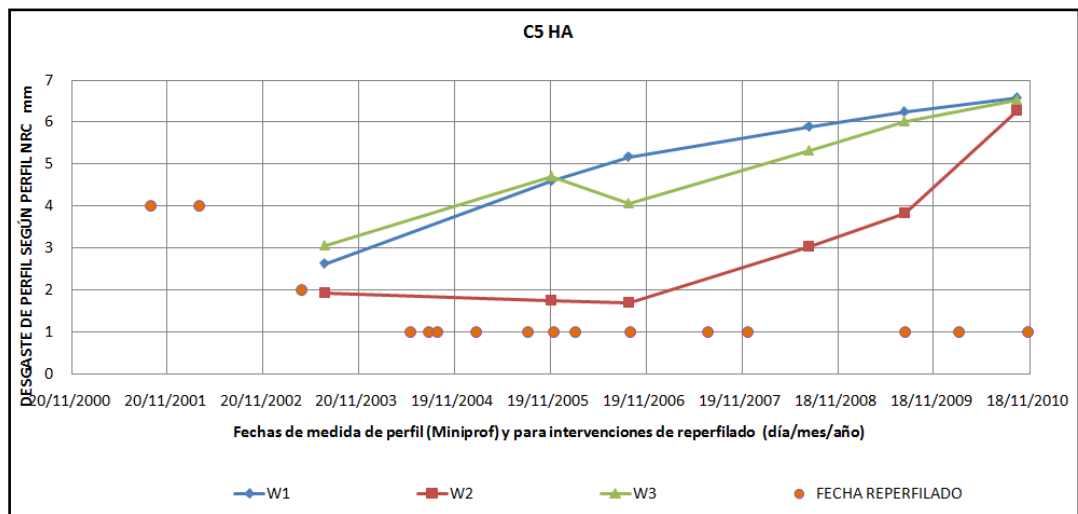
**Figura 3-17:** C5 HA. a) promedio de material removido, b) curva de intervenciones de reperfilado, c) curva de desgaste.



a)



b)

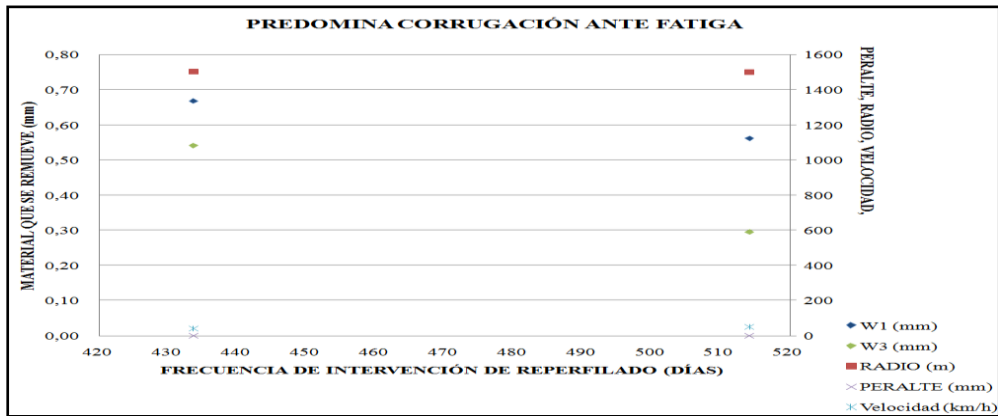


c)

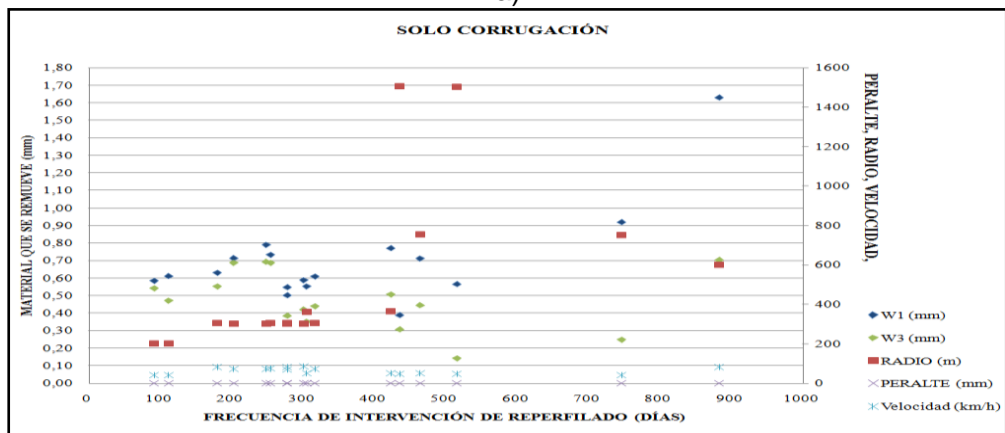
- **Frecuencias de Intervenciones de repavimentado, corrugación, peralte, radio de curva y material removido**

En la Figura 3-18 donde predomina corrugación ante fatiga se observa que curvas con las mismas características de radio, peralte y velocidad tienen diferentes frecuencias de repavimentado y se hace evidente que no es por la cantidad de material removido en W1 y W3, ya que las que presentan mayor frecuencia en días de repavimentado tienen menor cantidad de material removido, esto promueve la misma discusión del repavimentado por fatiga, pues es evidente que cada curva tiene una frecuencia donde aparece el mecanismo de desgaste y también puede decirse que el daño es mayor.

**Figura 3-18:** Correlación entre frecuencias de Intervenciones de repavimentado, corrugación, peralte, radio y material removido. a) daño predominante corrugación ante fatiga y b) daño sólo de corrugación.



a)



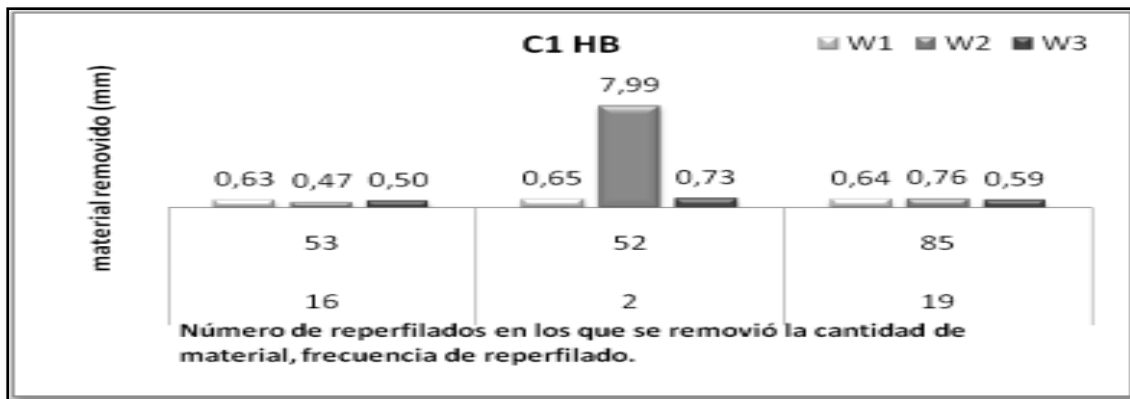
b)

Cuando se presenta sólo corrugación en las curvas, se evidencia lo presentado anteriormente en el sentido de que hay una frecuencia de reperfilado específica que relaciona el radio de la curva, el peralte y la velocidad de operación, ya que para curvas con las mismas características el material que se remueve no es igual y las frecuencias varían manteniéndose entre 200 y 300 días, es posible que el daño sea mayor y que el material removido no sea el adecuado y haya que aumentarlo, como lo evidencian las gráficas específicas de las curvas.

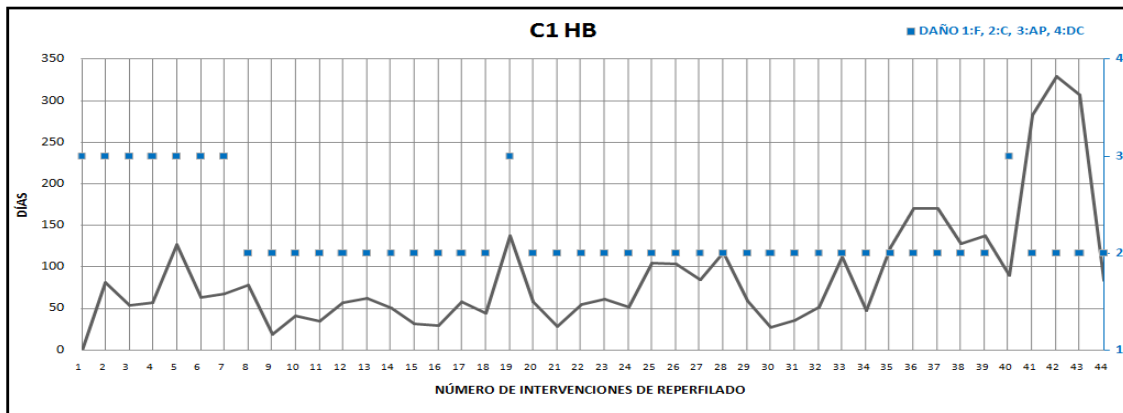
### **3.3.5 Corrugación y material removido**

En las Figuras 3-19 y 3-20 se puede apreciar la curva C1 HB CPF (una de las curvas más críticas para corrugación y la que mayor cantidad de intervenciones de reperfilado presenta en las 22 curvas estudiadas) en la que en las primeras 16 intervenciones de reperfilado se removió 0.47mm y el intervalo entre cada intervención no superó los 150 días. Luego en las dos intervenciones siguientes se removió 7.99mm y el intervalo de reperfilado se redujo marginalmente, luego en las siguientes intervenciones se removió aproximadamente 0.59mm y los días entre cada reperfilado aumentaron un poco; todo esto indica que el material que se removió no era el suficiente en las primeras intervenciones haciendo que la corrugación disminuyera pero no se eliminaba del todo, aunque se removió mucho material en las intervenciones 17 y 18, se puede observar que el problema persistió. Si se observan las medidas de CAT de la curva se puede ver que las intervenciones de reperfilado disminuyeron pero el daño no se eliminó completamente (ver Figuras 3-20a) y 3-20b)). Hay que hacer la claridad que el riel se cambió después del reperfilado 28, lo que muestra que como en las intervenciones de reperfilado anteriores no se removió el material adecuado el desgaste aumentó significativamente, y que después del cambio de riel el material que se removió no fue el adecuado por las curvas del RMS y el % de excedencia estaban por encima de la norma. Al igual que en el análisis hecho para fatiga la curva de desgaste indica que hay deformaciones significativas en el riel y que la cantidad de material que se remueve es menor a la calculada.

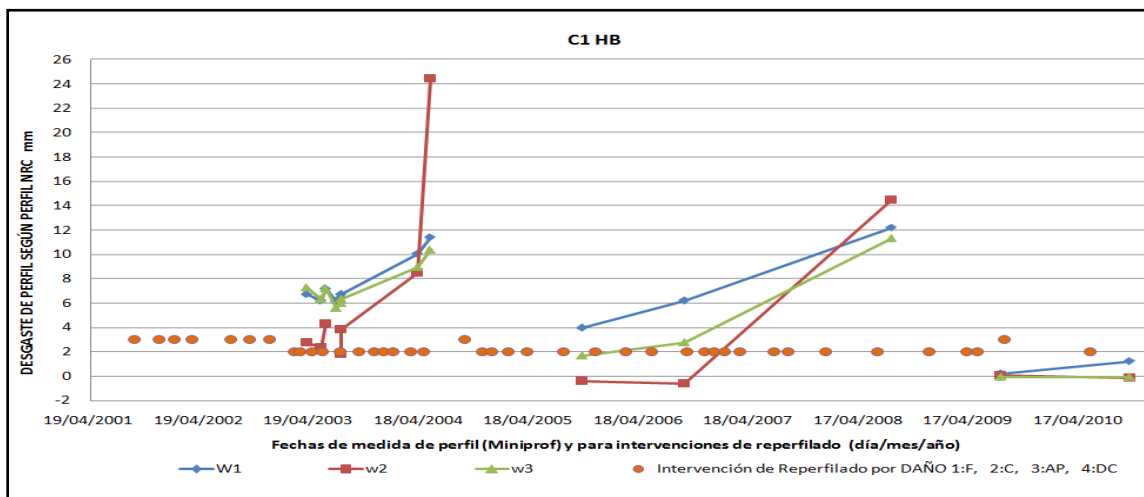
**Figura 3-19:** C1 HB. a) promedio de material removido, b) curva de intervenciones de reperfilado, c) curva de desgaste.



a)

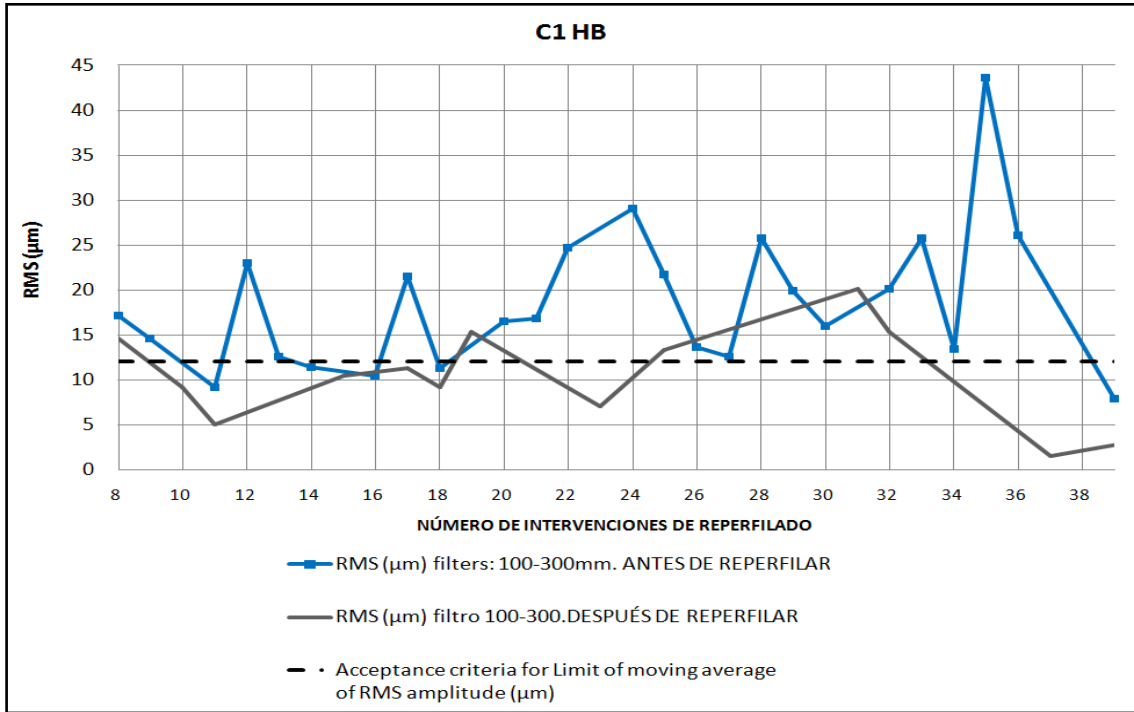


b)

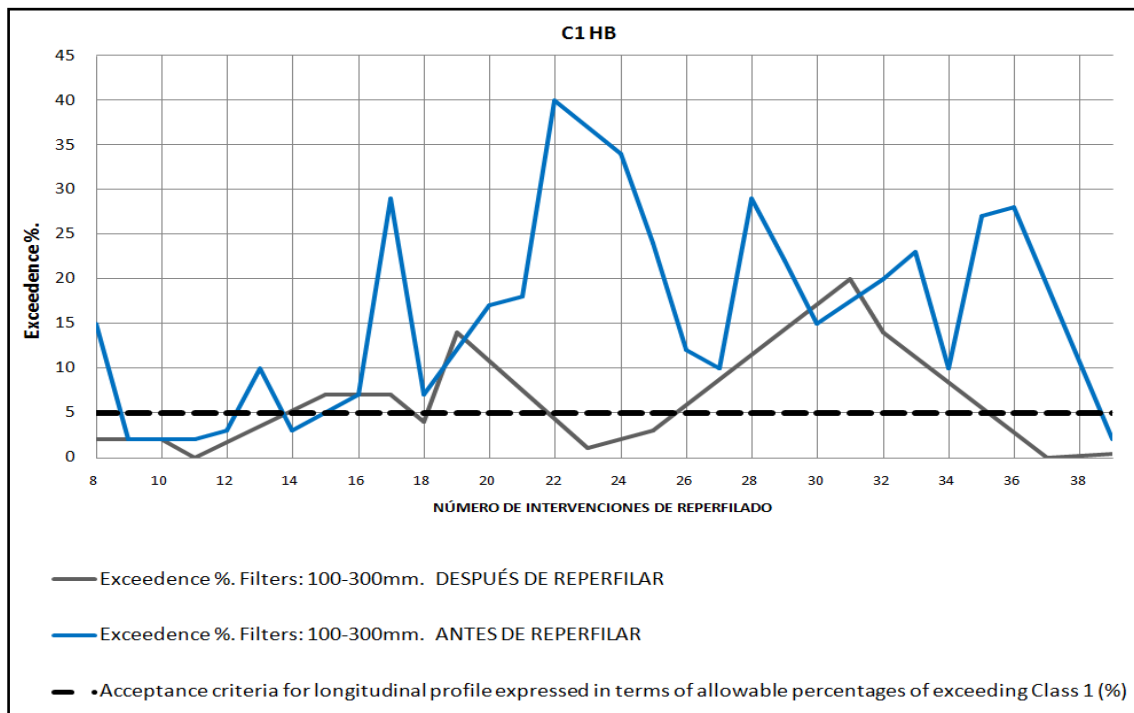


c)

Figura 3-20: C1 HB, a) medida de RMS, b)% Excedencia.



a)

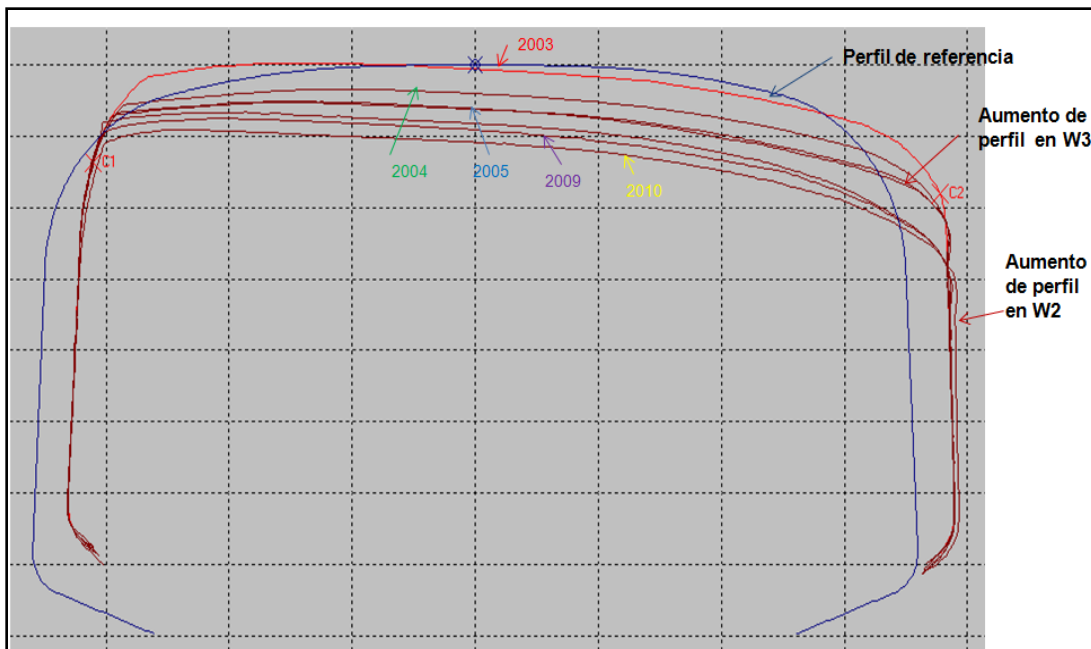


b)



En la Figura 3-21 se pueden apreciar los perfiles correspondientes a medidas tomadas en el mismo punto del riel en la curva C1HB con Miniprof en diferentes fechas, en donde se ve cómo cambia la sección del riel para las diferentes medidas tomadas en el tiempo. Se puede observar que para los puntos W2 y W3 hay un efecto de deformación plástica que influye sobre la medición puesto que se genera una falsa apreciación de desgaste negativo, es decir, de aumento de las medidas del riel con respecto a la medida de referencia (perfil azul). Esto indica que los valores tomados de W2 y W3 desde el 2002 al 2004 para sacar las curvas de desgaste en milímetros de esta curva dan una información imprecisa del desgaste e igualmente pasa con las demás curvas analizadas (ver [Anexo B2](#)).

**Figura 3-21:** Perfiles de desgaste para C1HB tomados con Miniprof en diferentes fechas.



### 3.4 Discusión

En términos generales, la corrugación se observó preferentemente en los rieles de hilo bajo, mientras que los *head-checks* se encontraron en los rieles de hilo alto de curvas cerradas, es decir, aquellos con mayor cantidad de desgaste.

Al tener en cuenta los rieles tanto de hilo alto y bajo los defectos más importantes que se encuentran en el campo son los *head-checks*. De hecho, las operaciones de mantenimiento de reperfilado en la vía férrea se determinan por la detección de estos defectos mediante la inspección visual. Si los *head checks* no se remueven en el tiempo que aparecen en el riel dan lugar a grandes descascaramientos (véase la Figura 3-2a). Después del reperfilado, la rugosidad del riel en la zona de contacto es alta ( $R_a=5-6 \mu\text{m}$ ) pero después de alrededor de dos semanas se reduce a  $R_a = 1.5\mu\text{m}$ , lo que significa que las altas tensiones en la superficie deforman plásticamente la superficie reperfilada y si no se removi6 la zona fatigada en el reperfilado se crea una condici6n m6s cr6tica para el crecimiento de las grietas de fatiga para seguir creciendo. Los procedimientos de reperfilado cambian efectivamente la microestructura de la superficie form6ndose martensita, y en consecuencia, la respuesta a la fatiga de los rieles se ve seriamente afectada. En particular, las microgrietas formadas en la superficie como consecuencia de la transformaci6n martens6tica pueden actuar como sitios de nucleaci6n para las grietas de fatiga, cuyo crecimiento en particular reduce la vida de fatiga de los rieles.

La Figura 3-3a muestra las estadísticas de los procedimientos de reperfilado realizados en las 22 curvas de la l6nea durante 10 a6os organizados por la principal causa de reperfilado y la Figura 3-3b muestra el porcentaje del total de operaciones de reperfilado para los rieles tanto de hilo alto como el hilo bajo. Se puede observar que es en los hilos altos donde la operaci6n se realiza m6s frecuentemente. En la mayor6a de los casos, las tareas de mantenimiento se llevan a cabo porque aparecen signos de fatiga, mientras que la corrugaciones el defecto m6s importante que se encuentra en el campo para rieles con hilo bajo. En todos los casos, la fatiga se localiza preferentemente en el hilo alto (ver Figura 3-3c) que representa el 71% de las operaciones de reperfilado, mientras que la corrugaci6n apareci6 preferentemente en hilo bajo (ver Figura 3-3d) que es responsable del 51% de las operaciones de reperfilado. Por otra parte, a partir de los resultados descritos en la Figura 3-3, se puede concluir que el RCF es el tema m6s importante para la l6nea.

En la Figura 3-4 se muestran las curvas con el mayor n6mero de procedimientos de reperfilado, as6 como la correspondiente causa principal de los da6os. Se puede observar

que a pesar de que la fatiga es la cuestión más relevante para la línea, la corrugación juega un papel importante en varias curvas. De hecho, las dos curvas con el mayor número de procedimientos de reperfilado, lo que representa el 9% del total, son debido a corrugación, estas son C1 HB y C3 HB.

La clasificación de los procedimientos de reperfilado para las diferentes curvas muestra la principal causa de mecanismo de desgaste que se presenta en cada una de ellas, tanto para hilo alto como bajo, además se muestra el análisis realizado para identificar el intervalo medio entre las operaciones de reperfilado, el mecanismo de desgaste, la forma de contacto rueda-riel y el radio de la curva, en donde los intervalos se clasificaron en 5 grupos, a saber, de 0 a 200 días, de 200 a 400 días, de 400 a 600 días, de 600 a 800 días y de 800 a 1000 días, en estos dos últimos rangos están las rectas. El tráfico acumulado por año en la línea es 6Mton; dado que el 24% de las curvas estudiadas se reperfilaron en promedio cada 200 días (3.3Mton) se puede decir que los intervalos de reperfilado son inusualmente cortos en comparación con los encontrados en la literatura [4, 36, 63, 64, 65, 66]. Además, en las curvas más críticas las operaciones de reperfilado se realizan como mínimo cada 100 días (1.6Mton).

El periodo de intervalos también es útil para la clasificación de los daños en las curvas en función del número de días requeridos para realizar RG, así se clasifica como grave (menor a 200 días), medio (200 a 400 días), y leve (superior a 400 días), el análisis del tipo de perfiles en las curvas para el intervalo 0 a 200 días reveló que 70% de ellos son perfiles de que tienen contacto con la rueda del tipo HRC. Para el intervalo entre 200 y 400 días, el 62% de los perfiles son CPC y para las curvas con intervalos de reperfilado entre 400 y 600 días, el 60% de los perfiles son CPF. Este comportamiento revela que el tipo de perfil en el que la rueda hace contacto con el riel es un tema muy importante para la línea, por lo que la optimización del perfil es recomendable especialmente para las curvas cerradas (aquellas con intervalos inferiores a 200 días).

Dado que con el tipo de perfil se encontró que era una cuestión importante, el número de procedimientos de reperfilado realizados se representó frente al tipo de perfil para hilo alto y bajo, los resultados se muestran en la Figura 3-6 y la Figura 3-7, respectivamente. De la Figura 3-7 se puede concluir que existe una correlación directa entre los perfiles

CPC y el número de operaciones de RG que se realizan en el campo. Además, para las curvas 1, 3 y 9 el desgaste ondulatorio es una preocupación. Las curvas fueron clasificadas en función del número de operaciones de RG causados por el desgaste ondulatorio de la siguiente manera: desgaste ondulatorio grave (más de 17 operaciones), desgaste ondulatorio medio (de 8 a 14 operaciones) y desgaste ondulatorio leve (menos de 8 operaciones). La Figura 3-8 muestra que en la mayoría de los perfiles HRC, la fatiga es el mecanismo de desgaste más importante encontrado en campo. Por otra parte, el número de operaciones de reperfilado causado por la fatiga (de 13 a 17) en varias curvas es significativo del comportamiento o el estado actual de la línea. De la Figura 3-6 y la Figura 3-7, la curva 1 se puede clasificar como la curva más problemática de la línea B.

El número de operaciones de reperfilado también pueden ser correlacionadas con otros parámetros del riel, como el radio de la curva y con el peralte del riel. En las curvas con mayor peralte en el riel el número de operaciones es también mayor. Además, en la Figura 3-11 es evidente que para las curvas con un radio menor que el número de operaciones es también mayor. Sin embargo, hay varias curvas con bajo número de operaciones y radio mayor, esto puede explicarse por otros parámetros tales como la velocidad del tren que cambia las fuerzas laterales provocando la deformación plástica en la superficie del riel.

Después de analizar los datos disponibles, en un esquema general que muestra las principales correlaciones entre los mecanismos de desgaste y los parámetros de diseño tales como el perfil de contacto, radio de curvatura y peralte, se puede ver que la fatiga es predominante en rieles de hilo alto mientras que la corrugación es la cuestión más importante en los rieles de hilo bajo.

La inspección visual de la sección transversal de los rieles reperfilados reveló que en muchos casos un número de grietas todavía estaban presentes después del reperfilado, mostrando grietas que va desde la superficie hasta 0.4-0.5 mm de profundidad. Esto demuestra que varios defectos relacionados con la fatiga no fueron removidos completamente durante los procedimientos de reperfilado, lo que conduce a una reducción en la resistencia a RCF [2, 67].

Por otro lado, la corrugación no se eliminó completamente tampoco. La Figura 3-21 muestra el análisis de CAT para una curva de hilo bajo de 200 m de radio (C1 HB) antes y después realizar las operaciones de reperfilado. En donde se puede concluir que, después reperfilar todavía hay algunos picos relacionados con las frecuencias de corrugación entre 50Hz - 100Hz. Además, la Figura 3-21 muestra el RMS y la excedencia después del reperfilado así como los criterios de aceptación se encuentran en la norma internacional para evitar la ondulación [68, 69]. En resumen, los procedimientos de reperfilado no son eficaces para eliminar la ondulación del riel, ya que no eliminan los picos por completo o al menos no cumplen la norma.

Con más detalle en el [Anexo B2](#) se pueden encontrar las gráficas de frecuencias de reperfilado, material removido, análisis de CAT para cada una de las curvas con el fin de tener un mejor criterio de mantenimiento preventivo para cada una de ellas, ya que al observar detalladamente cada curva se puede encontrar que muchas veces no se removi6 completamente la superficie dañada con la operaci6n de reperfilado y adem6s se puede intuir que cada curva tiene una frecuencia determinada en la que aparece el daño, esto debido a factores de diseño del perfil, factores de operaci6n como lo son la forma o el tipo de perfil en que el riel hace contacto con la rueda, otro factor es la carga de operaci6n dada por el tr6fico que varía en cada operaci6n del metro, la velocidad del vehículo tambi6n varía en operaci6n, la forma como se opera el vehículo tambi6n puede ocasionar que la frecuencia en la que aparecen los daños sea mayor o menor, pero con estos análisis puede realizarse un mantenimiento preventivo y/o predictivo de al menos las curvas m6s críticas de la lnea B.

Es importante anotar que la cantidad de material removido puede ser menor a la calculada ya que la toma de las medidas de *Miniprof* para los perfiles no se hace antes e inmediatamente despu6s de reperfilar, así que el valor reportado es la suma del material que se remueve por reperfilado y la cantidad de material que se remueve por el desgaste por contacto, esta suma es la que se utiliza para calcular la tasa de desgaste y tambi6n, con el tr6fico específcico de cada curva, la tasa mágica de desgaste.

En la Tabla 3-6 se puede apreciar el promedio de material que se removi6 cuando el daño era para cada curva en donde es ~0.54mm para tramos de curvas con mayor

frecuencia de reperfilado por fatiga (intervenciones de reperfilado por fatiga entre 10 y 14), para tramos en un rango medio (intervenciones de reperfilado por fatiga entre 5 y 9) se remueve ~0.35mm y los tramos de rango mínimo (entre 1 y 4 intervenciones de reperfilado por fatiga) se remueve ~0.42mm, estos datos comparados con diversas investigaciones de reperfilado [73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80] no son suficientes en los tramos de curvas que presentan nivel medio y alto para daño por fatiga, ya que según Schoech et al [73] todos los tramos de vía con rieles que se encuentran aceptablemente en buena forma (menor grado de RCF) deben someterse a un régimen cíclico estratégico de reperfilado, este debe buscarla optimización del perfil y la eliminación de la capa superficial donde se nuclean grietas. En este caso el reperfilado preventivo tiene por objeto que la tasa de remoción de metal sea hasta 0.3mm alrededor de la cabeza del riel y de hasta 0.6mm en la zona afectada por la fatiga (*gauge corner zone en nuestro caso CPG*); con respecto a este estudio para tramos con curvas donde hay una frecuencia mínima de daño por fatiga se remueve menos de lo planteado en este estudio para la zona fatigada se remueve 0.42mm es claro que es mucho menor.

Schoech et al [73] plantean que para tramos de vía con rieles que sufren un daño mayor y/o grave por RCF deben excluirse de cualquier trabajo correctivo, ya que el umbral de material a remover depende del crecimiento esperado para un daño mayor y de la capacidad del equipo que se utilizará para el trabajo correctivo. Como regla general se deben remover alrededor de 2 a 3 mm de profundidad y que podrían contemplarse como límite para la intervención correctiva, en nuestro caso de estudio el material que se remueve para tramos de curvas con alta frecuencia de intervenciones de reperfilado por presencia de fatiga es ~0.54mm como se mencionó anteriormente, lo cual indica una vez más que el material que se remueve no es el suficiente para eliminar el daño en estas curvas.

## 4.Desgaste y fricción- La afectación de la calidad superficial. Una mirada micro

### 4.1 Efecto del reperfilado sobre la calidad superficial

Para observar el efecto de realizar diferentes pruebas de reperfilado en las superficies, se tomaron los parámetros que se mencionaron en la metodología con el fin de evaluarlos estadísticamente para determinar si las variables en el reperfilado tenían un efecto significativo sobre la calidad superficial.

Un primer análisis de las calidades superficiales dados los ensayos realizados en las pruebas de reperfilado se resume en los parámetros de rugosidad de la Tabla 4-1. De manera general se puede decir que el parámetro Ra es aproximadamente igual en todos los ensayos; la kurtosis Rku de los perfiles evaluados muestra que la distribución de la altura para los ensayos con presión baja y sin prueba de reperfilado es menor que 3, lo cual se asocia a una distribución no *Gaussiana* de picos caracterizada por una elevada densidad de picos muy bajos con respecto a la media, para las superficies donde la presión era alta el parámetro de Rku es mayor a tres, lo cual se asocia justamente a lo opuesto, es decir, a una distribución *no Gaussiana* de picos caracterizada por una elevada densidad de picos muy altos con respecto a la media. El parámetro Skewness Rsk es positivo solo para el ensayo en donde la combinación de variables de reperfilado es velocidad alta y presión baja, el Rsk positivo indica que la amplitud de la distribución de curva es sesgado hacia arriba respecto a la media, esto es que los picos en la superficie son más determinantes que los valles; en los demás ensayos el parámetro Rsk es negativo indicando que la amplitud de la distribución de curva es sesgado hacia abajo respecto a la media.

**Tabla 4-1:** Parámetros de rugosidad y dureza obtenidos para los diferentes ensayos.

ENSAYO	E1 Vb Pb	E2 Va Pb	E3 Vb Pa	E4 Va Pa	E5 Sin reperfilar
Ra $\mu\text{m}$	7,586	7,580	7,316	7,407	1,258
Rku	2,717	2,748	3,126	3,168	2,310
Rp $\mu\text{m}$	24,298	25,341	21,977	25,490	3,478
Rq $\mu\text{m}$	9,317	9,480	9,034	9,321	1,493
Rsk	-0,045	0,033	-0,228	0,006	-0,144
Rt $\mu\text{m}$	50,193	48,303	49,467	48,078	7,311
Rv $\mu\text{m}$	25,895	22,962	27,490	22,588	3,833
Rz $\mu\text{m}$	37,770	38,473	35,400	35,946	6,305
Rpc (0,000 $\mu\text{m}$ ): pks/mm	5,413	6,043	5,118	6,099	18,570
Rda deg	14,626	14,227	13,816	14,178	8,259
Rdq deg	18,468	18,044	17,466	17,985	10,954
RMs mm	0,383	0,353	0,410	0,369	0,067
Rk $\mu\text{m}$	24,409	24,446	27,500	18,228	2,398
Rpk $\mu\text{m}$	9,365	11,617	9,035	14,560	1,490
Rvk $\mu\text{m}$	11,333	11,239	12,285	9,325	1,668
%Mr1	8,926	10,523	8,352	10,765	7,575
%Mr2	87,519	83,842	90,427	82,504	86,923
%Rmr	0,412	0,681	0,466	0,456	91,600
<b>Dureza inicial HV</b> ± 9 HV	370	370	370	370	370
<b>Dureza después de pruebas de reperfilado</b> HV ± 9 HV	388	395	404	381	370

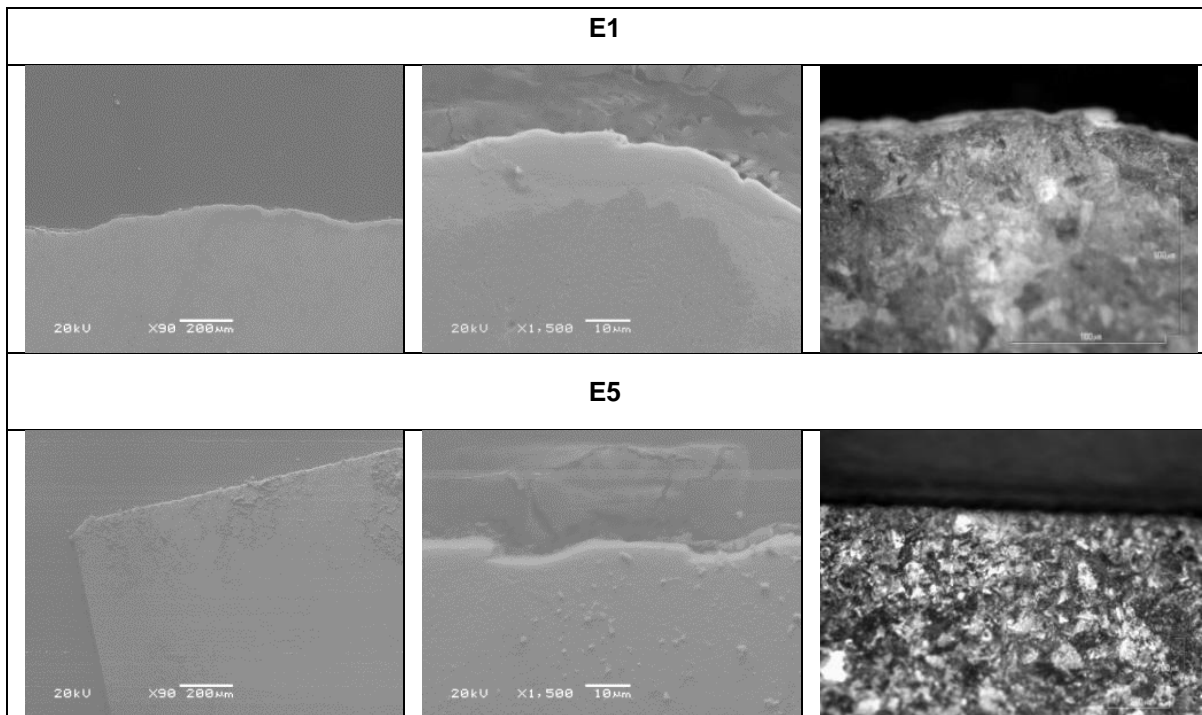
El aspecto de las superficies desgastadas se presentan en el subcapítulo 4.3 en la Figura 4-5 y 4-6, los perfiles obtenidos para cada ensayo muestran que a simple vista que las superficies reperfiladas E1, E2, E3 y E4 tienen la misma distribución de picos y valles más amplios que los de la superficie sin reperfilar E5 como se muestra en la Figura 4-7 Y



4-8 de perfiles de rugosidad obtenidos para cada ensayo, en donde se puede notar que a simple vista los cambios en las superficies son difíciles de detectar, pero cuando se toman medidas de rugosidad las diferencias son claras a partir de los datos.

En la Figura 4-1 se muestra la superficie reperfilada en corte transversal donde se evidencia la capa blanca producto de altas temperaturas debido al proceso de reperfilado, en esta Figura se muestra también la superficie sin reperfilar donde la capa blanca no se observa.

**Figura 4-1:** Imágenes de SEM y del Microscopio óptico de las superficies corte transversal.



#### 4.1.1 Parámetros de rugosidad significativos para diferentes calidades superficiales

El análisis de resultados de las mediciones de rugosidad arrojó que para velocidades altas de reperfilado los parámetros  $R_p$ ,  $R_{sk}$ ,  $R_v$ ,  $R_{pc}$ ,  $R_{sm}$ ,  $R_k$ ,  $R_{kp}$ ,  $MR_1$ ,  $MR_2$ ,  $R_{mr}$ , son significativos y la combinación de los parámetros mayores es significativa para  $R_p$ ,

98 "Análisis experimental del efecto del proceso de reperfilado sobre el desgaste y fatiga por contacto de rodadura de riel en el sistema rueda-riel en el Metro de Medellín"

Rk, Mr2 y Rmr como se apreció en los resultados generales de las calidades superficiales para cada ensayo, indicando que variar los parámetros de operación en el proceso de reperfilado puede efectivamente cambiar de manera significativa la topografía de la superficie. A continuación se muestran los parámetros con sus respectivos valores de significancia y en el Anexo B1 se muestra la corrida experimental.

**Figura 4-2:** Análisis estadístico para pruebas de reperfilado.

Información de nivel de clase		
Clase	Niveles	Valores
V	2	155.5 566.6
P	2	0.2 0.6
Número de observaciones leídas		80
Número de observaciones usadas		80

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD)  
 NOTA: Este test controla el índice de error experimentwise de tipo I, pero normalmente tiene un índice de error de tipo II más elevado que REGWQ. Alpha 0.05

**Tabla 4-2:** Parámetros de rugosidad significativos para los ensayos.

Variable dependiente	Fuente	Pr > F	Media 1	Valor fuente 1	Media 2	Valor fuente 2
Rku	P	0,0198	2,98970	0,6	2,7324	0,2
Rp	V, P	0,0113	25,4156	566.6, 0.6	23,1376	155,5
Rsk	V	0,0084	0,01949	566,6	-0,13683	155,5
Rv	V	0,0003	27	155,5	23	566,6
Rpc	V	0,0082	61	566,6	53	155,5
RSm	V	0,026	0,39653	155,5	0,36079	566,6
Rk	V	<,0001	26	155,5	21,337	566,6
Rk	V*P	<,0001		566,6		0,6
Rpk	V	0,0003	13	566,6	9,2	155,5
Mr1	V	0,0044	10,6438	566,6	8,6385	155,5
Mr2	V	<,0001	88,9725	155,5	83,1729	566,6
Mr2	V*P	0,0078		566,6		0,6
Rmr	V*P	0,0362		566,6		0,6

## **4.2 Discusión sobre las superficies reperfiladas**

### **4.2.1 Efecto del reperfilado sobre los parámetros de rugosidad de las superficies**

La calidad superficial del reperfilado no varió significativamente para los diferentes ensayos de reperfilado al observar tanto las alturas de los picos como la profundidad de los valles, esto debido a que la profundidad de corte final fue igual en todos los casos. Por otro lado, los parámetros que sí variaron fueron  $Rku$  y  $Rsk$ , los cuales para la pérdida de masa fueron significativos.

Las pruebas de reperfilado tienen una relevancia significativa para la calidad de la superficie porque la temperatura generada en el proceso promueve la formación de una capa de martensita debido a un calentamiento localizado y rápido enfriamiento. La dureza de dicha capa varía entre 410 y 800 HV y en ella se pueden nuclear grietas debido a su reducida ductilidad.

Al analizar los parámetros de rugosidad más significativos para diferentes calidades superficiales en muestras sometidas a diferentes condiciones de reperfilado, se encontró que la velocidad de corte es el factor más determinante sobre dicha calidad superficial, siendo que se obtienen superficies más homogéneas (es decir, más cercanas a tener una distribución Gaussiana de alturas en el perfil de rugosidad) cuando la velocidad es alta. Además el hecho de remover el material que se requiere con una sola profundidad de corte hace que la capa blanca de martensita que se forma sea menor, y que la superficie tenga menores tensiones residuales y por ende menor dureza.

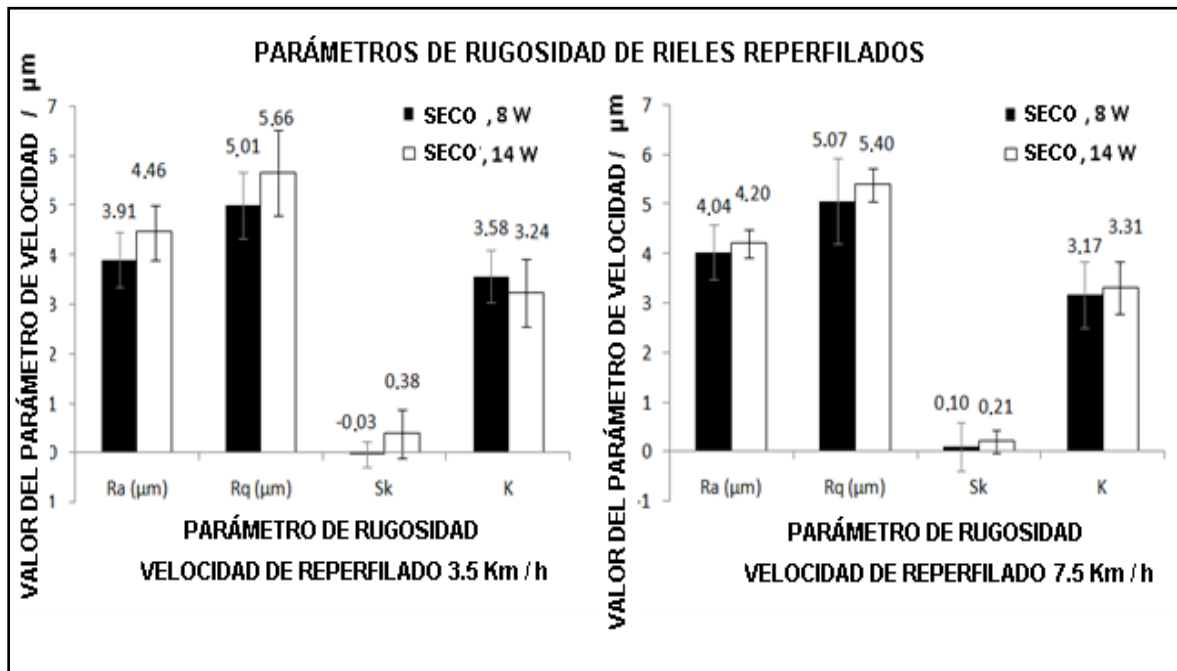
### **4.2.2 Comparación de resultados en laboratorio con resultados en campo**

En estudios en el Metro de Medellín realizados por el grupo de tribología y superficies [2, 67] se encontró que en la variación de la presión y la velocidad durante la operación de reperfilado no resulta en diferencias significativas en la rugosidad. Además, los valores

de los parámetros de rugosidad medidos fueron muy bajos comparados con los valores normalmente encontrados en la literatura (del orden de  $R_a < 10$  micras) [2].

La Figura 4-3 muestra que los parámetros  $R_a$  y  $R_q$  no varían por la velocidad lineal de corte, sino por la presión de contacto entre la piedra y el riel. Por otro lado  $R_{ku}$  es cercano a 3y  $R_{sk}$  es positivo siempre para las pruebas llevadas a cabo a velocidades altas.

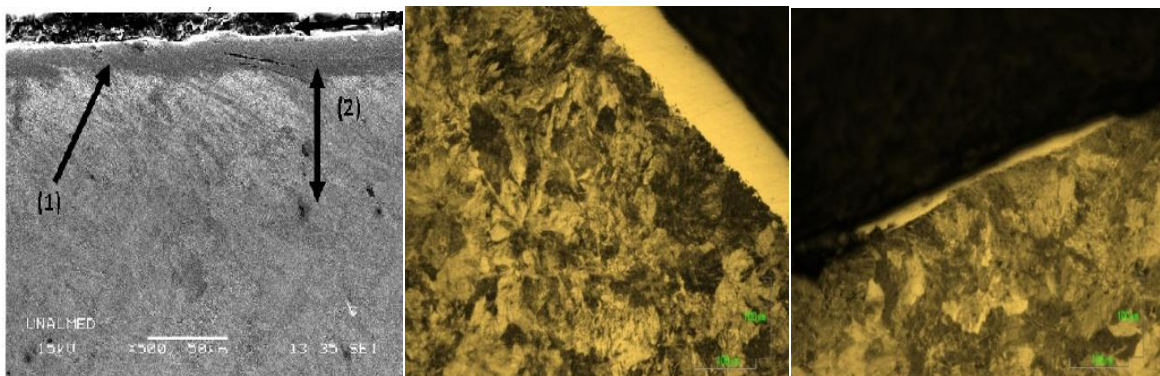
**Figura 4-3:** Parámetros de rugosidad de diferentes procedimientos de reperfilado [2, 67].



En las pruebas de laboratorio realizadas en este trabajo se observa que con los ensayos tribológicos tanto con deslizamiento como con rodadura pura y cargas de 0.8 y 1.1GPa a 10.000 ciclos las superficies reperfiladas presentaron mínimas señales de fatiga, aunque se presentaron deformaciones plásticas sub-superficiales indicando que hay tensiones residuales que es posible que a mayores ciclos puedan ser lugares de altas presiones locales que causen fatiga acelerada.

Otro ítem que valida las pruebas de reperfilado en laboratorio con los procedimientos de operación en campo, es la microestructura ya que en este estudio encontraron que, al inspeccionar las superficies de riel, dos regiones principales se observaron: una capa blanca cerca de la superficie y una zona de deformación por debajo de esta. Los espesores de capa blanca fueron 15, 15 y 10 micras para los procedimientos. Los espesores de las capas deformadas fueron 400, 250 y 300 micras. La capa blanca y dura la encontraron en casi todos los rieles inspeccionados, en donde el aspecto (ver Figura 4-4) y los resultados de medidas de dureza indicaron que se compone de martensita no revenida formada debido a un calentamiento localizado y rápido enfriamiento durante los procedimientos de reperfilado, esto ha sido previamente informado por *Chandrasekar* y otros [2, 58, 70, 71, 72]. La Figura 4-4 muestra la capa blanca (1) y la capa deformada (2) después del procedimiento. Además al igual que en este estudio ellos concluyen que el aumento de velocidad lineal de desplazamiento reduce la profundidad de la capa deformada, esto nosotros lo corroboramos con la dureza obtenida después de los ensayos y las micrografías en el microscopio óptico.

**Figura 4-4:** Imágenes de capa blanca encontrada en campo en la superficie capa sub-superficial blanca (1) y capa deformada (2).



### 4.3 Ensayos tribológicos a 0% deslizamiento, 0.8GPa y en seco

Los parámetros de rugosidad seleccionados para evaluar el ensayo de desgaste al 0% de deslizamiento y 0.8GPa de presión, fueron seleccionados en la metodología y encontrados significativos estadísticamente, como se muestran en la Tabla 4-3.

**Tabla 4-3:** Parámetros de rugosidad y dureza antes de ensayos a 10.000 ciclos en seco, 0% de deslizamiento y 0.8GPa.

ENSAYO	E1 Vb Pb	E2 Va Pb	E3 Vb Pa	E4 Va Pa	E5 Sin reperfilar
Rku	2,717	2,748	3,126	3,168	2,310
Rp $\mu\text{m}$	24,298	25,341	21,977	25,490	3,478
Rq $\mu\text{m}$	9,317	9,480	9,034	9,321	1,493
Rsk	-0,045	0,033	-0,228	0,006	-0,144
Rpc (0,000 $\mu\text{m}$ ): pks/mm	5,413	6,043	5,118	6,099	18,570
RMs mm	0,383	0,353	0,410	0,369	0,067
Dureza inicial HV $\pm 9$ HV	370	370	370	370	370
Dureza después de pruebas de reperfilado HV $\pm 9$ HV	388	395	404	381	370

Después del ensayo tribológico se midieron los mismos parámetros de rugosidad, encontrando que para los ensayos que tienen presión baja el Rku aumenta en E1 el 2.6% y en E2 el 5.9% indicando que hay un aumento en la distribución no *Gaussiana* de picos caracterizada con un aumento en la densidad de picos con respecto a la media.

El valor de Rku cercano a 3 para los ensayos E3 y E4 muestra que estas superficies tienen una distribución de picos aproximadamente *Gaussiana*, mientras que el ensayo E5 muestra un Rku mayor a 3, el cual se asocia a una distribución caracterizada por una elevada densidad de picos muy altos con respecto a la media. Este parámetro permite inferir que en los ensayos donde las probetas fueron reperfiladas hay un aplastamiento de picos, una deformación plástica debido al contacto, al contrario de la probeta sin reperfilar que muestra es una superficie deteriorada por desprendimiento de material (ver Tabla 4-4).

**Tabla 4-4:** Parámetros de rugosidad y dureza después de ensayo en seco, 0% de deslizamiento y 0.8GPa

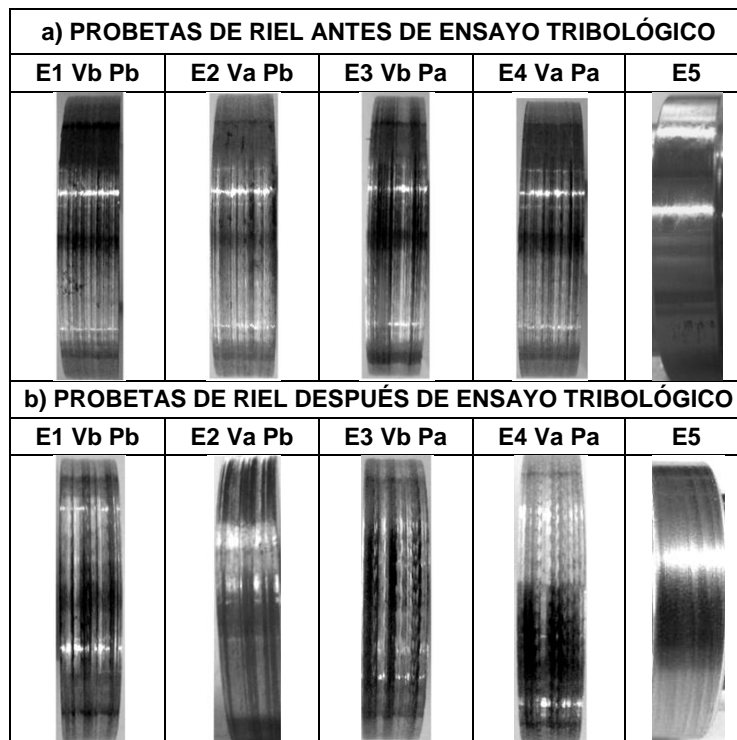
Después de ensayo de desgaste 0% de deslizamiento, 0.8 GPa de presión de contacto					
Parámetros	E1 Vb Pb	E2 Va Pb	E3 Vb Pa	E4 Va Pa	E5 Sin reperfilar
Rku	2,790	2,912	3,068	3,05	4,015
Rp $\mu\text{m}$	17,936	17,844	20,313	20,312	1,420
Rq $\mu\text{m}$	8,678	9,153	7,823	8,213	0,672
Rsk	-0,310	-0,508	-0,247	-0,271	-0,677
Rpc (0,000 $\mu\text{m}$ )					
pks/mm	3,520	3,523	6,220	5,77	21,338
RMs mm	0,594	0,512	0,453	0,459	0,088

En la Figura 4-5 y 4-6 se muestran las superficies de las probetas de riel y de rueda después de los ensayos tribológicos a 0.8GPa y 0% de deslizamiento.

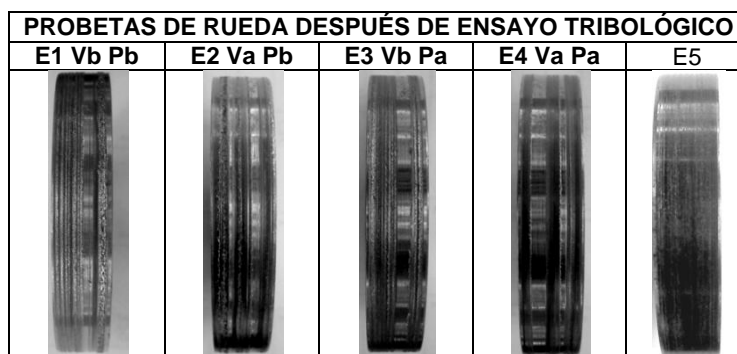
El mecanismo presente de desgaste para las probetas que fueron ensayadas fue *ratchetting* y en las ruedas se puede ver que la abrasión tuvo lugar también en algunas zonas. Esto se puede ver también en la Figura 4-7 y 4-8 donde se muestran los perfiles de rugosidad antes y después de ensayar, se observa una clara deformación de los picos y un mayor espaciamiento entre ellos.

Para los ensayos con superficies reperfiladas en probetas de riel se observa que no hay presencia de grietas, esto es, no se aprecian signos de RCF, además tampoco se identifican señales de *spalling* ni de otro tipo de mecanismo de desgaste significativo. Las probetas de riel sin tratamiento de reperfilado en los ensayos en seco a 0% de deslizamiento, a diferencia de las superficies de los rieles tratados muestran signos de RCF similares a los de las probetas rueda siendo en menor cantidad en el riel. En la Figura 4-7 se muestra el perfil de rugosidad para el ensayo E5 que no tiene tratamiento y se puede concluir que el aumento de la rugosidad se debió al mecanismo de desgaste de *spalling*.

**Figura 4-5:** Superficies desgastadas de riel. a) Antes del ensayo tribológico, b) después de ensayo tribológico.



**Figura 4-6:** Superficies desgastadas de rueda.



En las gráficas que se muestran a continuación se observa un claro aplastamiento y/o deformación de picos, lo cual se observa en el parámetro Rp el cual disminuye un 20% +/- 9.7% y un aumento en el Rms para todos los ensayos.



**Figura 4-7:** Perfiles de rugosidad para riel antes y después de ensayo tribológicos.

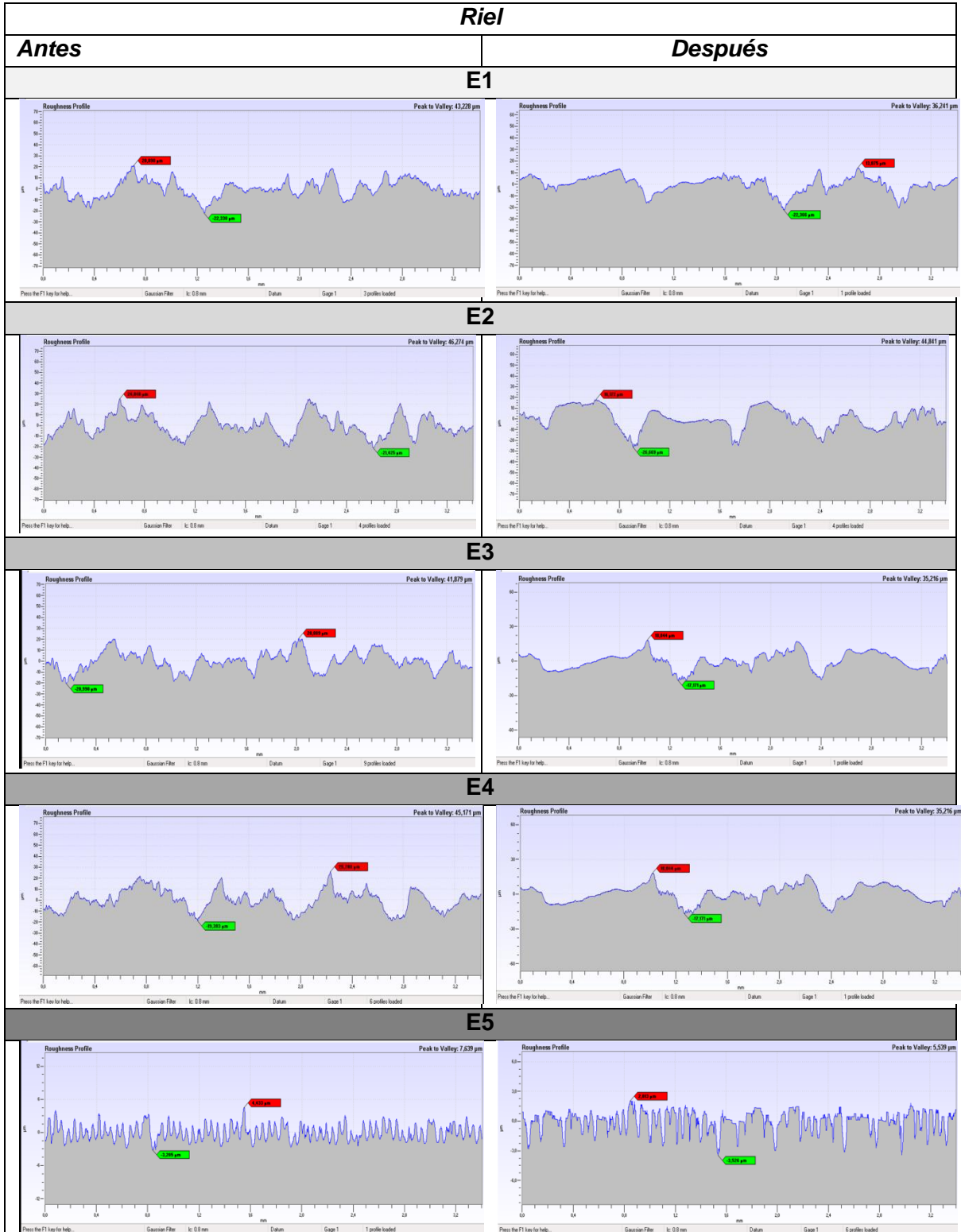
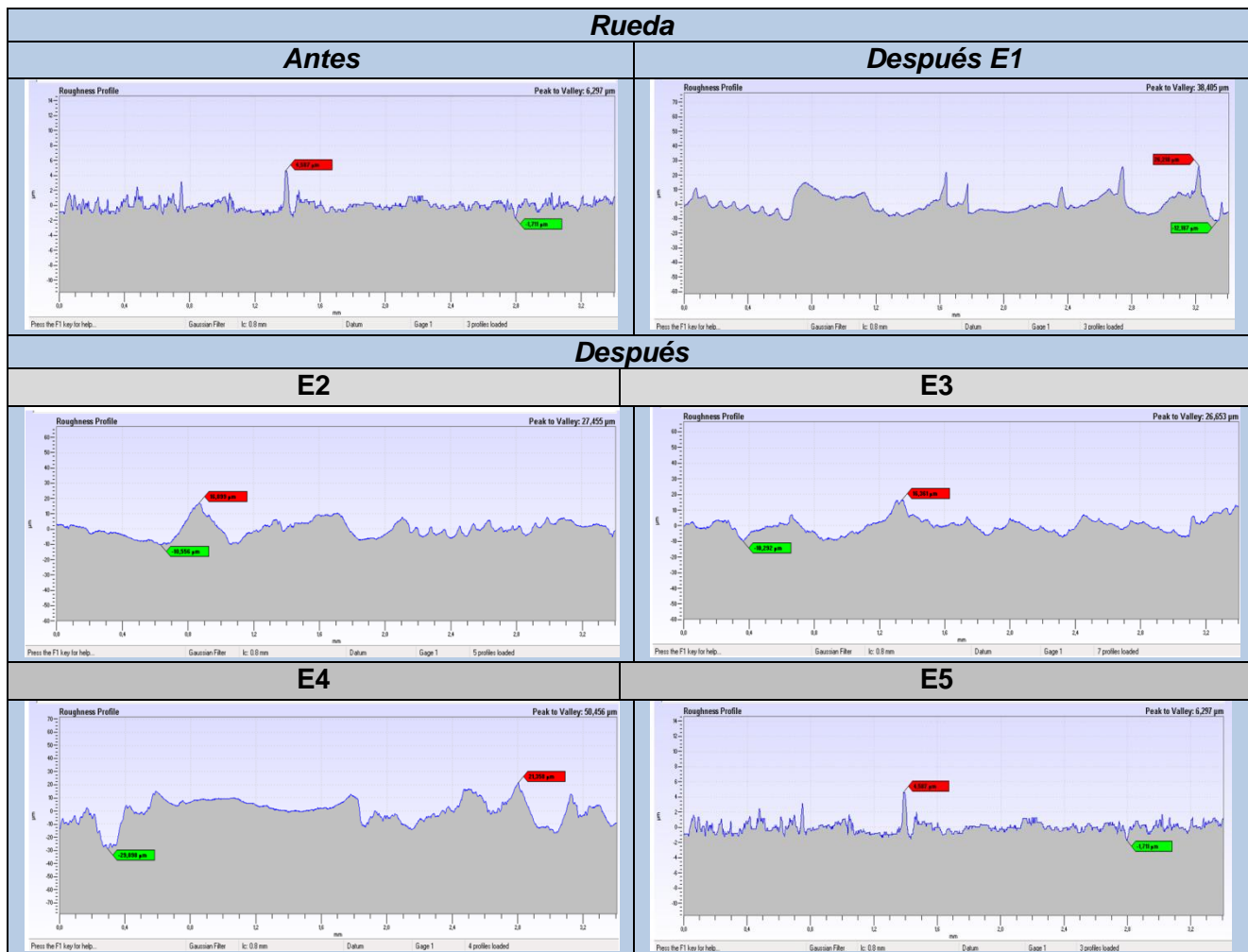
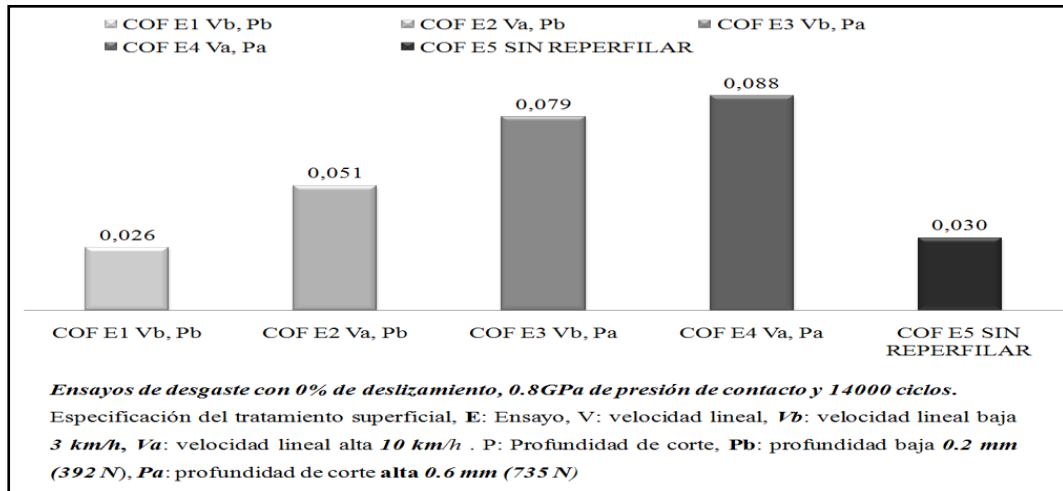


Figura 4-8: Perfiles de rugosidad para riel antes y después de ensayo tribológicos.



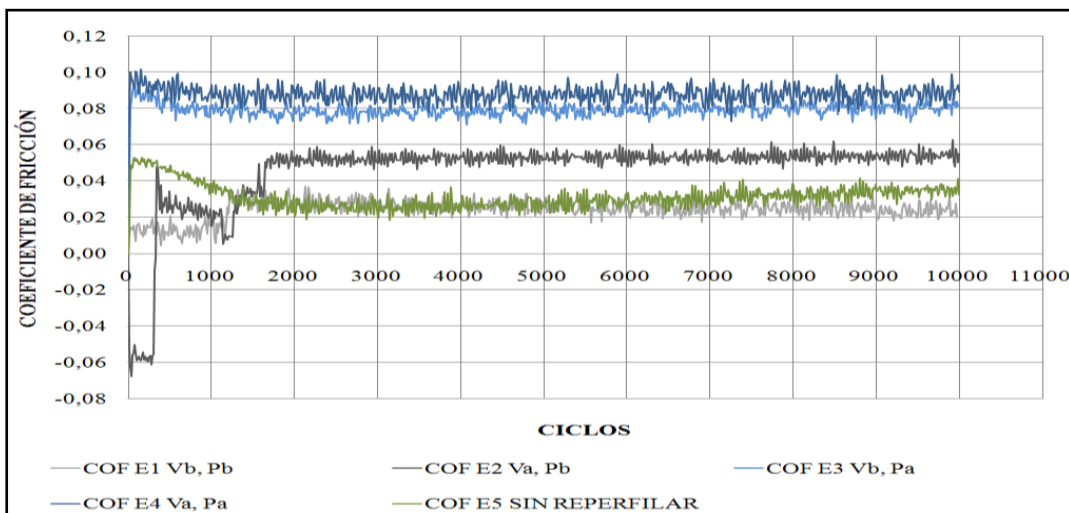
E1, E2, E5 donde los COF fueron 0.026, 0.051 y 0.030 respectivamente. A pesar de que las variaciones relativas de COF entre las pruebas son elevadas, el orden de magnitud de dicha variable es el esperado para pruebas a 0% de deslizamiento, es decir, coeficientes de fricción inferiores a 0.1 (ver Figura 4-9).

**Figura 4-9:** Coeficientes de fricción para las diferentes superficies ensayadas a 10.000 ciclos, en seco, 0% de deslizamiento y 0.8GPa.



En la Figura 4-10 los COF para los E1, E2 y E5 estabilizaron aproximadamente en los 1.500 ciclos de ensayo, los ensayos E3 y E4 en 100 ciclos; esto indicando que hubo un acomodamiento de las superficies en contacto más rápida para las superficies con un Rku mayor a 3, a diferencia de los demás ensayos, donde se observa en la figura siguiente que los Ensayos E1, E2 y E5 tuvieron un mayor periodo de acomodamiento alcanzando los 1.700 ciclos.

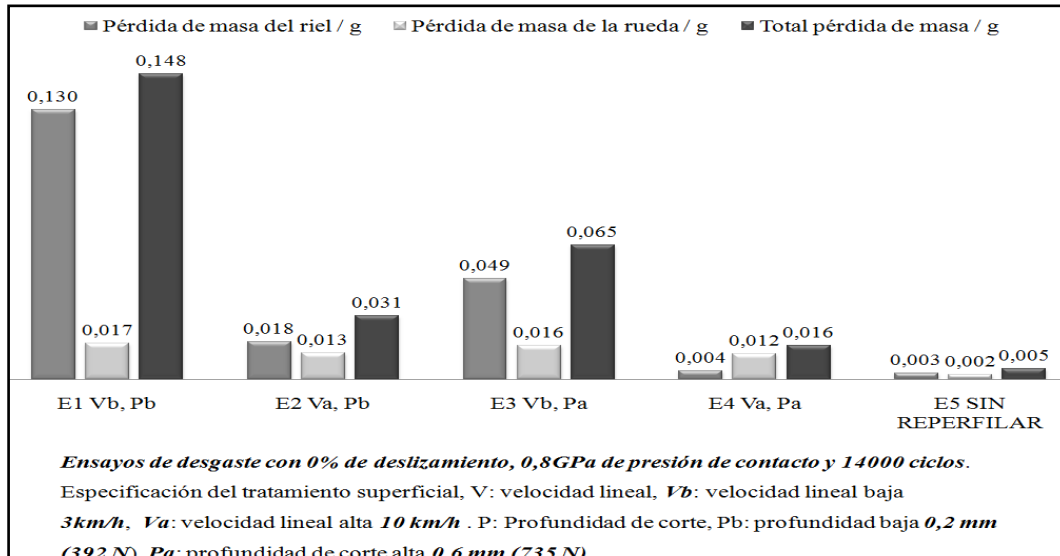
**Figura 4-10:** Curvas de coeficientes de fricción para las diferentes superficies ensayadas a 10.000 ciclos, en seco, 0% de deslizamiento y 0.8GPa.



En la pérdida de masa para los ensayos tribológicos, los parámetros de rugosidad no indican que haya una relación claramente definida. Las probetas con menor dureza fueron las que menores pérdidas de masa reportaron y los ensayos en los que las superficies fueron reperfiladas mostraron una menor pérdida de masa cuando las velocidades lineales de reperfilado son de 10km/h. Además hay una mayor pérdida de masa en el riel cuando las combinaciones de operación son VbPb, Vb,Pa, VaPb, la combinación que menos pérdida genera para ensayos con 0% y 0.8GPa es VaPa, esto es velocidad alta y presión alta, recordando que la presión alta significa remover la cantidad de material la presión necesaria para tener la profundidad de avance igual a la profundidad de corte de 0.6mm (ver Figura 4-11 pérdida de masa del riel).

Al observar la Figura 4-11 para los ensayos de 0.8% sin deslizamiento, que aunque la pérdida de masa es en general (pérdida de masa de riel más pérdida de masa de la rueda) mayor para los ensayos con tratamiento superficial de reperfilado, la superficie está menos dañada que cuando no es reperfilada.

**Figura 4-11:** Pérdida de masa para las diferentes superficies ensayadas a 10.000 ciclos, en seco, 0% de deslizamiento y 0.8GPa.



Se calcularon las áreas de contacto teóricas y reales dado que las probetas tienen características superficiales diferentes, y se encontró que el área teórica es 2.325mm<sup>2</sup> y 0,8GPa de presión de contacto asumiendo que no que las superficies son lisas (sin

reperfilado) mucho menor que para las superficies reperfiladas, siendo así, el cálculo cuando se asume rugosidad desde el modelo de G&W el área real es menor a la teórica para las superficies reperfiladas aproximadamente de  $0.038\text{mm}^2$  y la presión de contacto es mayor a la teórica aproximadamente de  $38.8\text{GPa}$ . Los cálculos se pueden apreciar en el [Anexo B3](#).

#### **4.4 Ensayos tribológicos a 5% deslizamiento, 1.1 GPa, en seco y lubricados**

Para la condición a 5% de deslizamiento y 1.1GPa en los ensayos 1 y 2 se pre-agrietó en los primeros 4.000 ciclos, en el ensayo 3 no se realizó el pre-agrietamiento y se lubricó desde el inicio del ensayo con el fin de observar el comportamiento cuando la superficie tiene un tratamiento de reperfilado, y en el 4 se realizó un ensayo de 9.000 ciclos para ver el comportamiento de la superficie tratada y ver el crecimiento de grietas en este.

Dado que en la metodología se tiene que después de evaluar las diferentes condiciones superficiales frente al desgaste se tomaría la condición que mejores resultados arrojó para realizar ensayos en una condición más crítica (simular condiciones de curva) se seleccionó la condición de velocidad alta 10km/h y presión alta ó profundidad de corte en un solo avance; para este ensayo a las probetas se les removió 1.0mm.

De manera general, para las probetas tratadas con pruebas de reperfilado que se obtienen después del ensayo tribológico de 5% de deslizamiento y 1.1GPa, el Ra disminuye aproximadamente en 40% en los ensayos 1, 2 y 4, y 60% para el ensayo 1, muy similar pasa con el Rq. La kurtosis aumenta en todos los ensayos realizados y es siempre mayor a 3, lo cual se asocia a una distribución no *Gaussiana* de picos, caracterizada por una elevada densidad de picos muy altos con respecto a la media. El ensayo que tuvo un aumento muy pequeño de este parámetro con respecto al inicial fue el 2, donde se realizó un pre-agrietamiento y luego se lubricó. El Rv muestra que la profundidad de los picos disminuye para los ensayos 1, 2 y 4, siendo menor para el E1 que fue de 14.000 ciclos en seco en donde la altura de los picos disminuyo, al comparara la distribución de los picos y de los valles con ensayos menores en ciclos (E4 de 9.000 ciclos) se puede apreciar que a medida que avanzan los ciclos hay una mayor profundidad en los valles y una menor altura en los picos; y que en los ensayos

110 "Análisis experimental del efecto del proceso de reperfilado sobre el desgaste y fatiga por contacto de rodadura de riel en el sistema rueda-riel en el Metro de Medellín"

lubricados la altura disminuye muy poco en comparación con los ensayos en seco, también se aprecia que la distancia entre picos (RMs) aumenta para los ensayos en seco y disminuye para los ensayos lubricados.

El parámetro  $V_o$  ó el volumen de retención de aceite es mayor cuando las superficies son tratadas con reperfilado, esta capacidad de la superficie de retención de aceite disminuye en los ensayos lubricados, el cálculo de este parámetro determina que hay una mayor retención de aceite cuando las superficies tienen una rugosidad alta (superficie reperfilada) que cuando la superficie es lisa (ver Tabla 4-5).

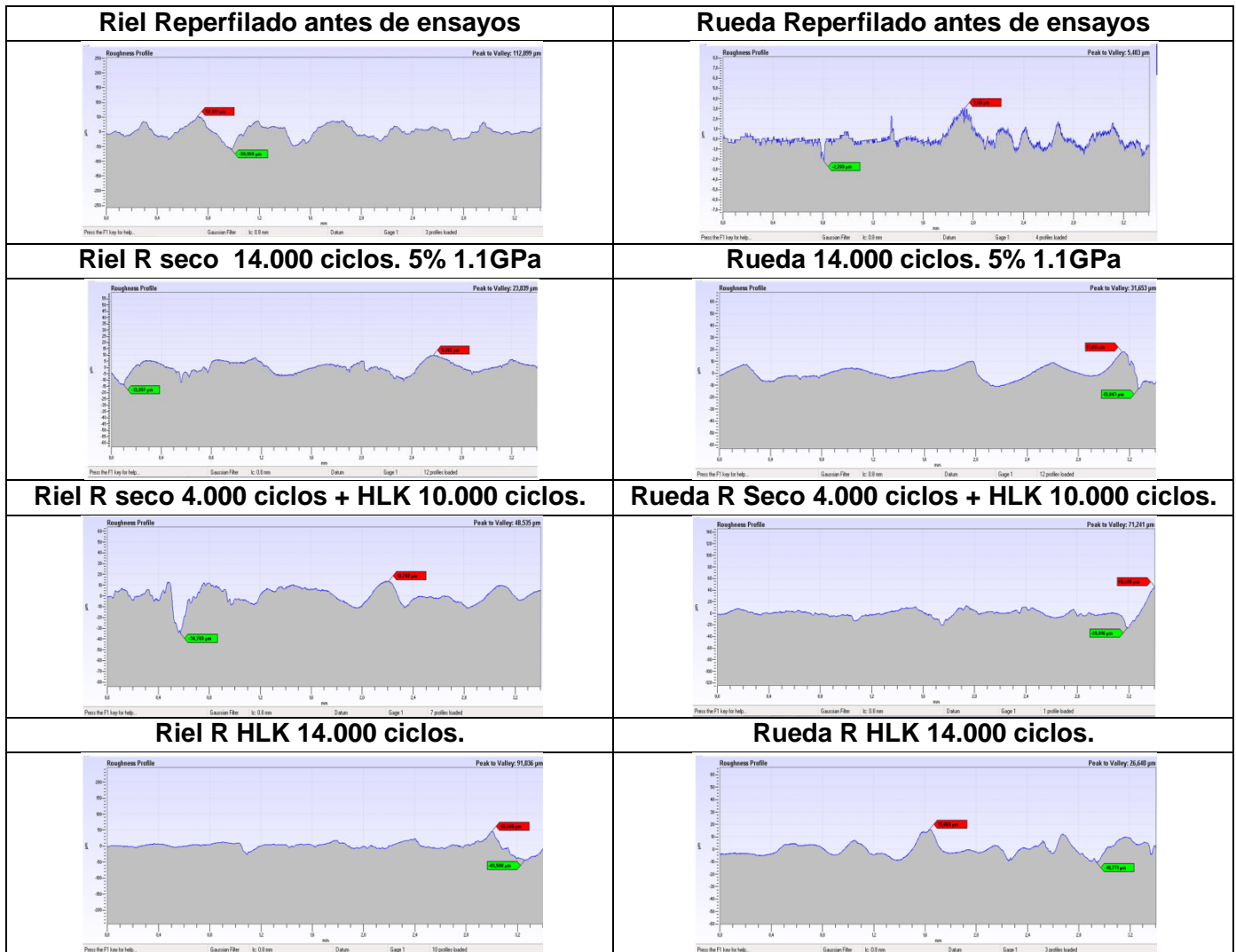
**Tabla 4-5:** Parámetros de rugosidad para ensayos a 14.000 ciclos en seco y lubricado, 5% de deslizamiento y 1.1GPa.

ENSAYOS	CONDICIÓN INICIAL 0	CONDICIÓN INICIAL 0.1	1	2	3	4
<div style="text-align: center;"> </div> <b>Parámetros de Rugosidad</b>	Riel sin reperfilar	RIEL R antes de ensayos	RIEL R SECO 14000 ciclos. 5% 1.1GPa	RIEL R SECO 4000 ciclos + HLK 10000 ciclos. 5% 1.1GPa	RIEL R HLK 14000 ciclos. 5% 1.1GPa	RIEL R SECO 9000 ciclos. 5% 1,1 GPa
Ra $\mu\text{m}$	1,037	12,503	6,887	5,870	8,593	5,463
Rku	2,780	3,619	5,157	3,705	6,007	4,778
Rp $\mu\text{m}$	4,002	46,034	17,951	17,126	42,297	18,852
Rq $\mu\text{m}$	1,283	16,560	9,265	7,612	12,772	7,694
Rsk	0,335	-0,170	-1,206	-0,542	-0,757	-0,890
Rv $\mu\text{m}$	2,973	47,410	33,893	23,377	47,033	24,584
Rpc (0,000 $\mu\text{m}$ ) pks/mm	15,074	4,063	2,996	4,237	4,458	2,937
RMs mm	0,100	14,486	4,871	6,436	16,061	0,971
$V_o$ ( $\text{mm}^3/\text{cm}^2$ )	0,008	0,214	0,216	0,158	0,190	0,370

En la Figura 4-12 se observa una aproximación a los perfiles de las superficies evaluadas para las condiciones de los ensayos, en los que se puede apreciar que la superficie después de las pruebas de reperfilado y éstas después de los ensayos tribológicos. En estos se puede apreciar una deformación de los picos en los rieles y un desgaste abrasivo en las superficies de las ruedas, pero para tener un mejor entendimiento de lo

que sucede más adelante se muestran las fotografías y micrografías tomadas en el SEM de la superficie.

**Figura 4-12:** Perfiles de rugosidad para ensayos a 14.000 ciclos en seco y lubricado, 5% de deslizamiento y 1.1GPa.



En la Figura 4-13 se muestran las superficies de las probetas de la rueda y del riel después de los ensayos tribológicos a 1.1GPa y 5% de deslizamiento. Para los ensayos en seco se observa que el mecanismo de desgaste para las probetas reperfiladas de riel es la deformación plástica, y en la rueda que estuvo en contacto hay presencia de abrasión en primer lugar además de que la superficie del riel es más dura y tiene un perfil





de rugosidad mayor al de la rueda, además que la superficie del riel esta brillante, esto es producto del deslizamiento que tiene la rueda sobre el riel, también se observa que no hay presencia de *spalling*, ni de RCF, observado en los primeros 9.000 ciclos, en los 14.000 ciclos ya hay una mayor deformación de los picos del riel y los picos de la rueda formados por el riel y hay poca presencia de *spalling* en la rueda, no se evidencia presencia de grietas ni en la rueda ni en el riel. Al observar este mismo ensayo para probetas de riel que no fueron tratadas con pruebas de reperfilado se observa que, las probetas de riel aparentan no tener grietas ni ningún otro tipo de marcas de RCF, además su superficie es lisa y brillante; en contraste las de rueda presentan las superficies más desgastadas de todos los ensayos, desde los 9.000 las superficies de la rueda tienen marcas de abrasión menores a las que se presentan con las superficies reperfiladas, se ve como hay zonas oscuras seguidas de unas más claras, producto del deslizamiento que tiene la rueda sobre el riel que es más duro, porque al deslizar se produce mayor abrasión y la superficie que sufre este deslizamiento presenta una apariencia más brillante las zonas oscuras se presentan en los ensayos ambos ensayos se podría decir que es debido al aumento en la temperatura debido al contacto entre las probetas. En los ensayos lubricados se observa que para las superficies que son tratadas con reperfilado que, el principal mecanismo de desgaste a los 14.000 ciclos es la deformación plástica de los picos y por ende el aumento de espaciamiento entre estos, además hay presencia desprendimiento de material, unas pequeñas huellas son visibles, pero no es un daño muy poco, no se observa presencia de grietas; en la rueda se observa una presencia de un perfil de rugosidad similar al del riel debido a un proceso abrasivo por el mismo perfil del riel, hay deformación y además hay un poco porcentaje de agujeros que se conocen en la literatura de rueda-riel como *spalling*.

Para las probetas de riel que no fueron reperfiladas el principal mecanismo de desgaste observado es RCF, se observan grietas superficiales que son el símil de los *head-check* encontrados en las inspecciones en campo. Las superficies presentan con un color oscuro, no se sabe si esto es debido a un proceso de oxidación por el aumento en la temperatura debido al contacto entre las probetas o por algún componente del HLK que promueva una reacción termoquímica. En las probetas de rueda tienen unas marcas de abrasión y de daño que resaltan al compararlas con las probetas de rueda que se



ensayaron con las superficies de riel reperfiladas que presentan una superficie no desgastada sino deformada.

**Figura 4-13:** Superficies desgastadas para ensayos en seco y lubricado, 5% de deslizamiento y 1.1GPa.

<p>R SECO 14.000 ciclos RIEL (R)      RUEDA (W)</p>	<p>SECO 14.000 ciclos RUEDA (W)      RIEL (R)</p>
	
<p>R SECO 9.000 ciclos RIEL (R)      RUEDA (W)</p>	<p>SECO 9.000 ciclos RIEL (R)      RUEDA (W)</p>
	
<p>R SECO 4.000 ciclos + HLK 10.000 ciclos RIEL (R)      RUEDA (W)</p>	<p>SECO 4.000 ciclos + HLK 10.000 ciclos RUEDA (W)      RIEL (R)</p>
	
<p>R HLK 14.000 ciclos RIEL (R)      RUEDA (W)</p>	<p>Probetas de riel R sin ensayos tribológicos RUEDA (W)      RIEL (R)</p>
	

De acuerdo con las imágenes anteriores se puede concluir que el crecimiento de fatiga esperado en los 4.000 ciclos en seco no se dio en las probetas donde la superficie estaba reperfilada como pasa en las superficies que son mecanizadas con un pulido cuasi-espejo.

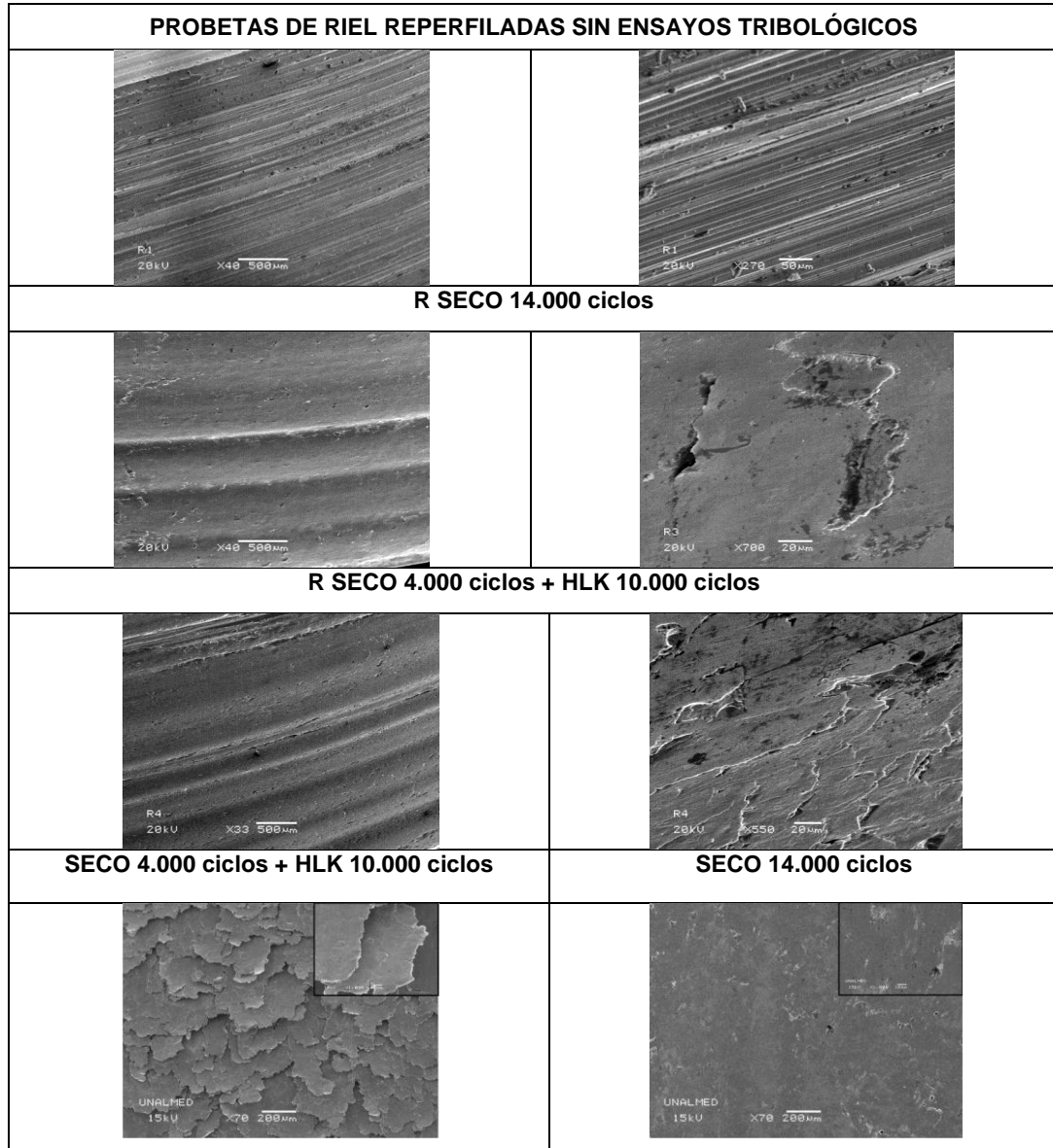
En la Figura 4-14 se observa la superficie del riel tratada con pruebas de reperfilado la cual tiene las respectivas marcas de abrasión efectuadas por la piedra para remover el material, el desprendimiento de material se percibe homogéneo en el distanciamiento de los picos y en la mayoría de la altura de estos, aunque hay picos que sobresalen.

Para los ensayos en seco de 14.000 ciclos, las superficies que tenían la condición de reperfilado muestran en el acercamiento de 40X y la barra es de 500mm, una deformación de los picos y el aplastamiento de la mayoría de ellos; para un acercamiento de 700X y la barra es de 20mm, se puede ver que hay descascaramiento o *spalling* de material.

Para las superficies no reperfiladas se observa la evolución de las superficies desgastadas por fatiga, lubricadas con HLK con 1.1GPa y 5% de deslizamiento. Se puede ver como de los 9.000 a los 14.000 ciclos se produce un incremento en la cantidad de grietas por fatiga en la superficie de las probetas de riel.

En los ensayos lubricados las muestras vistas por SEM (Figura 4-15), arrojaron que, para las probetas reperfiladas el mecanismo de desgaste primero es una deformación de los picos y a un mayor aumento hay presencia de acumulación de deformación plástica (*ratchetting*) que degrada y agrieta la superficie del material, aunque en menor medida que en los ensayos donde las probetas no eran reperfiladas, en este caso se puede ver más profundo al interior de las grietas y en comparación con los ensayos en seco debido a que la fuerza tangencial en las probetas en seco es mayor, produciendo deformaciones más altas a menores profundidades y por ello que las grietas sean más superficiales.

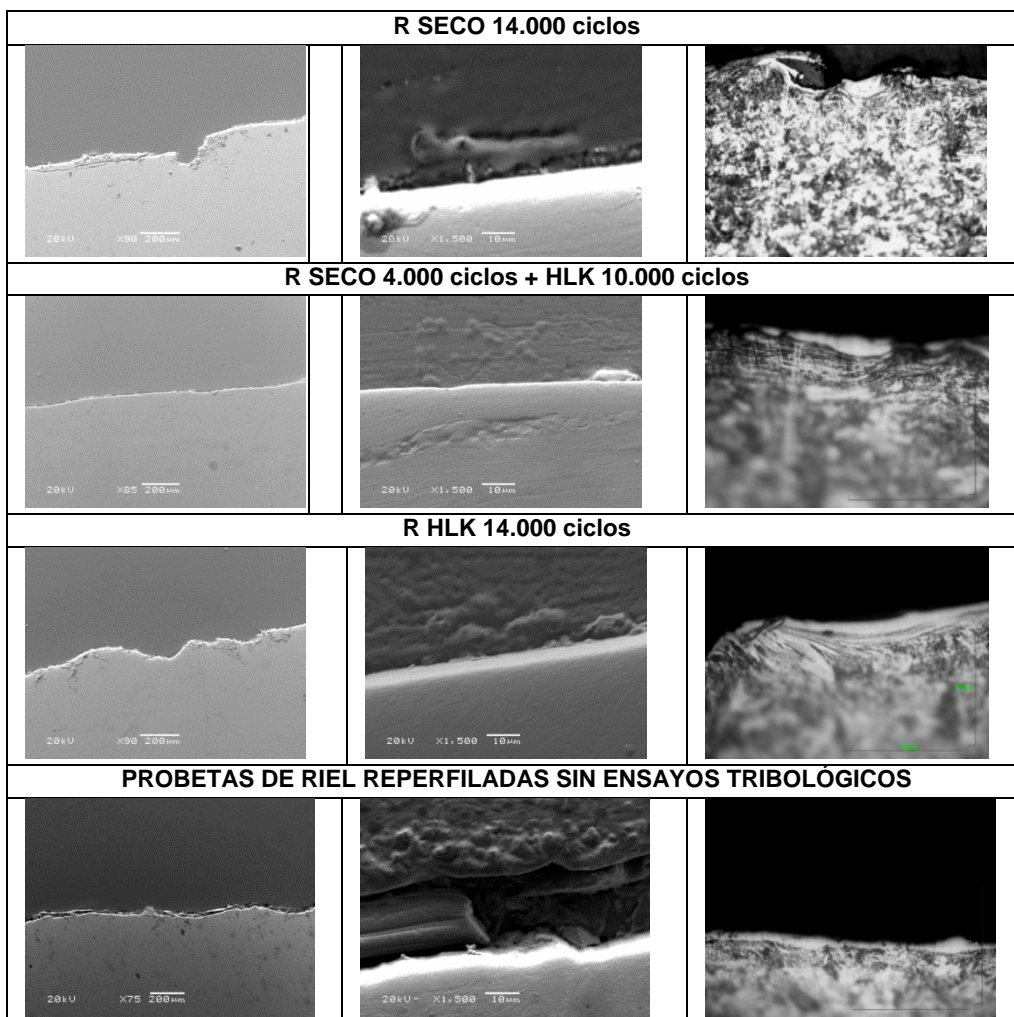
**Figura 4-14:** Imágenes de SEM longitudinal para superficies antes y después de ensayos en seco y lubricado, 5% de deslizamiento y 1.1GPa.



Con respecto a lo que sucede con el perfil de rugosidad de las probetas reperfiladas después de los ensayos, se puede observar en la Tabla siguiente, para los ensayos en seco se puede ver que hay un severo desprendimiento de la superficie y debajo de la superficie +/- a 10µm se observa la superficie deformada (ver Figura 4-15), para los ensayos donde hay un pre-agrietamiento superficial de 4.000 ciclos y luego 10.000 ciclos lubricados, se puede ver que hubo un desprendimiento de la capa blanca y que hay una

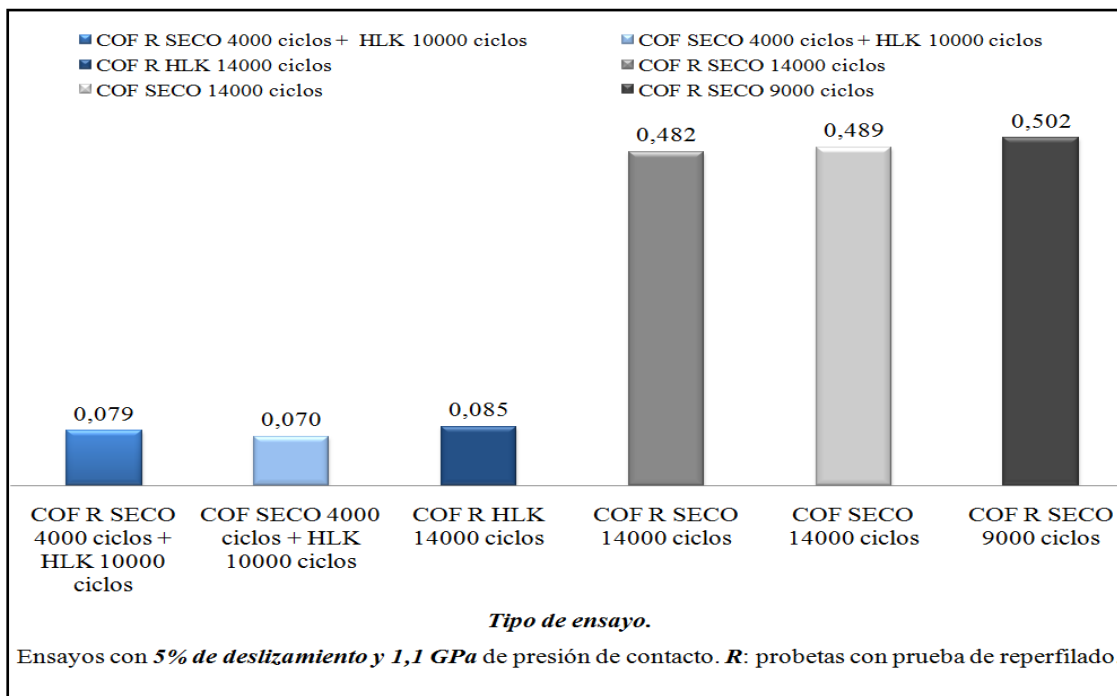
deformación debajo de la superficie; el ensayo que es totalmente lubricado el perfil de rugosidad de la superficie se deformó muy poco comparado con el perfil antes de realizar el ensayo, al aparecer según la micrografía de la superficie sin ensayo tribológico las pruebas de reperfilado ocasionan un cambio superficial de martensita. Es claro ver en las imágenes que después de los ensayos hay una remoción de la capa blanca mayor en los ensayos en seco y menor en el que es totalmente lubricado, además que hay una deformación que se presenta.

**Figura 4-15:** Imágenes de SEM y en microscopio óptico corte transversal para superficies antes y después de ensayos en seco y lubricado, 5% de deslizamiento y 1.1GPa.



En la Figura 4-16 se observan los COF encontrados, donde los coeficientes de fricción para condición de ensayo de 4.000 ciclos en seco y 10.000 lubricados con HLK, muestran que para superficies reperfiladas es de 0.079 y sin reperfilar es de 0.070, indicando que aumenta un ~12%, cuando es lubricado desde el inicio para los 14.000 ciclos la superficie reperfilada el COF es de 0.085 mucho mayor que las dos condiciones anteriores; para los ensayos en seco sea o no reperfilada la superficie el valor de COF es ~0.50.

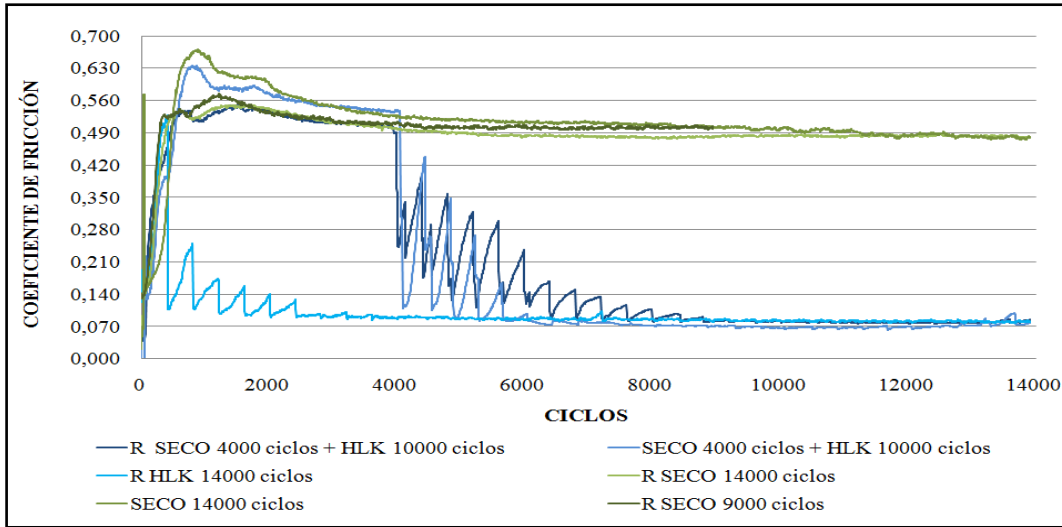
**Figura 4-16:** Coeficiente de fricción para superficies ensayos en seco y lubricado, 5% de deslizamiento y 1.1GPa.



En los ensayos en seco de las superficies reperfiladas se puede observar en la Figura 4-17 que el COF al inicio de los ensayos llega a 0.057 el COF al inicio está entre 0.60 y 0.675, siendo mayor para los ensayos donde las probetas no fueron reperfiladas, el COF se estabiliza aproximadamente en los 4.000 ciclos el *running-in period* ó periodo de acomodamiento entre las superficies en contacto, para los ensayos lubricados con inicio de pre-agrietamiento esta desde 4.000 a 6.000 ciclos para probetas no reperfiladas y para probetas reperfiladas está desde 4.000 a 9.000 ciclos, para el ensayo de las

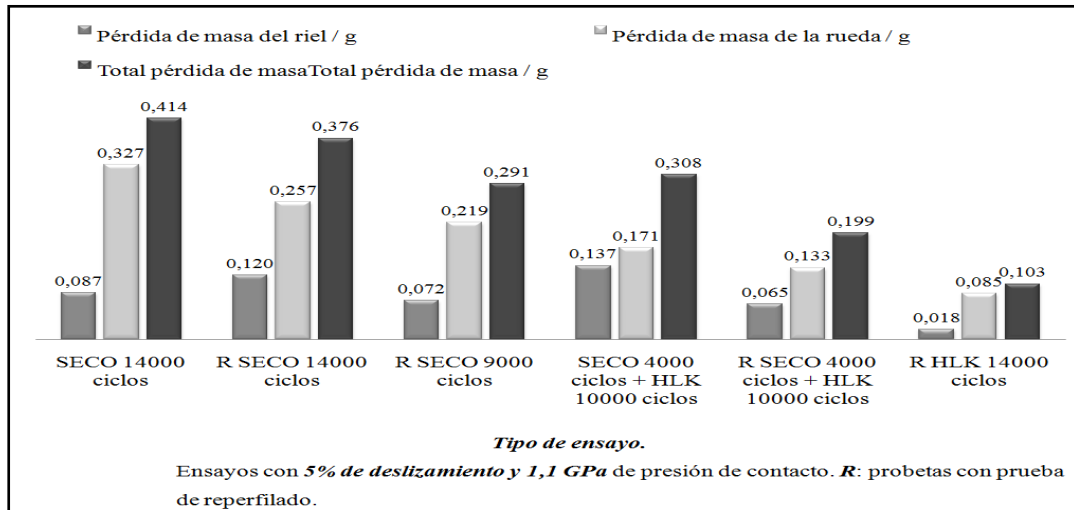
probetas reperfiladas y lubricadas desde el inicio este periodo de acomodamiento esta desde los 0 a 2.000 ciclos.

**Figura 4-17:** Curvas de coeficientes de fricción para ensayos en seco y lubricado, 5% de deslizamiento y 1.1GPa.



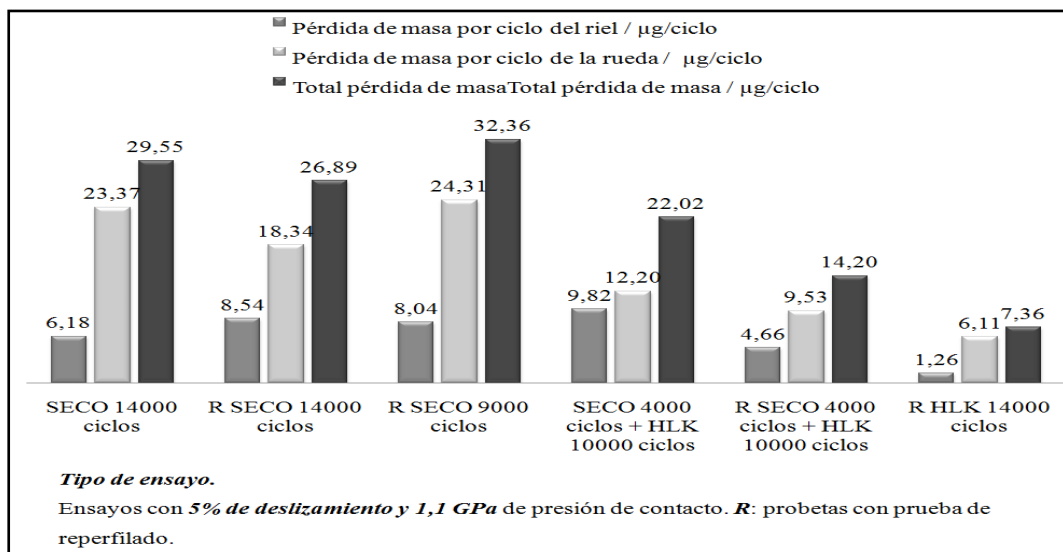
La Figura 4-18 muestra los resultados para pérdida de masa de los ensayos realizados tanto para superficies "lisas" y superficies con "alta" rugosidad o reperfiladas. La pérdida de masa en las diferentes condiciones de ensayos muestra que cuando las superficies tienen una condición de reperfilado es menor la pérdida de masa, al observar las diferentes condiciones encontramos que, para la condición seco a 14.000 ciclos es menor la pérdida de masa total (rueda-riel) para la superficie reperfilada, pero la pérdida de masa para el riel es menor para la superficie no reperfilada; la condición en seco a 9.000 ciclos es menor la pérdida de masa para las superficies no reperfiladas aunque la diferencia es mínima con respecto al ensayo donde la superficie esta reperfilada; para la condición donde hay un pre-agrietamiento en los primeros 4.000 ciclos y luego lubricados los 10.000 ciclos restantes hay menor pérdida en los ensayos donde las probetas fueron reperfiladas, tanto para rueda como para riel, y cuando la condición es de lubricar desde el inicio la pérdida de masa es mucho menor que en todas las demás condiciones de ensayos lubricados en conclusión la pérdida de masa es menor cuando la superficie tiene un tratamiento superficial debido al reperfilado y a su vez es lubricada.

**Figura 4-18:** Pérdida de masa para ensayos en seco y lubricado, 5% de deslizamiento y 1.1GPa.



Al mirar la pérdida de masa por ciclo podemos apreciar mejor lo comentado anteriormente en la pérdida de masa y en el caso de la condición de seco a 9.000 ciclos es claro que hay una mayor pérdida cuando la superficie esta reperfilada (ver Figura 4-19)

**Figura 4-19:** Pérdida de masa por ciclos para ensayos en seco y lubricado, 5% de deslizamiento y 1.1GPa.



Se calcularon las diferentes presiones de contacto para las superficies sin reperfilar y con reperfilado encontrando que las presiones son mayores cuando la superficie está reperfilada y al comparar el área de contacto por Hertz (teórico) y el del modelo de G&W (real) los resultados son  $4.2\text{mm}^2$  y  $4.1\text{mm}^2$  respectivamente, esto tiene que ver con la carga aplicada, cuando la carga aplicada es muy alta el área de contacto real y teórica es aproximadamente igual, a diferencia de cuando la carga es pequeña como en el caso de  $0.8\text{GPa}$  en donde el área de contacto fue mayor la teórica que la real (Anexo B.3).

#### 4.4.1 Supuestos al variar calidad superficial y Carga

Se halló el área de contacto real (ver Tabla 4-6) para una carga de  $3724\text{N}$  (utilizada para los ensayos 5% de deslizamiento y  $1.1\text{GPa}$ ) por el modelo de G&W para un radio de aspereza menor, para esto se tomaron los parámetros de las probetas del ensayo E4 utilizado para el ensayo tribológico de rodadura pura (ver contenido 4.3); además de halló el área de contacto real con para una carga de  $1470\text{N}$  (utilizada para los ensayos 0% de deslizamiento y  $0.8\text{GPa}$ ) y los parámetros de calidad superficial de las probetas con ensayo de reperfilado (utilizada para los ensayos 5% de deslizamiento y  $1.1\text{GPa}$ ), como se muestra a continuación.

**Tabla 4-6:** Cálculos de área y presión de contacto mediante Modelo de Greenwood - Williamson para E4  $3724\text{N}$ .

E4 carga 3724N			
Parámetros	Rueda	Riel	
Rq		8,213E-06	[m]
Poisson	0,28	0,28	
Dureza	2940000000	380889000	[Pa]
Módulo de elasticidad	2E+11	2E+11	[Pa]
EC	1,08507E+11		[Pa]
R		2,0312E-05	[m]
$\psi$		181	
cálculo			
Carga	L	3724	[N]
Modulo combinado	Ec	1,0851E+11	[Pa]
Rq	$\sigma$	8,213E-06	[m]



**Tabla 4-6** (Continuación)

<b>E4 carga 3724N</b>			
<b>Parámetros</b>	<b>Rueda</b>	<b>Riel</b>	
<b>Radio asperezas</b>	<b>R</b>	2,0312E-05	<b>[m]</b>
<b>Área real</b>	<b>Ar</b>	0,096	<b>[mm<sup>2</sup>]</b>
<b>radio huella</b>	<b>a</b>	12,916	<b>[mm]</b>
<b>Presión media</b>	<b>Pm</b>	38,638	<b>[GPa]</b>
<b>Número asperezas</b>	<b>n</b>	182,536	<b>[número de asperezas]</b>
<b>Número asperezas medido</b>	<b>Rpc</b>	5,118	<b>pk/mm</b>
<b>Numero de asperezas medido (L=7mm)</b>	<b>Nm</b>	35,826	<b>pk</b>
<b>Área Real de contacto</b>	<b>Arc</b>	3,427	<b>[mm<sup>2</sup>]</b>
<b>Presión media real de contacto</b>	<b>Pmrc</b>	1,087	<b>[GPa]</b>

**Tabla 4-7:** Cálculos de área y presión de contacto mediante Modelo de Greenwood - Williamson para Superficie reperfilada del ensayo 5% y 1.1GPa, carga 1470N.

<b>superficie Reperfilada Ensayos 5%, carga 1470N</b>			
<b>Parámetros</b>	<b>Rueda</b>	<b>Riel</b>	
<b>Rq</b>		0,00001656	<b>[m]</b>
<b>Poisson</b>	0,28	0,28	
<b>Dureza</b>	2940000000	381070000	<b>[Pa]</b>
<b>Módulo de elasticidad</b>	2E+11	2E+11	<b>[Pa]</b>
<b>EC</b>	1,0851E+11		<b>[Pa]</b>
<b>R</b>		4,6034E-05	<b>[m]</b>
<b>ψ</b>	171		
<b>cálculo</b>			
<b>Carga</b>	<b>L</b>	1470	<b>[N]</b>
<b>Modulo combinado</b>	<b>Ec</b>	1,0851E+11	<b>[Pa]</b>
<b>Rq</b>	<b>σ</b>	0,00001656	<b>[m]</b>
<b>Radio asperezas</b>	<b>R</b>	0,00004603	<b>[m]</b>
<b>Área real</b>	<b>Ar</b>	0,040	<b>[mm<sup>2</sup>]</b>
<b>radio huella</b>	<b>a</b>	27,610	<b>[mm]</b>
<b>Presión media por aspereza</b>	<b>Pm</b>	36,445	<b>[GPa]</b>
<b>Número asperezas</b>	<b>n</b>	16,717	<b>[número de asperezas]</b>
<b>Número asperezas medido</b>	<b>Rpc</b>	4,463	<b>pk/mm</b>
<b>Numero de asperezas medido (L=9mm)</b>	<b>Nm</b>	40,167	<b>pk</b>
<b>Área Real de contacto</b>	<b>Arc</b>	1,608	<b>[mm<sup>2</sup>]</b>
<b>Presión media real de contacto</b>	<b>Pmrc</b>	0,914	<b>[GPa]</b>

Para carga 1470N el área de contacto real y la presión media de contacto fueron de E4 1.353mm<sup>2</sup> y 1.087GPa respectivamente, cuando la carga es mayor en este caso 3724 N es 3.427mm<sup>2</sup> y 1.087GPa, varía el área de contacto pero la presión es igual; la presión de contacto real y el área de contacto real cuando se disminuye la carga para la superficie reperfilada del ensayo 5% son 0.914GPa y 1.608mm<sup>2</sup> respectivamente. En contraste cuando la carga para esta superficie es 1470N tenemos 4.315mm<sup>2</sup> y 0.863GPa, la presión de contacto es aproximadamente igual varía es el área de contacto. Estos supuestos indican que el R<sub>pc</sub> es determinante para hallar el área de contacto real.

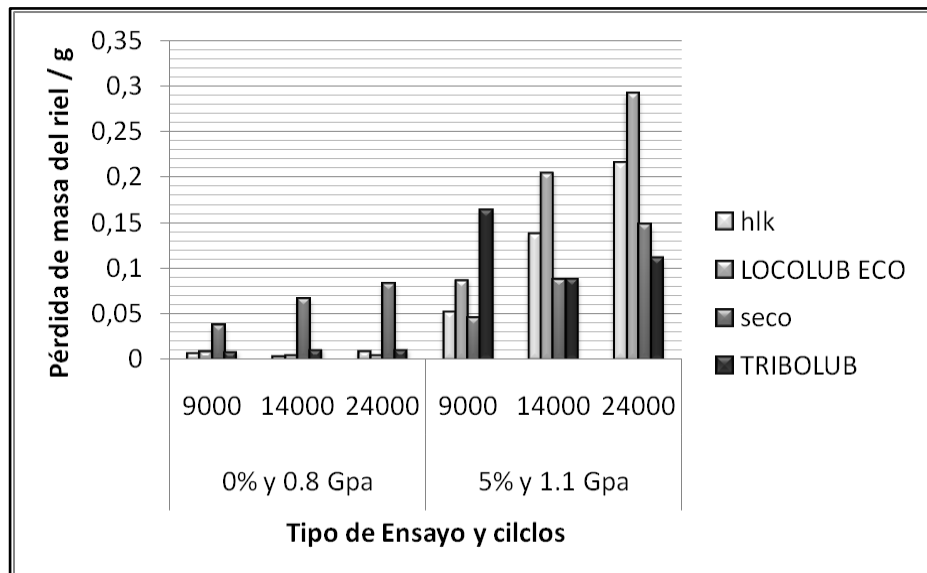
## **4.5 Discusión efecto de las superficies sobre los ensayos tribológicos**

### **4.5.1 Efecto de calidad superficial en desgaste y coeficiente de fricción**

Aunque pareciera por la pérdida de masa en los ensayos de rodadura pura y presión de 0.8GPa (condición de operación en recta) que la calidad superficial no es significativa, al observar las superficies desgastadas se encuentra que las superficies que no fueron tratadas con el proceso de reperfilado tienen mayor daño que las reperfiladas. Los coeficientes de fricción son mayores cuando las probetas fueron reperfiladas con presión alta (profundidad de corte en un solo avance), en donde estos perfiles tenían una *kurtosis* mayor a 3, esto indica que tanto la velocidad de corte como la presión juega un papel importante en la superficie del tribo-sistema, la velocidad para la pérdida de masa y la presión para el COF. Otros parámetros que no se seleccionaron para el análisis pero que sin embargo se midieron y que muestran que fueron significativos para alcanzar un COF mayor fueron Rz, Rdq, y %Rmr; esto es debido a que, como Rz, es la altura máxima del perfil, que se define en la longitud de muestreo, en donde este parámetro se utiliza con frecuencia para comprobar si el perfil que sobresale tiene picos que podrían afectar el deslizamiento en función de contacto, indicando que los ensayos E3 y E4 que tienen mayor COF tienen mayor RZ, en estos los mayores picos sobresalen y por ende se puede decir que aumentan el COF.

Rdq o *root mean square* que se define en la longitud de evaluación, este parámetro es una primera aproximación a la superficie compleja, un valor bajo se encuentra en superficies lisas, mientras que los valores más altos se encuentran en las superficies rugosas que tienen micro-rugosidad, esto es evidente para todos las probetas en las que se realizaron los ensayos; y el %Rmr es la relación de material a una profundidad dada, este parámetro indica el porcentaje de material cortado a una determinada profundidad desde la parte superior del perfil, para los ensayos E3 y E4 la relación de material es la misma, otro factor que puede indicar los COF para estos ensayos. Para los ensayos donde se simuló una condición de operación de curva, la superficie reperfilada marcó una diferencia significativa en el desgaste y la pérdida de masa, ya que se observó que con respecto a las probetas sin reperfilar la superficie tiende a tener una deformación de los picos y valles y esto permite un retraso en el crecimiento de las grietas en las superficies en contacto debido a una reducción en los factores de concentración de esfuerzos. Cuando se aplica lubricante este crecimiento es aún más lento y la pérdida de masa es menor que si la superficie no está con un perfil de rugosidad como el obtenido con el proceso de reperfilado.

**Figura 4-20:** Pérdida de masa después de ensayos tribológicos realizados en el proyecto Metro a 1.1GPa y 5% de deslizamiento, superficies "lisas".





# 5. Conclusiones y recomendaciones

## 5.1 Conclusiones

### 5.1.1 Sobre el análisis en campo

Este análisis experimental determinó que hay un efecto del proceso de reperfilado sobre el desgaste y la fatiga por contacto en el riel, ya que con las diferentes correlaciones establecidas entre las intervenciones de reperfilado (material que se remueve y frecuencia de reperfilado) y las características del riel (la forma de contacto, el peralte, el tipo de riel (hilo alto-bajo) y el radio de curvatura) se puede establecer que el material que se remueve y la frecuencia con la que se realizan las operaciones de reperfilado son determinantes en la reducción y mitigación tanto del desgaste como de la fatiga por contacto.

La vía de la línea B analizada está operando bajo una condición tribológica severa, ya que el intervalo medio entre los procedimientos de reperfilado en el campo es de 2 a 3 veces menor que los valores típicos que se encuentran en la literatura para ferrocarriles similares. La mayoría de las operaciones de reperfilado de rieles se realizan en hilo alto, con un 71% de ellos debido a la fatiga. Por otro lado, en hilo bajo el 51% de las tareas de reperfilado del riel se realizan debido a los daños de ondulación y la fatiga no es significativa.

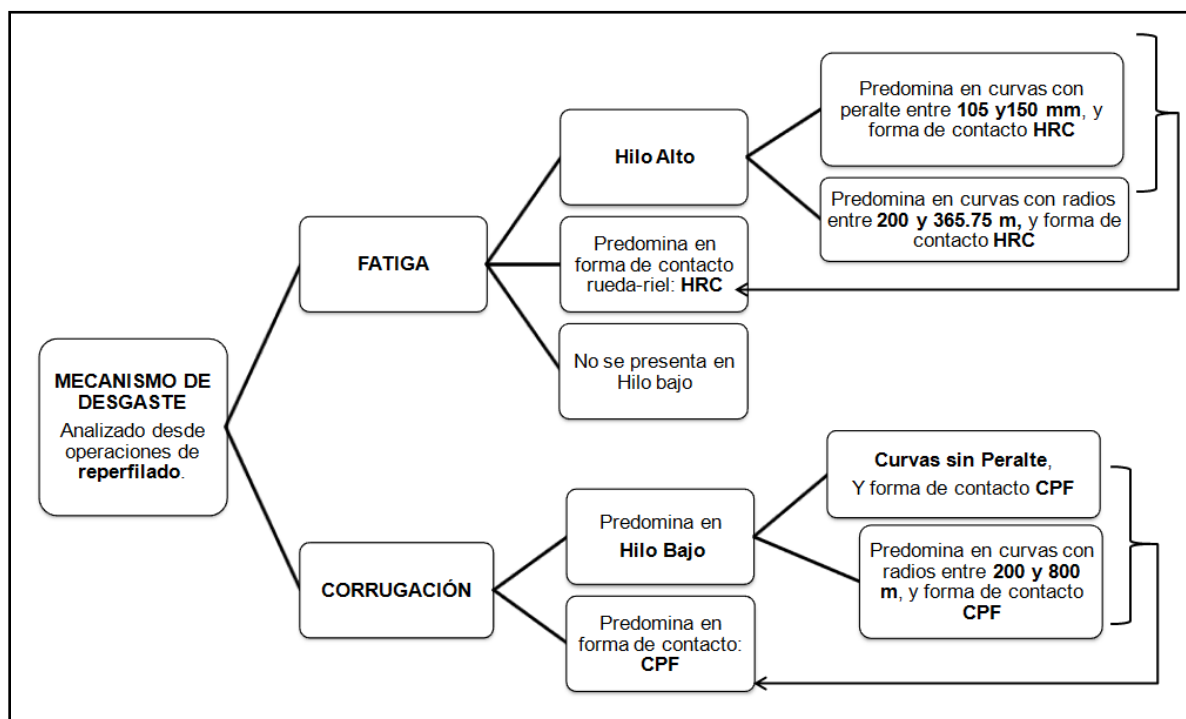
Tras el análisis de los datos de reperfilado de 10 años de inspecciones se determinó que la fatiga de contacto es el principal mecanismo de daño encontrado y *head-checks*, marcas de *spalling* y geometría negativa en las soldaduras son los defectos más relevantes en ambos rieles tanto para hilo alto como para el bajo.

Se identificó que desde la operación de reperfilado las principales variables son el tamaño de grano de la piedra, la velocidad de avance y la presión (que determina la profundidad de corte).

De acuerdo con las variables principales del proceso de reperfilado de manera específica se identificó que hay una buena correlación entre el tipo de daño, el número de operaciones de reperfilado, el perfil o forma de contacto rueda-riel, el radio de la curva y del peralte de la curva. En términos generales, el número de operaciones de reperfilado aumentó con peralte y disminuyó con el radio de la curva.

La Figura C-5-1 muestra un esquema general de los mecanismos de desgaste encontrados en campo de acuerdo con las características del riel y del contacto con la rueda.

**Figura C-5-1:** Esquema General de mecanismo de desgaste para el sistema rueda-riel del Metro de Medellín.



### 5.1.2 Sobre las pruebas de laboratorio

Las variables principales de reperfilado que se encontraron en campo se replicaron en un montaje de laboratorio, en donde fue posible modificar la velocidad de avance, la profundidad de corte y mantener fijo un ángulo de contacto.

Al realizar las pruebas de reperfilado en laboratorio se encontró que para Presión Alta y Velocidad Alta son significativos los parámetros de rugosidad  $R_p$ ,  $R_k$ ,  $Mr_2$  y  $Rmr$ .

Al observar detalladamente los perfiles de rugosidad se encontró que los parámetros de amplitud media no variaron significativamente para los diferentes ensayos de reperfilado, ya que tanto las alturas de los picos como la profundidad de los valles fueron aproximadamente iguales debido a que la profundidad de corte final fue igual para todos. Los parámetros que sí variaron al combinar la presión alta y baja y la velocidad alta y baja fueron  $Rku$  y  $Rsk$ , los cuales informan sobre la distribución de picos y la asimetría del perfil y tuvieron una correlación verificable con la pérdida de masa en los ensayos tribológicos.

Las pruebas de reperfilado tienen mayor significancia no en la calidad superficial sino en las propiedades mecánicas de la superficie, ya que la temperatura generada en el proceso abrasivo de la piedra con el riel transforma la superficie a martensita formada debido a un calentamiento localizado y rápido enfriamiento. Durante los procedimientos de reperfilado las durezas encontradas variaron entre 410 y 800 HV en esta capa. Así pues se pudo determinar que los parámetros significativos son debidos a la velocidad de corte, que permiten una calidad superficial más homogénea entre la distribución de picos y valles siendo mejor cuando la velocidad es alta.

El hecho de remover el material que se requiere con una sola profundidad de corte hace que la capa de martensita que se forma sea menor, y que la superficie tenga menores tensiones residuales y por ende no aumente la dureza superficial.

Para los ensayos de rodadura pura el perfil de rugosidad inicial no es significativo para la pérdida de masa del riel, este se debe a la dureza de la superficie dada por la

capa blanca que se forma por la temperatura alcanzada en las operaciones de reperfilado; el perfil de rugosidad es significativo para el daño superficial; para el COF los parámetros significativos son el Rku y el Rz.

Los ensayos al 5% de deslizamiento muestran que el perfil de rugosidad tiene un efecto significativo sobre la pérdida de masa, y tanto en el COF como en la superficie desgastada es más notorio su efecto cuando hay presencia de la película lubricada. Después de los 4000 ciclos de pre-agrietamiento, que en la superficie reperfilada es deformación plástica, puede causar tensiones residuales a medida que aumenta el ciclo, puesto que al calcular el área real por el modelo G&W se observa que el área de contacto es menor y por ende las presiones de contacto son mayores.

## 5.2 Recomendaciones

Para las curvas críticas dañadas por Fatiga, que son las que mayor desgaste presentan, es importante observar la frecuencia de reperfilado y realizar un mantenimiento preventivo, por medio de operaciones de reperfilado un poco antes de la frecuencia que se determinó en cada curva, esto acompañado y ayudado de la inspección visual y si es posible con un Microscopio óptico portátil y/o registro fotográfico con una cámara de alta resolución, las fotografías realizadas en campo permiten observar mejor las grietas, ya que a simple vista se dificulta la visualización de dichas evidencias de fatiga; esto con el fin de asegurar la remoción completa de las grietas. Además, según los resultados obtenidos, es importante aplicar lubricante en estas curvas después del asentamiento de los picos obtenidos por el reperfilado, dicho asentamiento se alcanza los 4000 ciclos de trabajo en el riel. Luego de obtener el mencionado asentamiento se debe lubricar, como lo mostraron los resultados de los ensayos.

Cuando el mecanismo de daño es por ondulación o corrugación, es importante al igual que para las curvas que presentan fatiga, observar la frecuencia que se determinó para cada curva e intervenir con la herramienta del *CAT*, esto con el fin de realizar al menos dos medidas dentro de la frecuencia de días establecidos para las intervenciones de



reperfilado, siempre valoradas en las normas establecidas para el RMs y el porcentaje de excedencia, que además cobra vital importancia, ya que se encontró que las medidas tomadas después de las intervenciones de reperfilado no cumplen la norma establecida.

Dado que la superficie reperfilada en estos ensayos disminuyó la pérdida de masa y el desgaste superficial, pero aumentó el COF en un 21% con respecto a una superficie lisa, es importante encontrar un equilibrio entre el perfil de rugosidad de la superficie y el lubricante aplicado, con el fin de obtener el COF adecuado; dado que el Tribolub es un lubricante que disminuye significativamente el desgaste superficial y la pérdida de masa; debería entonces hacerse mayores estudios de los perfiles de rugosidad con este lubricante o modificador de fricción; es también importante tener en cuenta que el perfil de rugosidad puede variar dependiendo del ángulo de contacto con el que se reperfila, dependiendo el tamaño de grano de la piedra, la velocidad de avance del reperfilado y la presión de contacto, en este caso, teniendo en cuenta las anteriores variables, es recomendable reperfilear con altas velocidades y una profundidad de contacto igual a la del material que se va a remover.

Dado que las operaciones de reperfilado crean una capa blanca o martensita en la superficie, es importante implementar la refrigeración en el contacto, ya que está se presenta por las altas temperaturas que se generan en el reperfilado, es por ello que los ensayos que menor desgaste dieron fue los de Velocidad alta y una profundidad de corte igual a la del material total que se removía, puesto que se realiza la operación más rápido y con menos calentamiento en la superficie, disminuyendo la transformación de la microestructura superficial martensítica, con esto se quiere decir que es importante refrigerar el contacto del reperfilado.

Dado que hubo una relación entre mecanismo de desgaste y parámetros de diseño de las curvas (radio, peralte y forma de contacto rueda-riel) es necesario rediseñar los perfiles de contacto para disminuir los daños presentes, ya que en las rectas los daños se presentan en un 1% en comparación con las curvas.

Además con el fin de obtener mejor la frecuencia de cada curva para determinar el material a remover, es conveniente que al menos en un promedio de dos años se

realicen medidas de perfil con *Miniprof*, antes e inmediatamente de la operación de reperfilado, pues así las tasas mágicas de desgaste (la suma del material que se remueve con el reperfilado y el que se remueve por el desgaste por contacto rueda-riel) se pueden calcular y pueden ayudar a tener un mejor análisis para realizar un mantenimiento predictivo, pues de los datos obtenidos de *Miniprof* hasta ahora no evidencia cuanto es el material que en realidad se está removiendo en el reperfilado; además es posible que las curvas de mayor desgaste, tengan esa condición debido a pérdidas por mecanismos de desgaste, desprendimientos de material, y no por el reperfilado, de esto se da cuenta en el análisis de las frecuencias de reperfilado para cada curva.

Lo que continua, de acuerdo con los resultados de la tesis, es encontrar los perfiles superficiales óptimos para las curvas que se trabajaron por medio del estudio de las deformaciones por tensiones residuales, esfuerzos en área real con las superficies reperfiladas, y por medio de modificadores de fricción; también estudiar los tribo-sistemas óptimos para el contacto rueda-riel, esto es la relación rueda - lubricante (modificador de fricción) - riel, haciendo simulaciones y experimentos en campo y laboratorio.

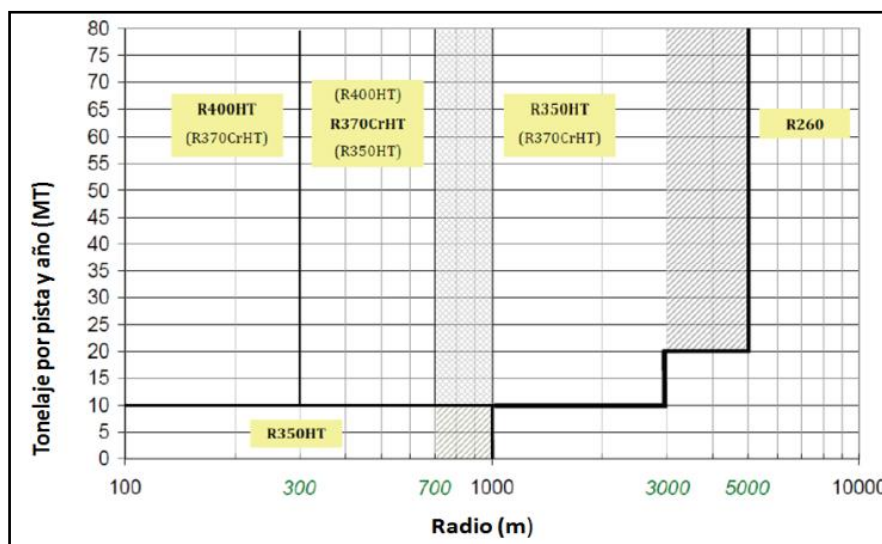
**Tabla R-5-1: Recomendación.**

Características de la curva				DESDE 2001				RECOMENDACIÓN			
MECANISMO DE DAÑO	CURVA	TIPO DE PERALTE	FORMA DE CONTACTO	FRECUENCIA DE INTERVENCIÓN DE REPERFILADO (DÍAS)	MATERIAL QUE SE REMUEVE (mm)			Tiempo de vida (años)	W mínimo recomendado en mm. W1: CPC, CPF, W2: HRC	FRECUENCIA Mínima DE INTERVENCIÓN DE REPERFILADO (DÍAS)	Tiempo de vida esperado (años)
					W1	W2	W3				
predomina fatiga ante corrugación	C5	HA	HRC	228	0,44	0,42	0,44	17,54	0,70	450	21,14
	C12	HA	HRC	172	0,45	0,67	0,49	9,71	0,90	422	15,42
	C4	HA	HRC	182	0,45	0,58	0,48	11,33	0,80	407	16,73
	C11	HA	HRC	210	0,48	0,53	0,48	12,53	0,90	437	15,96
	C2	HA	HRC	191	0,50	0,58	0,49	11,78	0,90	443	16,18
	C9	HA	HRC	198	0,39	0,46	0,43	14,64	0,80	413	16,97
	C16	HA	HRC	261	0,54	0,65	0,59	13,86	0,90	392	14,32
	C20	HA	HRC	355	0,08	0,06	0,07	23,34	0,50	461	30,31
	C1	HA	HRC	121	0,20	0,21	0,25	17,53	0,60	400	21,92
predomina corrugación ante fatiga	C18	HA	CPF	589	1,07	0,23	0,58	18,02	1,00	706	23,21
	C19	HA	CPC	434	0,67	0,27	0,54	21,32	0,80	600	24,66
sin corrugación	C15	HA	CPC	514	0,56	0,03	0,30	30,10	0,70	737	34,61
	C14	HA	CPF	405	0,84	0,76	0,81	15,85	1,00	562	18,48
	C13	HA	CPF	596	0,89	0,03	0,46	21,97	1,20	893	24,47
	C8	HA	HRC	191	0,50	0,63	0,50	12,44	0,90	450	16,44
	C6	HA	HRC	252	0,50	0,55	0,53	15,51	0,70	409	19,21
	C22	HA	CPF	296	0,94	0,52	0,87	10,37	1,20	552	15,12
	C3	HA	HRC	172	0,18	0,12	0,17	18,90	0,70	479	22,50
	C21	HA	CPC	622	0,76	0,36	0,65	27,02	1,00	944	31,04
SOLO CORRUGACIÓN	C17	HA	CPC	855	0,92	-0,28	0,26	30,68	1,10	1140	34,07
	C1	HB	CPF	90	0,58	0,69	0,54	5,08	1,00	306	10,06
	C3	HB	CPF	112	0,61	0,49	0,47	6,03	1,00	296	9,73
	C9	HB	CPF	179	0,63	0,44	0,55	9,36	1,00	364	11,97
	C2	HB	CPF	254	0,73	0,85	0,68	11,41	1,00	445	14,63
	C11	HB	CPF	277	0,50	0,17	0,34	18,20	1,00	684	22,49
	C6	HB	CPF	316	0,61	0,23	0,44	17,12	0,80	521	21,41
	C12	HB	CPF	203	0,71	0,93	0,69	9,37	1,20	460	12,60
	C4	HB	CPF	248	0,79	1,11	0,69	10,34	1,00	503	16,54
	C5	HB	CPF	278	0,55	0,22	0,38	16,74	0,80	477	19,60
	C8	HB	CPF	301	0,58	0,27	0,42	16,92	0,80	476	19,56
	C20	HB	CPF	422	0,77	0,22	0,50	17,99	1,00	617	20,28
	C16	HB	CPF	305	0,55	0,11	0,35	18,28	0,90	639	23,34
	C19	HB	CPC	434	0,39	0,01	0,31	36,91	0,50	639	42,02
	C15	HB	CPC	514	0,56	0,08	0,14	29,95	0,70	754	35,41
	C14	HB	CPF	463	0,71	0,14	0,44	21,43	1,00	829	27,25
C13	HB	CPF	746	0,92	0,07	0,25	26,71	1,30	1300	32,88	
C18	HB	CPF	883	1,63	0,02	0,70	17,82	1,90	1177	20,37	

Además de estas recomendaciones establecidas Schoech y otros establecen que son tres parámetros importantes para aumentar la vida del riel, aumentar la seguridad en vía y tener mejores operaciones de trabajo del sistema ferroviario, los parámetros establecidos que se deben llevar los tres en el mismo tiempo son el mantenimiento del riel quitando el material efectivo, tener la dureza de acuerdo con el radio de la curva (ver Figura 6-2) y tener un mantenimiento preventivo cíclico, encontrar este equilibrio ayudará a aumentar la vida del riel.

En este sentido con respecto a la dureza del riel es importante tener en cuenta las especificaciones que plantea Schoech, de esta manera se tiene, que el acero del riel bruto laminado R260 con una dureza mínima de 260BHN debe ser aplicado principalmente en tramos de curvas con tangentes y en curvas anchas, pero a veces también a lo largo de toda la vía. Los grados de acero más duro, según las investigaciones actuales [73, 74, 75] son más resistente al desgaste, a la corrugación y a la presencia de *head-check*, así el acero del riel tratado térmicamente R350HT, se aplican en curvas con radios de hasta 700m de radio en rieles de hilo alto, ya que son los que más desgaste lateral sufren y para los rieles de hilo bajo, que se ven afectados por la ondulación. Y para sistemas ferroviarios con aumento de las cargas por eje, en particular se usa aceros con alta resistencia ferroviaria con dureza de 370BHN y superiores. Estos aceros ferroviarios son ahora también en la prueba con las líneas de tráfico mixto, además que la norma europea EN13674-1 [76] ha puesto en marcha en el año 2011 todos los grados de acero disponibles que van desde 200BHN (como laminados) hasta más de 400BHN (hiper-eutectoide, cabeza endurecida). Así pues la aplicación de las medidas antes mencionadas para la optimización sería más eficaz si se utiliza en combinación considerando su interacción. Sólo un enfoque global para todo el sistema, teniendo en cuenta las propiedades del acero y aplicado regímenes de mantenimiento proporcionará el mejor resultado [73, 77].

**Figura R-5-2:** Selección de acero grado basada en radios de curva [77].



# A. Anexo: Especificaciones teóricas y experimentales

## A.1 Reperfiladora del Metro de Medellín

Figura A-5-3: Máquina reperfiladora de rieles.



Figura A-5-4: Reperfilado en campo.



134 “Análisis experimental del efecto del proceso de reperfilado sobre el desgaste y fatiga por contacto de rodadura de riel en el sistema rueda-riel en el Metro de Medellín”

Modelo: El modelo TG-8 es una esmeriladora de rieles controlada por computadora.

Especificaciones. En la Tabla 1. Se encuentran las especificaciones de la reperfiladora del Metro de Medellín.

**Tabla A-5-2:** Especificaciones generales máquina reperfiladora del Metro de Medellín [10].

Peso.....	Total: 45.100 lbs. (200.6 kN) Eje delantero: 21.875 lbs. (97.3 kN) Eje trasero: 23.225 lbs. (103.3 kN)
Largo.....	354 pulgadas (8.99m)
Altura.....	134 pulgadas (3.39m)
Ancho.....	98.43 pulgadas (2.50m)
Ruedas.....	28 pulgadas de diámetro (711mm diámetro)
Cojinetes.....	6 x 11 Timken
Propulsión.....	Dos ejes de transmisión hidrostática de 2 velocidades
Motor (principal).....	Cummins MTA-11C, 350 hp @ 2100 rpm (261 kw @ 2100 rpm)
Equipo del generador.....	20 kw, 60 Hz, 120/240 volt
Potencia neumática.....	Principal: 120 psi/30 scfm Auxiliar: 120 psi/12 scfm
Baterías.....	(2) 8D-14 volt
Frenos.....	Aire/autoprotección
Velocidad de viaje.....	Hasta 25 mph (40 km/h)
Velocidad de esmerilar.....	1 a 8 mph (1.6 a 12.8 km/h)
Capacidad del depósito de aceite hidráulico.....	263 gal. americanos (995 litros)
Capacidad del depósito de combustible.....	159 gal. americanos (600 litros)
Cabezas esmeriladoras.....	8 cabezas, 23 hp (17 kw) @ 4800 rpm (6 pulgadas dia. piedra)

Descripción de la Máquina: El modelo TG-8 es una esmeriladora de rieles controlada por computadora. Es un vehículo que se propulsa por sí solo, que contiene 8 cabezas esmeriladoras (4 por cada lado), diseñado para esmerilar superficies de rieles en la

ferrovía principal así como en cruces y cambios. Todas las funciones de esmerilar (incluyendo el posicionamiento lateral y de ángulo) se controlan desde el interior de la cabina. Una computadora permite vigilar, ajustar y preparar individualmente las cabezas esmeriladoras. La computadora también se usa para seleccionar y mantener automáticamente 99 patrones diferentes de esmerilar preestablecidos. La esmeriladora de rieles tiene 29 ½pies de largo (8.99m), pesa 45.100libras (200.6kN) y tiene ruedas ferroviarias especiales de 28pulgadas (711m). Un sistema de manejo hidrostático con dos ejes de transmisión de dos velocidades provee propulsión al vehículo. Un motor Cummins modelo MTA 11-C diesel maneja ocho bombas hidráulicas que alimentan los distintos sistemas hidráulicos. Un compresor de aire colocado directamente y manejado por el motor proporciona el suministro principal de aire para el sistema neumático. Un generador de poder hidráulico de 20kw proporciona potencia eléctrica auxiliar. Cada cabeza esmeriladora tiene una capacidad de ajuste de ángulo de  $+45^{\circ}/-40^{\circ}$  y una capacidad de posicionamiento lateral de  $+2, -1.5$  pulgadas ( $\pm 5$ cm).

La velocidad de viaje para desplazarse sobre la ferrovía es de hasta 25 mph (40km/h); la velocidad de trabajo se puede ajustar de 1 a 8mph (1.6 a 13km/h). El sistema de manejo provee control de velocidad automático que mantiene la velocidad seleccionada [10].

## A.2 Estrategias básicas de Reperfilado

Según *Speno International*, una empresa especializada en el mantenimiento de rieles [12, 13], el reperfilado puede ser de los siguientes tipos:

**Riel nuevo:** El *reperfilado* del riel nuevo, denominado también "*reperfilado* inicial" sirve para eliminar la película del laminado, es decir, para quitar la zona oxidada, para prevenir la formación de desgaste ondulatorio y de *headchecks*, el deterioro de la superficie de rodadura por las máquinas de obra, los defectos de montaje, tales como por ejemplo las ondas largas o la inclinación de los carriles, pueden así ser corregidos, para restablecer el perfil de uso prescrito. También son eliminadas las irregularidades producidas por las juntas soldadas.

**Preventivo:** El *reperfilado* preventivo tiene por objetivo conservar la superficie del carril en buen estado, cercano al nuevo, antes que los defectos se conviertan en serios problemas. Este es generalmente el caso con los defectos de fatiga de superficie, donde

solamente se quitan pequeñas cantidades de metal en intervalos regulares. El *reperfilado* preventivo se planifica con antelación y no requiere más que un pequeño número de pasadas, según la configuración de las máquinas, a veces es suficiente una sola.

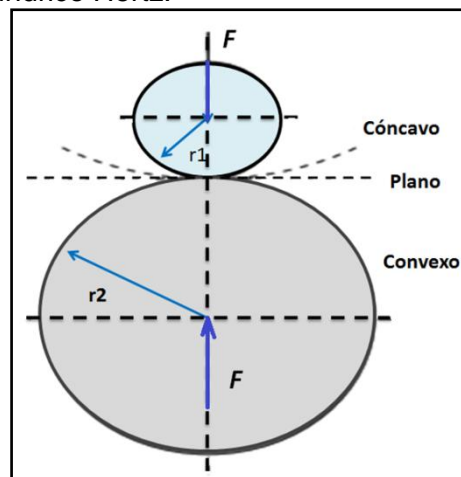
**Cíclico:** Para prevenir las vibraciones de la vía y mantener bajo control la formación de fatigas de superficie, el reperfilado deberá realizarse de forma cíclica y periódica. Estas intervenciones se planifican a intervalos fijos, generalmente después del tránsito por la línea de un determinado número de toneladas (por ejemplo después de cada 20 millones de toneladas) o aún siguiendo programas de reducción de ruidos, basados en estadísticas. También es aconsejable una pasada suplementaria de cara a alcanzar una estructura metalúrgica homogénea.

**Sintomático:** Si en las inspecciones regulares, se constata que son alcanzados los límites que definen las tolerancias, entonces hay que proceder a un reperfilado adaptado a los síntomas observados.

### A.3 Cálculo de Área de contacto y presión de contacto para un contacto cilíndrico propuesto por Hertz

El contacto cilíndrico es el utilizado para hallar las presiones y áreas de contacto en ensayos disco-disco.

**Figura A-5-5:** Contacto cilíndrico Hertz.





El rectángulo tendrá un semiancho  $a$  y la presión de contacto será máxima  $P_{max}$  en el centro y cero en los bordes. La carga aplicada sobre la huella de contacto es igual al volumen del semiprisma [18], (ver Ecuación (A.3.1):

$$F = \frac{1}{2} \pi a L P_{max} \quad (A.3.1)$$

Donde  $F$  es la carga total aplicada y  $L$  es la longitud de contacto a lo largo del cilindro. En donde de acuerdo con la Ecuación anterior la presión máxima y la presión promedio son:

$$P_{max} = \frac{2F}{\pi a L} \quad (A.3.2)$$

$$P_{promedio} = \frac{F}{area} = \frac{F}{2aL} \quad (A.3.3)$$

Las constante geométrica  $B$  que se definen en este modelo depende de los radios  $R_1$  y  $R_2$  correspondientes a ambos cilindros en contacto. La Ecuación está dada a continuación:

$$B = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (A.3.4)$$

Con la constante  $B$  se pasa a calcular el semiancho del rectángulo tal como se muestran en la Ecuación (A.3.5).

$$a = \sqrt{\frac{2F}{\pi L} \left( \frac{m_1 + m_2}{B} \right)} \quad (A.3.5)$$

En donde:

$m_1$  y  $m_2$  son constantes del material que se encuentran dadas por la Ecuación (A.3.6).

$$m_1 = \frac{1-v_1^2}{E_1} m_2 = \frac{1-v_2^2}{E_2} \quad (A.3.6)$$

$v_1, v_2$ : Razones de Poisson del material del cilindro 1 y del cilindro 2.

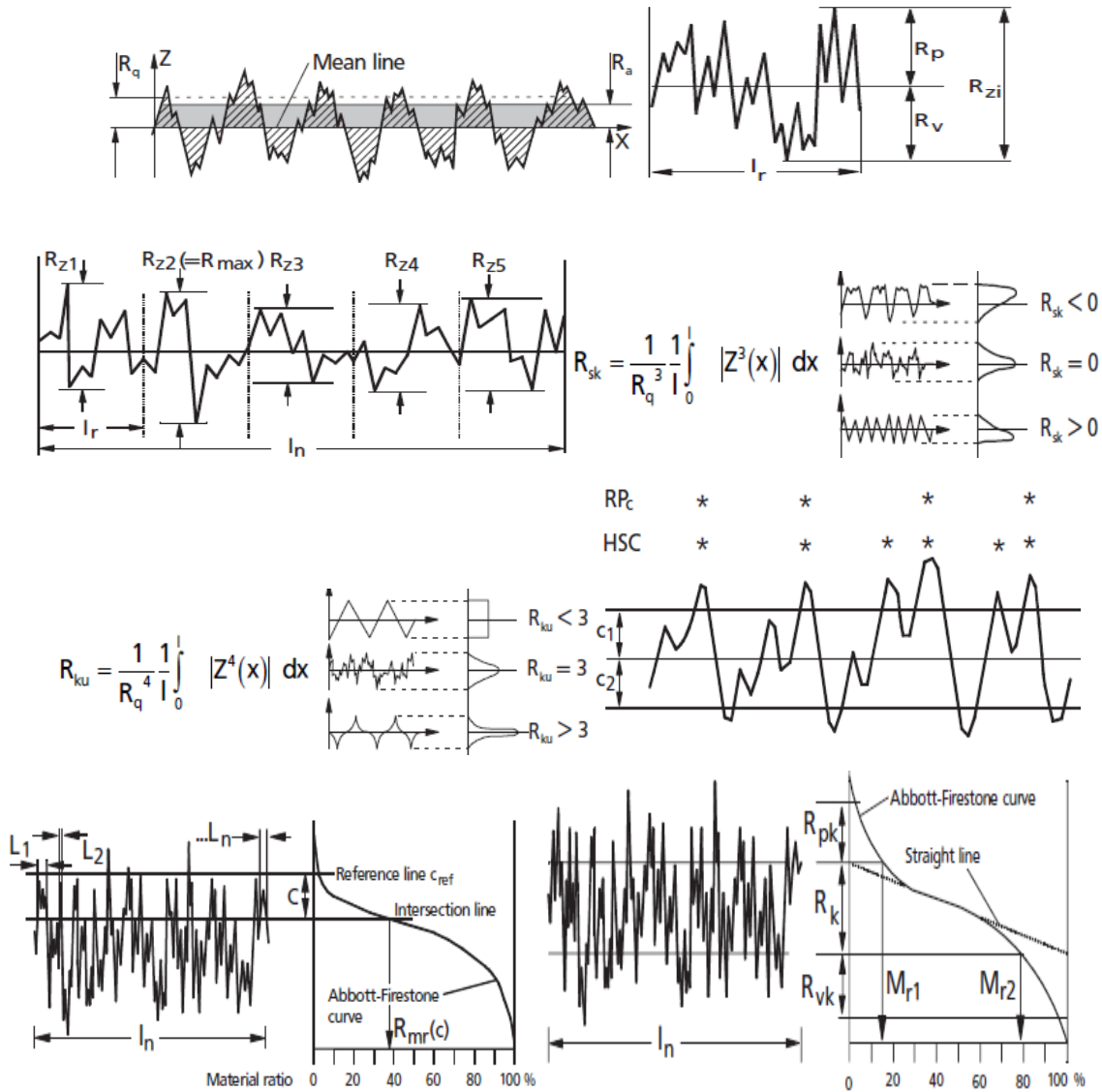
$E_1, E_2$ : Módulos de Young para los materiales de los cilindros 1 y 2 respectivamente.

Teniendo el semiancho se puede calcular el área aparente en contacto cilíndrico utilizando la Ecuación (A.3.7).

$$A_a = 2aL \tag{A.3.7}$$

## A.4 Parámetros de Rugosidad

Figura A-5-6: Imágenes teóricas de los parámetros de rugosidad.



R<sub>c</sub>, la altura de los elementos de perfil medio definido en la longitud de evaluación. Este parámetro se puede calcular en superficies que tienen células textura o granos. Es similar al parámetro motivo R encontrado en la norma ISO 12085 y, en ese sentido, se debe considerar como un parámetro de función (norma ISO 25178).

- **Parámetros espaciales**

R<sub>S</sub>m, el espaciamiento medio de elementos de perfil, que se define en la longitud de evaluación. Este parámetro es interesante en las superficies que tienen motivos periódicos o seudoperiódico, tales como superficies torneadas o estructurados. En estos casos, RSM se aproximará a su separación. RSm no tiene sentido en la textura de la superficie random.

- **Parámetros híbridos**

RDQ, *root mean square* pendiente del perfil evaluado, que se define en la longitud de evaluación. RDQ es una primera aproximación a la superficie complejidad. Un valor bajo se encuentra en superficies lisas, mientras que los valores más altos se encuentran en las superficies rugosas que tienen micro-rugosidad.

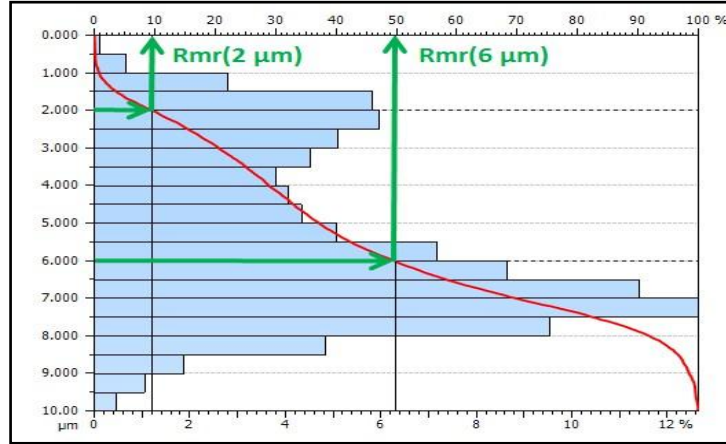
RPC, número de cuenta de pico. Fue introducido en la enmienda 1. Proporciona la densidad de picos por unidad de longitud.

- **Los parámetros funcionales**

R<sub>mr</sub>, relación de material a una profundidad dada. Este parámetro indica el porcentaje de material cortado a una determinada profundidad desde la parte superior del perfil. La referencia también se puede tomar de la línea central u otra altura de referencia (c0).

R<sub>dc</sub>, sección de perfil de altura entre dos relaciones de materiales. Un valor estable de la altura de rugosidad se puede evaluar mediante RDC (2% -98%) si los valores atípicos están presentes en la superficie. Este cálculo excluye los picos más altos que serán gastados y los valles más profundos que ser llenado pulg En la industria automotriz, la altura de material removido durante el rodaje se puede evaluar con Rdc (1% -33%) y el volumen de huecos usado para los bolsillos de lubricante se puede evaluar con Rdc (25% -99%).

**Figura A-5-7:** Proporción de materiales calculado sobre la curva de Abbott-Firestone [20].



▪ **Parámetros de la norma ISO 13565-2 [20]**

$R_k$ , profundidad de la rugosidad del núcleo

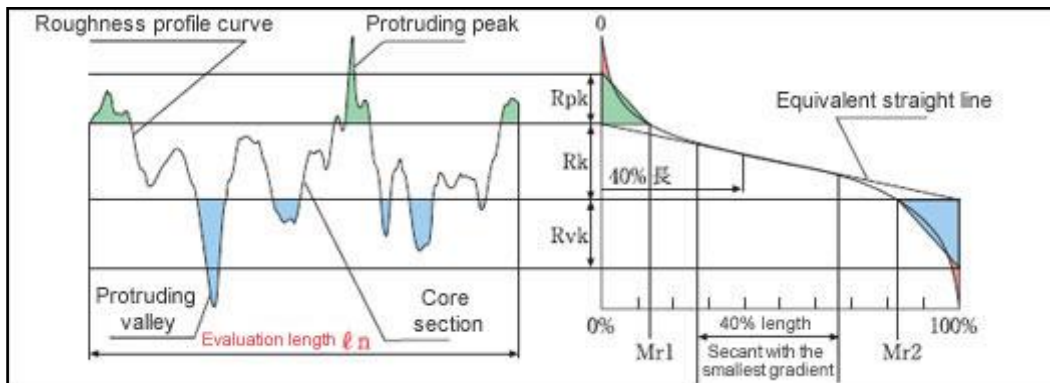
$R_{pk}$ , reducción de la altura del pico. Este parámetro se utiliza para caracterizar los picos salientes que podrían ser eliminados durante la función.

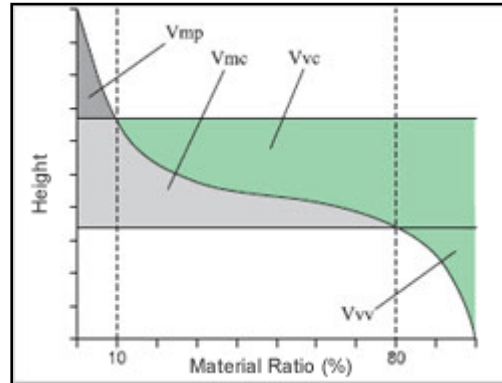
$R_{vk}$ , reducción de la profundidad del valle. Este parámetro se utiliza para caracterizar valles que retendrán los materiales lubricantes o agotadas.

$MR1$  y  $MR2$ : material que delimita el área de la base.

Otros parámetros, como  $A1$  y  $A2$ ,  $R_{pk}^*$  o  $R_{vk}^*$  También se pueden calcular para el uso específico.

**Figura A-5-8:** Construcción gráfica de parámetros [21].



**Figura A-5-9:** Volumen de retención de aceite [20].

- **Parámetros de la norma ISO 13565-3 [20]**

Esta norma está especializada en la caracterización de componentes aleatorios verticales estratificadas, como una textura valle con una textura fina superpuesta meseta. Una vez más, estos parámetros deberían calcularse sólo en superficies que cumplen con esta descripción.

Rugosidad RPQ, *Plateau Root Mean Square* del perfil

Rvq, rugosidad Valle *Root Mean Square* del perfil

RMQ, relación de material en la transición de la meseta y valles del perfil.

## A.5 Área de contacto real modelo G&W

Parámetros utilizados en el modelo:

$\sigma$ : Rq, rugosidad media cuadrática (m)

R: Radio de asperezas (m)

$E_1, E_2$ : Módulos de Young para los materiales de los elementos involucrados en el contacto

$\nu_1, \nu_2$ : Razones de *Poisson* para los materiales de los elementos involucrados en el contacto

$E_c$ : Módulos de Young combinado, se puede calcular utilizando la Ecuación (A.5.1)

$$\frac{1}{E_c} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (\text{A.5.1})$$

L: Carga normal aplicada (N)

$A_r$ : Área real de contacto estimada por el modelo de Greenwood y Williamson. (m<sup>2</sup>).

$P_m$ : Presión media de contacto (Pa)

$\psi$ : Índice de plasticidad, el cual puede ser calculado con la Ecuación (A.5.2).

$H$ : Dureza del material involucrado en el contacto (Pa)

$$\psi = \left(\frac{\sigma}{R}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{E_c}{H}\right) \quad (\text{A.5.2})$$

Greenwood y Williamson demostraron que el área real de contacto, puede determinarse con la presión media y el número de asperezas en contacto con las ecuaciones (A.5.3), (A.5.4) y (A.5.5) respectivamente. Para un contacto de tipo elástico entre una superficie plana y una superficie rugosa [26, 25].

$$A_r = \left(\frac{\pi R}{\sigma}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{L}{E_c}\right) \quad (\text{A.5.3})$$

$$P_m = \frac{L}{A_r} \quad (\text{A.5.4})$$

$$n = \frac{L}{\pi^{\frac{1}{2}} \times E_c \times \sigma^{\frac{3}{2}} \times R^{\frac{1}{2}}} \quad (\text{A.5.5})$$

Además el modelo de Greenwood y Williamson, indica que es necesario que la deformación de las asperezas sea predominantemente elástica, definiendo así en el modelo que, el índice de plasticidad  $\psi$  dado en la Ecuación (2.2.2) para determinar si la deformación es predominantemente plástica o elástica. Si  $\psi \geq 1$ , indica que  $P_m$  supera la dureza y la deformación es predominantemente plástica. Luego, si  $\psi < 0.6$ , indica que la deformación de contacto es elástica [25].

## A.6 El porcentaje de deslizamiento

Se calculó de acuerdo con Fletcher y Beynon (2000) [61, 62],

$$\text{Deslizamiento acumulado (\%)} = 200 \left( \frac{R_W N_W - R_R N_R}{R_W N_W + R_R N_R} \right) \quad (\text{A.6.1})$$

donde  $N$  es el número de revoluciones de los discos,  $R$  es el radio; y en los subíndices  $W$  corresponde a rueda (*wheel*) y  $R$  a riel (*rail*). Para calcular las velocidades de los motores,

se hicieron dos aproximaciones, la primera igualando la velocidad tangencial de las probetas de rueda con la velocidad tangencial de una rueda operando en vía comercial. La segunda igualando las revoluciones por minuto de las probetas y de las ruedas. Las ruedas en operación se van desgastando y son reperfiladas así que su diámetro disminuye, pero se puede tomar un diámetro promedio de 800mm. La velocidad promedio del metro de Medellín es decir la velocidad lineal del centro de masa de las ruedas, es de 60Km/h = 1000m/min.

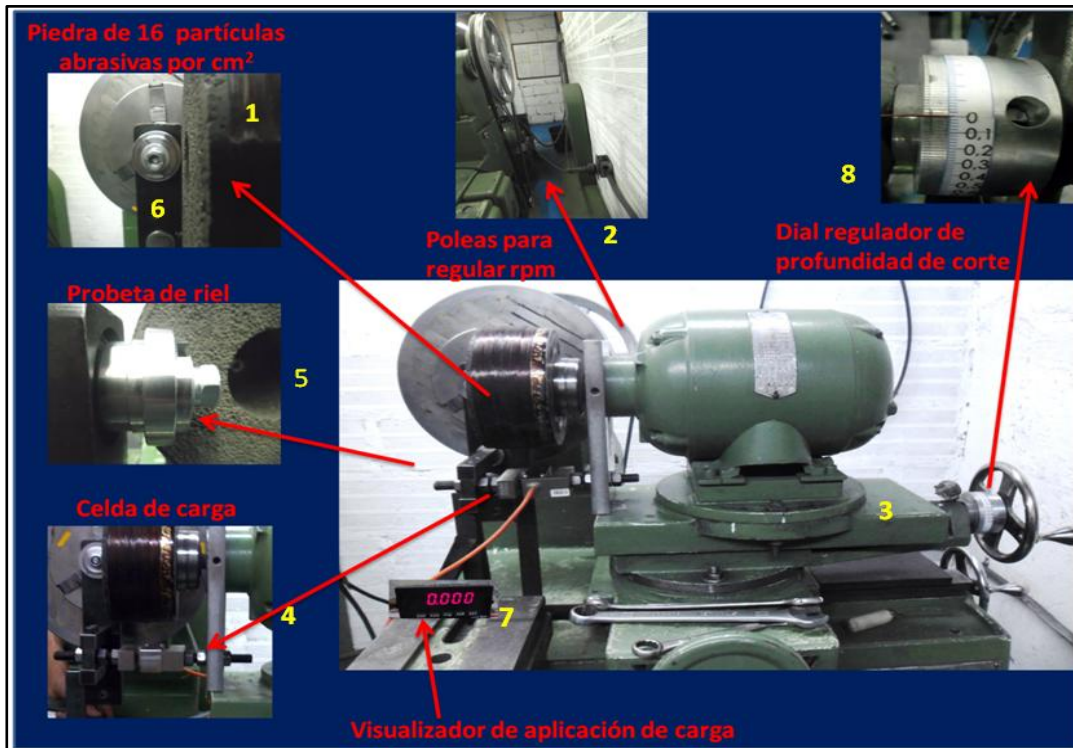
Se sabe que la velocidad tangencial de la rueda con respecto al riel es equivalente a la velocidad del centro de masa con respecto al centro instantáneo de rotación, es decir:

$$v_{tR} = \omega_R R_R \Rightarrow \omega_R = \frac{v_{tR}}{R_R} = \frac{1000 \text{ m/min}}{0.4 \text{ m}} = 2500 \text{ rad/min} \quad (\text{A.6.2})$$

$$RPM_R = \frac{\omega_R}{2\pi} = \frac{2500 \text{ rad/min}}{2\pi} = 397.9 \approx 400 \quad (\text{A.6.3})$$

## A.7 Montaje pruebas de reperfilado

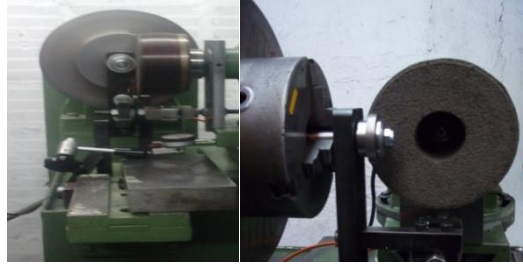
Figura A-5-10: Pasos montaje de pruebas de reperfilado.



### Procedimiento de montaje

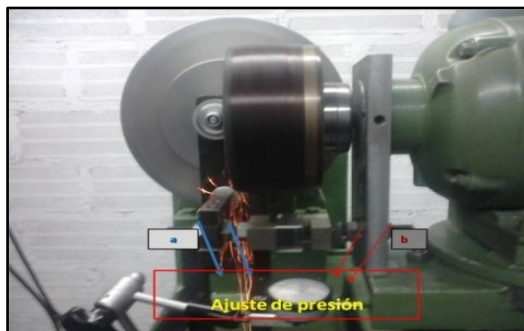
1. Colocar la piedra al motor
2. Saber la velocidad lineal que se quiere, luego hacer la relación del diámetro de la probeta a reperfilar y luego calcular las RPM que se necesitan para saber que la relación de las poleas. después se desmontan las poleas que están en la parte de atrás y se monta la relación de poleas que se necesita, se tienen poleas de 1", 1 1/2", 2", 2 1/2", 3" y 12" de diámetro, las RMP del motor son de 1140, y se coloca la correa de acuerdo con la relación que se tomó.
3. Alinear la base del motor, en el ángulo que se desea hacer el contacto.
4. Montar dispositivo diseñado para colocar la celda de carga en la mordaza, que quede bien ajustado a la mesa.
5. Montar la probeta a la mordaza.
6. Comprobar que este alineada la piedra con la probeta y que estén haciendo contacto.

**Figura A-5-11:** Alienación del contacto de la piedra con la probeta.



7. Con la celda de carga ajustar el dispositivo para que la presión de contacto sea cero, recordar que la piedra está en contacto con la probeta, para ello se requiere ajustar en dos sentidos a y b hasta tener cero carga.

**Figura A-5-12:** Ajuste de presión en el montaje.







146 "Análisis experimental del efecto del proceso de reperfilado sobre el desgaste y fatiga por contacto de rodadura de riel en el sistema rueda-riel en el Metro de Medellín"

---

**Elementos para sujeción y toma de medidas:**

- 2 Prisioneros de 3/8" de longitud 1 1/2".
- 2 Tornillos de 5/16" de longitud 2 1/2".
- 3 Prisioneros de 3/8" de longitud 1/2".
- 1 Rodamiento rígido de bolas de una hilera 6204 ETN 9.
- Celda de Carga tipo "S" 2000 Lbs.
- Caja sumadora 4 celdas de Carga.
- Indicador Celda de carga.

# B. Anexo: Resultados Específicos

## B.1 Análisis estadístico de pruebas de perfilado

Tabla B-5-3: Datos tomados para el análisis estadístico.

#PROBETA	V	P	Roughness Parameters													ISO 13565 Parameters							Rmr				
			Ra µm	Rku µm	Rp µm	Rq µm	Rk µm	Rt µm	Rsm µm	Rpm µm	Rvm µm	Rz µm	RyIS µm	RzIS µm	Rmax µm	RHSC (0.000 µm)	Rpc (0.000 µm)	Rda deg	Rdq deg	RSm µm	Rk µm	Rpk µm		Rvk µm	M1 %	M2 %	
PR101	155.5	0.2	6.37	2.75	20.898	7.915	0.11	43.228	33.676	17.71	15.966	22.33	33.676	43.228	39.368	39.2	6.16	6.45	14.1562	18.0538	0.3015	21.506	17.388	4.661	10.1	85.9	0.45
PR102	155.5	0.2	6.357	2.765	21.412	7.912	0.121	43.64	33.445	17.856	15.966	22.232	33.445	43.644	39.681	39.604	5.57	5.87	14.0255	18.102	0.2991	20.132	18.557	8.224	11.42	85.9	0.35
PR103	155.5	0.2	6.815	2.738	22.026	8.553	-0.06	44.89	38.177	19.889	19.288	22.864	39.177	48.9	40.448	42.421	5.57	5.57	13.4004	17.4282	0.3902	27.259	14.632	9.956	12.34	89.13	0.34
PR104	155.5	0.2	6.434	2.477	19.973	7.914	-0.183	40.723	31.207	13.925	17.282	21.65	31.207	40.723	35.61	37.233	6.75	6.75	14.9508	18.8128	0.3467	22.827	14.409	21.988	8.8	86.78	0.29
PR105	155.5	0.2	5.975	3.375	22.711	7.794	-0.097	44.16	29.718	15.199	14.519	21.652	29.718	44.163	40.618	44.163	6.75	6.75	13.6264	17.5314	0.3107	19.611	16.122	12.276	14.93	85.86	0.58
PR201	566.6	0.2	6.259	2.427	24.848	10.058	0.197	46.274	43.206	23.128	20.078	21.425	43.206	46.274	43.668	45.628	4.69	4.69	15.4249	19.2775	0.3147	25.762	15.766	6.024	11.2	87.44	0.73
PR202	566.6	0.2	6.357	2.765	21.412	7.912	0.121	43.644	33.445	17.856	15.966	22.232	33.445	43.644	39.681	39.604	5.57	5.87	14.0255	18.102	0.2991	20.132	18.557	8.224	11.42	85.9	0.11
PR203	566.6	0.2	6.815	2.738	22.026	8.553	-0.06	44.89	38.177	19.889	19.288	22.864	39.177	48.9	40.448	42.421	5.57	5.57	13.4004	17.4282	0.3902	27.259	14.632	9.956	12.34	89.13	0.35
PR204	566.6	0.2	6.434	2.477	19.973	7.914	-0.183	40.723	31.207	13.925	17.282	21.65	31.207	40.723	35.61	37.233	6.75	6.75	14.9508	18.8128	0.3467	22.827	14.409	21.988	8.8	86.78	0.28
PR205	566.6	0.2	5.975	3.375	22.711	7.794	-0.097	44.16	29.718	15.199	14.519	21.652	29.718	44.163	40.618	44.163	6.75	6.75	13.6264	17.5314	0.3107	19.611	16.122	12.276	14.93	85.86	0.64
PR301	566.6	0.6	6.259	2.427	24.848	10.058	0.197	46.274	43.206	23.128	20.078	21.425	43.206	46.274	43.668	45.628	4.69	4.69	15.4249	19.2775	0.3147	25.762	15.766	6.024	11.2	87.44	0.73
PR302	566.6	0.6	6.357	2.765	21.412	7.912	0.121	43.644	33.445	17.856	15.966	22.232	33.445	43.644	39.681	39.604	5.57	5.87	14.0255	18.102	0.2991	20.132	18.557	8.224	11.42	85.9	0.11
PR303	566.6	0.6	6.815	2.738	22.026	8.553	-0.06	44.89	38.177	19.889	19.288	22.864	39.177	48.9	40.448	42.421	5.57	5.57	13.4004	17.4282	0.3902	27.259	14.632	9.956	12.34	89.13	0.35
PR304	566.6	0.6	6.434	2.477	19.973	7.914	-0.183	40.723	31.207	13.925	17.282	21.65	31.207	40.723	35.61	37.233	6.75	6.75	14.9508	18.8128	0.3467	22.827	14.409	21.988	8.8	86.78	0.28
PR305	566.6	0.6	5.975	3.375	22.711	7.794	-0.097	44.16	29.718	15.199	14.519	21.652	29.718	44.163	40.618	44.163	6.75	6.75	13.6264	17.5314	0.3107	19.611	16.122	12.276	14.93	85.86	0.64
PR401	566.6	0.6	7.552	2.473	25.788	9.384	0.067	45.171	38.736	20.798	17.938	19.883	38.736	45.171	41.097	44.119	7.63	7.63	14.4372	18.0201	0.331	17.797	14.6	4.751	13.13	86.5	0.23
PR402	566.6	0.6	6.259	2.427	24.848	10.058	0.197	46.274	43.206	23.128	20.078	21.425	43.206	46.274	43.668	45.628	4.69	4.69	15.4249	19.2775	0.3147	25.762	15.766	6.024	11.2	87.44	0.73
PR403	566.6	0.6	6.357	2.765	21.412	7.912	0.121	43.644	33.445	17.856	15.966	22.232	33.445	43.644	39.681	39.604	5.57	5.87	14.0255	18.102	0.2991	20.132	18.557	8.224	11.42	85.9	0.11
PR404	566.6	0.6	6.815	2.738	22.026	8.553	-0.06	44.89	38.177	19.889	19.288	22.864	39.177	48.9	40.448	42.421	5.57	5.57	13.4004	17.4282	0.3902	27.259	14.632	9.956	12.34	89.13	0.35
PR405	566.6	0.6	6.434	2.477	19.973	7.914	-0.183	40.723	31.207	13.925	17.282	21.65	31.207	40.723	35.61	37.233	6.75	6.75	14.9508	18.8128	0.3467	22.827	14.409	21.988	8.8	86.78	0.28
PR501	155.5	0.6	7.289	3.994	24.633	9.626	-0.724	54.242	38.411	15.837	22.574	32.809	38.411	54.242	53.136	54.242	5.87	5.16	13.211	16.8118	0.426	26.555	8.882	14.904	7.65	86.69	0.56
PR502	155.5	0.6	7.151	3.822	24.093	9.35	-0.376	54.204	40.11	20.374	19.736	34.19	40.11	58.283	49.052	57.816	4.99	5.28	14.1166	17.7469	0.4241	26.662	6.933	14.764	6.77	90.45	0.4
PR503	155.5	0.6	7.761	3.586	17.292	9.646	-0.748	49.28	32.917	13.955	19.322	31.984	32.917	49.276	46.72	46.727	4.99	4.99	13.1576	16.7806	0.3315	26.405	3.811	16.784	9.12	87.12	1.19
PR504	155.5	0.6	7.926	3.587	22.366	10.101	-0.689	55.21	41.148	18.168	22.979	32.839	41.148	55.205	51.159	55.205	4.99	4.99	13.8426	17.8165	0.314	26.294	12.379	12.289	8.21	90.9	0.28
PR505	155.5	0.6	7.283	2.895	20.122	8.865	-0.374	46.05	33.772	16.172	17.16	25.925	33.772	46.047	49.976	39.468	5.52	3.81	13.1639	16.7654	0.3378	30.788	7.429	11.547	6.31	88.04	0.38
PR601	566.6	0.6	6.259	2.427	24.848	10.058	0.197	46.274	43.206	23.128	20.078	21.425	43.206	46.274	43.668	45.628	4.69	4.69	15.4249	19.2775	0.3147	25.762	15.766	6.024	11.2	87.44	0.73
PR602	566.6	0.6	6.357	2.765	21.412	7.912	0.121	43.644	33.445	17.856	15.966	22.232	33.445	43.644	39.681	39.604	5.57	5.87	14.0255	18.102	0.2991	20.132	18.557	8.224	11.42	85.9	0.11
PR603	566.6	0.6	6.815	2.738	22.026	8.553	-0.06	44.89	38.177	19.889	19.288	22.864	39.177	48.9	40.448	42.421	5.57	5.57	13.4004	17.4282	0.3902	27.259	14.632	9.956	12.34	89.13	0.35
PR604	566.6	0.6	6.434	2.477	19.973	7.914	-0.183	40.723	31.207	13.925	17.282	21.65	31.207	40.723	35.61	37.233	6.75	6.75	14.9508	18.8128	0.3467	22.827	14.409	21.988	8.8	86.78	0.28
PR605	566.6	0.6	5.975	3.375	22.711	7.794	-0.097	44.16	29.718	15.199	14.519	21.652	29.718	44.163	40.618	44.163	6.75	6.75	13.6264	17.5314	0.3107	19.611	16.122	12.276	14.93	85.86	0.64
PR701	566.6	0.6	7.552	2.473	25.788	9.384	0.067	45.171	38.736	20.798	17.938	19.883	38.736	45.171	41.097	44.119	7.63	7.63	14.4372	18.0201	0.331	17.797	14.6	4.751	13.13	86.5	0.23
PR702	566.6	0.6	6.259	2.427	24.848	10.058	0.197	46.274	43.206	23.128	20.078	21.425	43.206	46.274	43.668	45.628	4.69	4.69	15.4249	19.2775	0.3147	25.762	15.766	6.024	11.2	87.44	0.73
PR703	566.6	0.6	6.357	2.765	21.412	7.912	0.121	43.644	33.445	17.856	15.966	22.232	33.445	43.644	39.681	39.604	5.57	5.87	14.0255	18.102	0.2991	20.132	18.557	8.224	11.42	85.9	0.11
PR704	566.6	0.6	6.815	2.738	22.026	8.553	-0.06	44.89	38.177	19.889	19.288	22.864	39.177	48.9	40.448	42.421	5.57	5.57	13.4004	17.4282	0.3902	27.259	14.632	9.956	12.34	89.13	0.35
PR705	566.6	0.6	6.434	2.477	19.973	7.914	-0.183	40.723	31.207	13.925	17.282	21.65	31.207	40.723	35.61	37.233	6.75	6.75	14.9508	18.8128	0.3467	22.827	14.409	21.988	8.8	86.78	0.28
PR801	566.6	0.6	7.552	2.473	25.788	9.384	0.067	45.171	38.736	20.798	17.938	19.883	38.736	45.171	41.097	44.119	7.63	7.63	14.4372	18.0201	0.331	17.797	14.6	4.751	13.13	86.5	0.23
PR802	566.6	0.6	6.259	2.427	24.848	10.058	0.197	46.274	43.206	23.128	20.078	21.425	43.206	46.274	43.668												

### B.1.1. Procedimiento GLM

Información de nivel de clase

Clase	Niveles	Valores
V	2	155.5 566.6
P	2	0.2 0.6

Número de observaciones leídas	80
Número de observaciones usadas	80

Variable dependiente: Ra Ra

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	1.06988144	0.35662715	0.42	0.7422
Error	76	65.20360095	0.85794212		
Total corregido		79	66.27348239		
R-cuadrado	Coef Var	Raíz MSE	Ra Media		
0.016143	12.39582	0.926252	7.472288		

Fuente	DF	Cuadrado de Tipo III SS	la media	F-Valor	Pr > F
P	1	0.98679031	0.98679031	1.15	0.2869
V	1	0.03599761	0.03599761	0.04	0.8382
V*P	1	0.04709351	0.04709351	0.05	0.8154

Variable dependiente: Rku Rku

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	2.07875490	0.69291830	2.96	0.0373
Error	76	17.76281690	0.23372127		
Total corregido		79	19.84157180		
R-cuadrado	Coef Var	Raíz MSE	Rku Media		
0.104768	16.89755	0.483447	2.861050		

Fuente	DF	Cuadrado de Tipo III SS	la media	F-Valor	Pr > F
P	1	1.32458045	1.32458045	5.67	0.0198
V	1	0.29209445	0.29209445	1.25	0.2671
V*P	1	0.46208000	0.46208000	1.98	0.1638

**Variable dependiente: Rp Rp**

		Suma de	Cuadrado de		
Fuente	DF	cuadrados	la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	157.906412	52.635471	3.41	0.0216
Error		76	1171.453259	15.413859	
Total corregido			79	1329.359671	
R-cuadrado	Coef Var	Raíz MSE	Rp Media		
0.118784	16.17215	3.926049	24.27661		

		Cuadrado de			
Fuente	DF	Tipo III SS	la media	F-Valor	Pr > F
P	1	23.5892775	23.5892775	1.53	0.2199
V	1	103.7919446	103.7919446	6.73	0.0113
V*P	1	30.5251898	30.5251898	1.98	0.1634

**Variable dependiente: Rq Rq**

		Suma de	Cuadrado de		
Fuente	DF	cuadrados	la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	2.06153682	0.68717894	0.65	0.5878
Error		76	80.83590823	1.06363037	
Total corregido			79	82.89744506	
R-cuadrado	Coef Var	Raíz MSE	Rq Media		
0.024869	11.10383	1.031325	9.288009		

		Cuadrado de			
Fuente	DF	Tipo III SS	la media	F-Valor	Pr > F
P	1	0.97091719	0.97091719	0.91	0.3424
V	1	1.01356903	1.01356903	0.95	0.3321
V*P	1	0.07705059	0.07705059	0.07	0.7885

**Variable dependiente: Rsk Rsk**

		Suma de	Cuadrado de		
Fuente	DF	cuadrados	la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	0.83000523	0.27666841	4.14	0.0089
Error		76	5.07379724	0.06676049	
Total corregido			79	5.90380247	
R-cuadrado	Coef Var	Raíz MSE	Rsk Media		
0.140588	-440.4057	0.258381	-0.058669		

		Cuadrado de			
Fuente	DF	Tipo III SS	la media	F-Valor	Pr > F
P	1	0.22023758	0.22023758	3.30	0.0733
V	1	0.48867195	0.48867195	7.32	0.0084
V*P	1	0.12109570	0.12109570	1.81	0.1820

150 “Análisis experimental del efecto del proceso de reperfilado sobre el desgaste y fatiga por contacto de rodadura de riel en el sistema rueda-riel en el Metro de Medellín”

---

**Variable dependiente: Rt Rt**

		Suma de		Cuadrado de	
Fuente	DF	cuadrados	la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	59.522737	19.840912	0.46	0.7106
Error		76	3273.707458	43.075098	
Total corregido			79	3333.230195	
R-cuadrado	Coef Var	Raíz MSE	Rt Media		
0.017857	13.39135	6.563162	49.01045		

		Cuadrado de			
Fuente	DF	Tipo III SS	la media	F-Valor	Pr > F
P	1	4.51998435	4.51998435	0.10	0.7469
V	1	53.74567998	53.74567998	1.25	0.2675
V*P	1	1.25707248	1.25707248	0.03	0.8648

**Variable dependiente: Rv Rv**

		Suma de		Cuadrado de	
Fuente	DF	cuadrados	la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	333.750896	111.250299	5.19	0.0026
Error		76	1629.197154	21.436805	
Total corregido			79	1962.948051	
R-cuadrado	Coef Var	Raíz MSE	Rv Media		
0.170025	18.71927	4.629990	24.73381		

		Cuadrado de			
Fuente	DF	Tipo III SS	la media	F-Valor	Pr > F
P	1	7.4571052	7.4571052	0.35	0.5571
V	1	306.9018478	306.9018478	14.32	0.0003
V*P	1	19.3919433	19.3919433	0.90	0.3446

**Variable dependiente: Rpc Rpc**

		Suma de		Cuadrado de	
Fuente	DF	cuadrados	la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	13.8811696	4.6270565	2.63	0.0564
Error		76	133.8863459	1.7616624	
Total corregido			79	147.7675155	
R-cuadrado	Coef Var	Raíz MSE	Rpc Media		
0.093939	23.41663	1.327276	5.668094		

		Cuadrado de			
Fuente	DF	Tipo III SS	la media	F-Valor	Pr > F

P	1	0.28470945	0.28470945	0.16	0.6888
V	1	12.98264695	12.98264695	7.37	0.0082
V*P	1	0.61381320	0.61381320	0.35	0.5568

**Variable dependiente: RSm RSm**

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	0.03569954	0.01189985	2.40	0.0741
Error	76	0.37637517	0.00495230		
Total corregido		79	0.41207471		
R-cuadrado	Coef Var	Raíz MSE	RSm Media		
0.086634	18.58458	0.070373	0.378661		

Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
P	1	0.00955501	0.00955501	1.93	0.1689
V	1	0.02554338	0.02554338	5.16	0.0260
V*P	1	0.00060116	0.00060116	0.12	0.7285

**Variable dependiente: Rk Rk**

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	908.714311	302.904770	13.59	<.0001
Error	76	1693.641634	22.284758		
Total corregido		79	2602.355945		
R-cuadrado	Coef Var	Raíz MSE	Rk Media		
0.349189	19.96424	4.720674	23.64564		

Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
P	1	48.9039357	48.9039357	2.19	0.1426
V	1	426.5392613	426.5392613	19.14	<.0001
V*P	1	433.2711144	433.2711144	19.44	<.0001

**Variable dependiente: Rpk Rpk**

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	390.022980	130.007660	6.30	0.0007
Error	76	1568.768501	20.641691		
Total corregido		79	1958.791481		
R-cuadrado	Coef Var	Raíz MSE	Rpk Media		
0.199114	40.76870	4.543313	11.14412		

152 “Análisis experimental del efecto del proceso de reperfilado sobre el desgaste y fatiga por contacto de rodadura de riel en el sistema rueda-riel en el Metro de Medellín”

---

Cuadrado de					
Fuente	DF	Tipo III SS	la media	F-Valor	Pr > F
P	1	34.1408048	34.1408048	1.65	0.2023
V	1	302.3367120	302.3367120	14.65	0.0003
V*P	1	53.5454631	53.5454631	2.59	0.1114

Variable dependiente: Rvk Rvk

Suma de Cuadrado de					
Fuente	DF	cuadrados	la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	92.319867	30.773289	1.53	0.2130
Error	76	1526.267540	20.082468		
Total corregido		79	1618.587407		
R-cuadrado	Coef Var	Raíz MSE	Rvk Media		
0.057037	40.57187	4.481347	11.04545		

Cuadrado de					
Fuente	DF	Tipo III SS	la media	F-Valor	Pr > F
P	1	4.62902393	4.62902393	0.23	0.6325
V	1	46.61282279	46.61282279	2.32	0.1318
V*P	1	41.07802016	41.07802016	2.05	0.1568

Variable dependiente: Mr1 Mr1

Suma de Cuadrado de					
Fuente	DF	cuadrados	la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	84.3033738	28.1011246	3.01	0.0352
Error	76	708.9552250	9.3283582		
Total corregido		79	793.2585988		
R-cuadrado	Coef Var	Raíz MSE	Mr1 Media		
0.106275	31.67925	3.054236	9.641125		

Cuadrado de					
Fuente	DF	Tipo III SS	la media	F-Valor	Pr > F
P	1	0.54946125	0.54946125	0.06	0.8089
V	1	80.42055125	80.42055125	8.62	0.0044
V*P	1	3.33336125	3.33336125	0.36	0.5518

Variable dependiente: Mr2 Mr2

Suma de Cuadrado de					
Fuente	DF	cuadrados	la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	775.186773	258.395591	21.44	<.0001
Error	76	915.776374	12.049689		



Total corregido	79	1690.963147
R-cuadrado	Coef Var	Raíz MSE Mr2 Media
0.458429	4.032947	3.471266 86.07269

Cuadrado de					
Fuente	DF	Tipo III SS	la media	F-Valor	Pr > F
P	1	12.3205753	12.3205753	1.02	0.3151
V	1	672.7130028	672.7130028	55.83	<.0001
V*P	1	90.1531953	90.1531953	7.48	0.0078

Variable dependiente: **Rmr Rmr**

Suma de Cuadrado de					
Fuente	DF	cuadrados	la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	0.86679844	0.28893281	3.39	0.0221
Error	76	6.47113875	0.08514656		
Total corregido		79	7.33793719		
R-cuadrado	Coef Var	Raíz MSE	Rmr Media		
0.118126	57.93252	0.291799	0.503688		

Cuadrado de					
Fuente	DF	Tipo III SS	la media	F-Valor	Pr > F
P	1	0.14492531	0.14492531	1.70	0.1960
V	1	0.33475781	0.33475781	3.93	0.0510
V*P	1	0.38711531	0.38711531	4.55	0.0362

#### Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD)

NOTA: Este test controla el índice de error experimentwise de tipo I, pero normalmente tiene un índice de error de tipo II más elevado que REGWQ.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	76

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

#### Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para Ra

Error de cuadrado medio	0.857942
Valor crítico del rango estudentizado	2.81665
Diferencia significativa mínima	0.4125
Tukey Agrupamiento	Media N P
A	7.5834 40 0.2
	A
A	7.3612 40 0.6

#### Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para Rku

Error de cuadrado medio	0.233721
Valor crítico del rango estudentizado	2.81665

154 “Análisis experimental del efecto del proceso de reperfilado sobre el desgaste y fatiga por contacto de rodadura de riel en el sistema rueda-riel en el Metro de Medellín”

---

Diferencia significativa mínima	0.2153
Tukey Agrupamiento	Media N P
A	2.9897 40 0.6
B	2.7324 40 0.2

**Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para Rp**

Error de cuadrado medio	15.41386
Valor crítico del rango estudentizado	2.81665
Diferencia significativa mínima	1.7485
Tukey Agrupamiento	Media N P
A	24.8196 40 0.2
A	
A	23.7336 40 0.6

**Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para Rq**

Error de cuadrado medio	1.06363
Valor crítico del rango estudentizado	2.81665
Diferencia significativa mínima	0.4593
Tukey Agrupamiento	Media N P
A	9.3982 40 0.2
A	
A	9.1778 40 0.6

**Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para Rsk**

Error de cuadrado medio	0.06676
Valor crítico del rango estudentizado	2.81665
Diferencia significativa mínima	0.1151
Tukey Agrupamiento	Media N P
A	-0.00620 40 0.2
A	
A	-0.11114 40 0.6

**Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para Rt**

Error de cuadrado medio	43.0751
Valor crítico del rango estudentizado	2.81665
Diferencia significativa mínima	2.9229
Tukey Agrupamiento	Media N P
A	49.248 40 0.2
A	
A	48.773 40 0.6

**Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para Rv**

Error de cuadrado medio	21.4368
Valor crítico del rango estudentizado	2.81665

Diferencia significativa mínima				2.062
Tukey Agrupamiento	Media	N	P	
A	25.039	40	0.6	
	A			
A	24.429	40	0.2	

**Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para Rpc**

Error de cuadrado medio				1.761662
Valor crítico del rango estudentizado				2.81665
Diferencia significativa mínima				0.5911
Tukey Agrupamiento	Media	N	P	
A	5.7278	40	0.2	
	A			
A	5.6084	40	0.6	

**Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para RSm**

Error de cuadrado medio				0.004952
Valor crítico del rango estudentizado				2.81665
Diferencia significativa mínima				0.0313
Tukey Agrupamiento	Media	N	P	
A	0.38959	40	0.6	
	A			
A	0.36773	40	0.2	

**Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para Rk**

Error de cuadrado medio				22.28476
Valor crítico del rango estudentizado				2.81665
Diferencia significativa mínima				2.1024
Tukey Agrupamiento	Media	N	P	
A	24.428	40	0.2	
	A			
A	22.864	40	0.6	

**Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para Rpk**

Error de cuadrado medio				20.64169
Valor crítico del rango estudentizado				2.81665
Diferencia significativa mínima				2.0234
Tukey Agrupamiento	Media	N	P	
A	11.797	40	0.6	
	A			
A	10.491	40	0.2	

**Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para Rvk**

Error de cuadrado medio				20.08247
Valor crítico del rango estudentizado				2.81665
Diferencia significativa mínima				1.9958

156 “Análisis experimental del efecto del proceso de reperfilado sobre el desgaste y fatiga por contacto de rodadura de riel en el sistema rueda-riel en el Metro de Medellín”

---

Tukey Agrupamiento	Media	N	P
A	11.286	40	0.2
A			
A	10.805	40	0.6

**Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para Mr1**

Error de cuadrado medio	9.328358		
Valor crítico del rango estudentizado	2.81665		
Diferencia significativa mínima	1.3602		
Tukey Agrupamiento	Media	N	P
A	9.7240	40	0.2
A			
A	9.5583	40	0.6

**Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para Mr2**

Error de cuadrado medio	12.04969		
Valor crítico del rango estudentizado	2.81665		
Diferencia significativa mínima	1.5459		
Tukey Agrupamiento	Media	N	P
A	86.4651	40	0.6
A			
A	85.6803	40	0.2

**Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para Rmr**

Error de cuadrado medio	0.085147		
Valor crítico del rango estudentizado	2.81665		
Diferencia significativa mínima	0.13		
Tukey Agrupamiento	Media	N	P
A	0.54625	40	0.2
A			
A	0.46112	40	0.6

**Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para Ra**

Error de cuadrado medio	0.857942		
Valor crítico del rango estudentizado	2.81665		
Diferencia significativa mínima	0.4125		
Tukey Agrupamiento	Media	N	V
A	7.4935	40	566.6
A			
A	7.4511	40	155.5

**Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para Rku**

Error de cuadrado medio	0.233721
Valor crítico del rango estudentizado	2.81665

Diferencia significativa mínima				0.2153
Tukey Agrupamiento	Media	N	V	
A	2.9215	40	155.5	
	A			
A	2.8006	40	566.6	

**Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para Rp**

Error de cuadrado medio				15.41386
Valor crítico del rango estudentizado				2.81665
Diferencia significativa mínima				1.7485
Tukey Agrupamiento	Media	N	V	
A	25.4156	40	566.6	
B	23.1376	40	155.5	

**Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para Rq**

Error de cuadrado medio				1.06363
Valor crítico del rango estudentizado				2.81665
Diferencia significativa mínima				0.4593
Tukey Agrupamiento	Media	N	V	
A	9.4006	40	566.6	
	A			
A	9.1755	40	155.5	

**Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para Rsk**

Error de cuadrado medio				0.06676
Valor crítico del rango estudentizado				2.81665
Diferencia significativa mínima				0.1151
Tukey Agrupamiento	Media	N	V	
A	0.01949	40	566.6	
B	-0.13683	40	155.5	

**Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para Rt**

Error de cuadrado medio				43.0751
Valor crítico del rango estudentizado				2.81665
Diferencia significativa mínima				2.9229
Tukey Agrupamiento	Media	N	V	
A	49.830	40	155.5	
	A			
A	48.191	40	566.6	

**Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para Rv**

Error de cuadrado medio				21.4368
Valor crítico del rango estudentizado				2.81665
Diferencia significativa mínima				2.062
Tukey Agrupamiento	Media	N	V	
A	26.692	40	155.5	
B	22.775	40	566.6	

158 “Análisis experimental del efecto del proceso de reperfilado sobre el desgaste y fatiga por contacto de rodadura de riel en el sistema rueda-riel en el Metro de Medellín”

---

**Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para R<sub>pc</sub>**

Error de cuadrado medio	1.761662
Valor crítico del rango estudentizado	2.81665
Diferencia significativa mínima	0.5911
Tukey Agrupamiento	Media N V
A	6.0709 40 566.6
B	5.2653 40 155.5

**Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para R<sub>Sm</sub>**

Error de cuadrado medio	0.004952
Valor crítico del rango estudentizado	2.81665
Diferencia significativa mínima	0.0313
Tukey Agrupamiento	Media N V
A	0.39653 40 155.5
B	0.36079 40 566.6

**Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para R<sub>k</sub>**

Error de cuadrado medio	22.28476
Valor crítico del rango estudentizado	2.81665
Diferencia significativa mínima	2.1024
Tukey Agrupamiento	Media N V
A	25.955 40 155.5
B	21.337 40 566.6

**Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para R<sub>pk</sub>**

Error de cuadrado medio	20.64169
Valor crítico del rango estudentizado	2.81665
Diferencia significativa mínima	2.0234
Tukey Agrupamiento	Media N V
A	13.088 40 566.6
B	9.200 40 155.5

**Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para R<sub>vk</sub>**

Error de cuadrado medio	20.08247
Valor crítico del rango estudentizado	2.81665
Diferencia significativa mínima	1.9958
Tukey Agrupamiento	Media N V
A	11.809 40 155.5
A	
A	10.282 40 566.6

**Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para Mr<sub>1</sub>**

Error de cuadrado medio	9.328358
-------------------------	----------

Valor crítico del rango estudentizado	2.81665
Diferencia significativa mínima	1.3602
Tukey Agrupamiento	Media N V
A	10.6438 40 566.6
B	8.6385 40 155.5

#### Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para Mr2

Error de cuadrado medio	12.04969
Valor crítico del rango estudentizado	2.81665
Diferencia significativa mínima	1.5459
Tukey Agrupamiento	Media N V
A	88.9725 40 155.5
B	83.1729 40 566.6

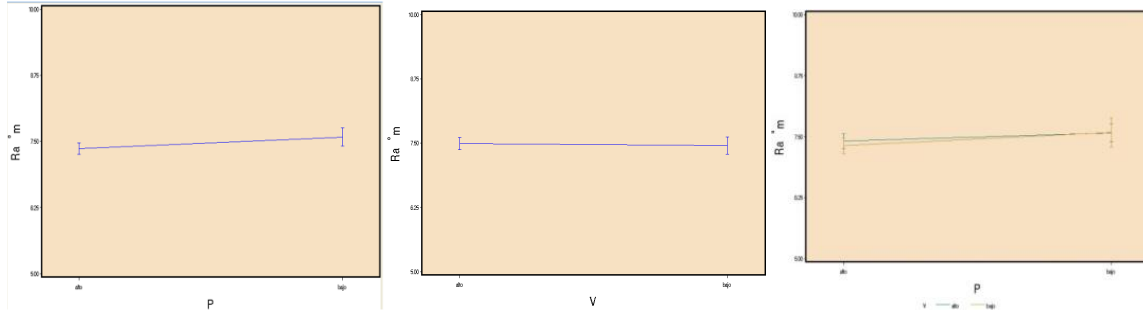
#### Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para Rmr

Error de cuadrado medio	0.085147
Valor crítico del rango estudentizado	2.81665
Diferencia significativa mínima	0.13
Tukey Agrupamiento	Media N V
A	0.56837 40 566.6
	A
A	0.43900 40 155.5

### B.1.2 Efectos principales de los factores velocidad y presión, y la interacción de los factores principales en las variables respuesta

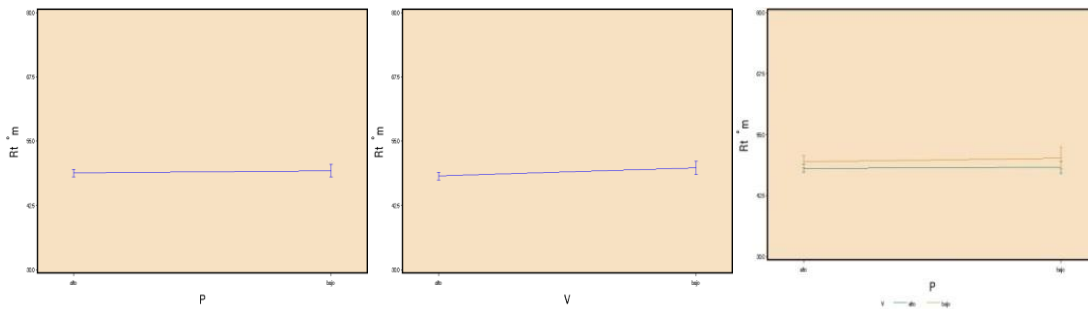
**Ra:** El efecto del factor principal de presión es mayor que el de la velocidad, y la interacción Ra para presiones altas cambia muy poco con respecto a la velocidad, para presiones bajas no cambia con respecto a la velocidad, siendo un poco mayor la respuesta Ra cuando la presión es baja, con ello se puede decir que, el valor de Ra no depende ni de la presión ni de la velocidad sino del tamaño de grano de la piedra, como se evidencio en el experimento, ya que el cambio en los efectos principales y las interacciones no es significativo.

**Figura B-5-15:** Ra: efectos principales P y V, interacción PV.



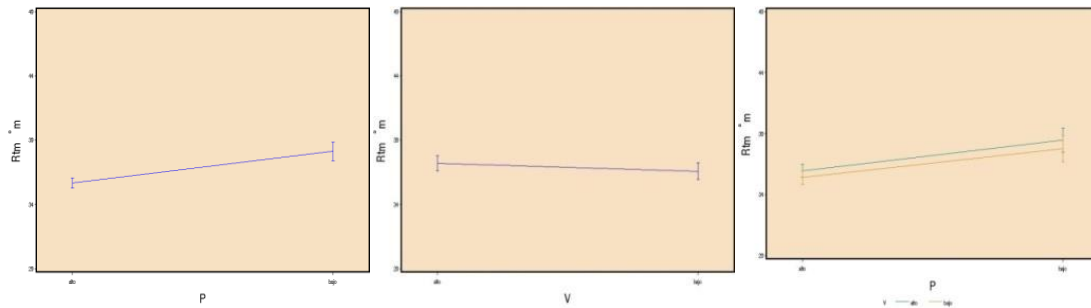
**Rt:** El efecto del factor principal del factor de velocidad es mayor que el de presión, y la interacción de los factores principales no tiene efecto significativo en Rt, ya que el efecto de la presión no depende del nivel donde esté la velocidad y viceversa, aunque no es significativo estadísticamente se puede apreciar que es un poco mayor la variable respuesta Rt cuando la velocidad es baja pero no hay interacción de los factores principales. Esto nos dice que el valor de Rt no depende ni de la presión ni de la velocidad sino del tamaño de grano de la piedra, como se evidencio en el experimento, ya que el cambio en los efectos principales y las interacciones no es significativo.

**Figura B-5-16:** Rtm: efectos principales P y V, interacción PV.

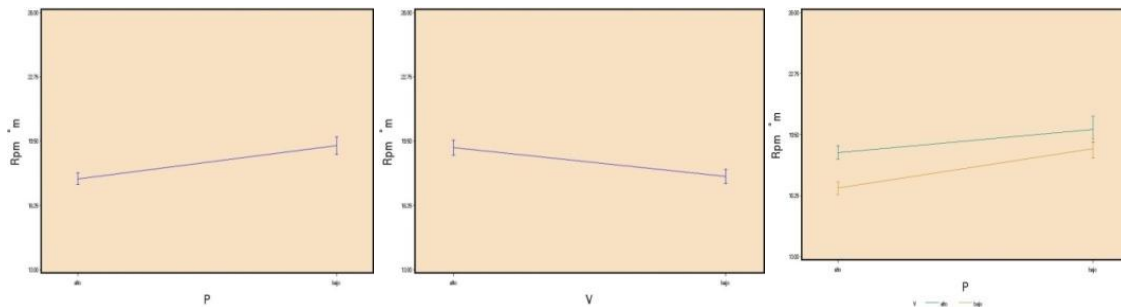


**Rtm:** El efecto del factor principal de velocidad es igual que el de presión pero en sentido contrario, debido a que cuando la presión es alta la respuesta Rtm es menor y cuando la presión es baja el Rtm es mayor, al contrario de cuando la velocidad es alta el Rtm es alto y cuando es la velocidad es baja Rtm es bajo; la interacción entre factores no es significativa para Rtm, ya que el efecto de la presión no depende del nivel donde esté la velocidad y viceversa, aunque no es significativo estadísticamente se puede apreciar que los valores de Rtm dependen del factor de presión y no de la velocidad.



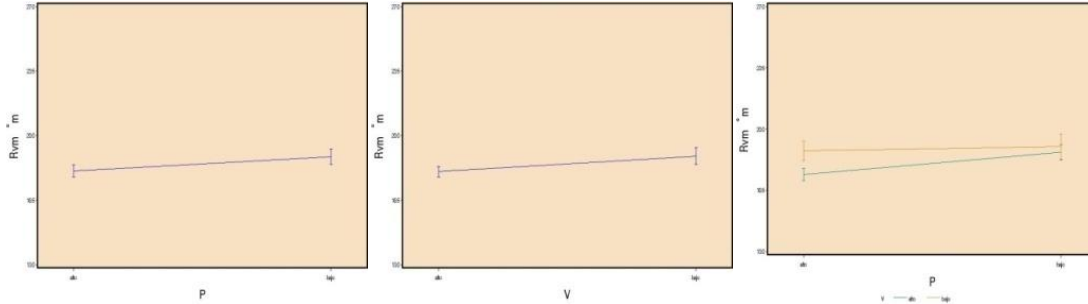
**Figura B-5-17:** R<sub>tm</sub> : efectos principales P y V, interacción PV.

**R<sub>pm</sub>:** El efecto del factor principal velocidad es igual que el de presión pero en sentido contrario, cuando la presión es alta la respuesta R<sub>pm</sub> es menor y cuando la presión es baja el R<sub>pm</sub> es mayor, al contrario de cuando la velocidad es alta el R<sub>pm</sub> es alto y cuando es la velocidad es baja R<sub>pm</sub> es bajo; la interacción no tiene efecto en R<sub>pm</sub>, ya que el efecto de la presión no depende del nivel donde esté la velocidad y viceversa, aunque no es significativo estadísticamente se puede apreciar que los valores de R<sub>pm</sub> dependen del factor de presión y no de la velocidad, cuando la presión es baja se dan valores más cercanos de R<sub>pm</sub>, sin importar el nivel del factor principal de la velocidad.

**Figura B-5-18:** R<sub>vm</sub>: efectos principales P y V, interacción PV.

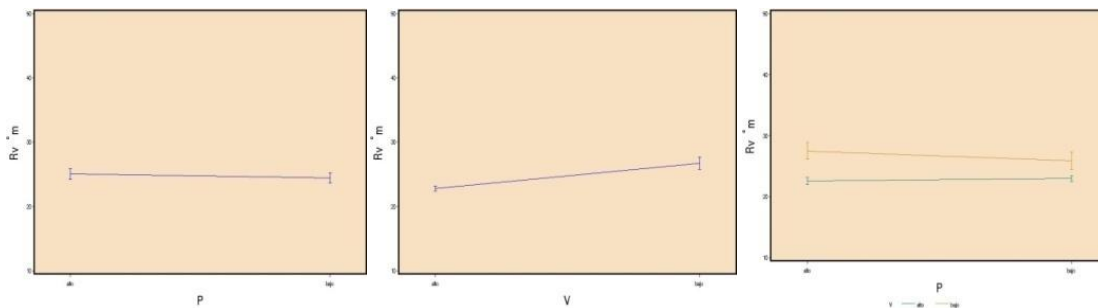
**R<sub>vm</sub>:** El efecto del factor principal de la velocidad es igual que el de presión, cuando la presión es alta la respuesta R<sub>vm</sub> es mayor y cuando la presión es baja el R<sub>vm</sub> es menor, al igual que cuando la velocidad es alta el R<sub>vm</sub> es alto y cuando es la velocidad es baja R<sub>vm</sub> es bajo; no hay efectos de la interacción de los factores principales en la respuesta R<sub>vm</sub>, ya que el efecto de la presión no depende del nivel donde esté la velocidad y viceversa. Concluyendo que el valor de R<sub>vm</sub> no depende ni de la presión ni de la velocidad sino del tamaño de grano de la piedra, como se evidencio en el experimento, ya que el cambio en los efectos principales y las interacciones no es significativo.

**Figura B-5-19:** Rvm: efectos principales P y V, interacción PV.



**Rv:** El efecto del factor principal de velocidad es igual que el de presión pero en sentido contrario, aunque el efecto principal de la velocidad es mucho mayor sobre la variable respuesta, es decir, cuando la presión es alta la respuesta Rv es mayor y cuando la presión es baja el Rv es menor, aunque este cambio de valores en la respuesta no es significativo; al contrario de cuando la velocidad es alta el Rv es bajo y cuando es la velocidad es baja Rpm es alto; no hay interacción de los factores principales para Rv, ya que el efecto de la presión no depende del nivel donde esté la velocidad y viceversa, aunque no es significativo estadísticamente se puede apreciar que los valores de Rv dependen un poco del factor de la velocidad, cuando la presión es alta cambia un poco los valores de la variable respuesta al variar la velocidad.

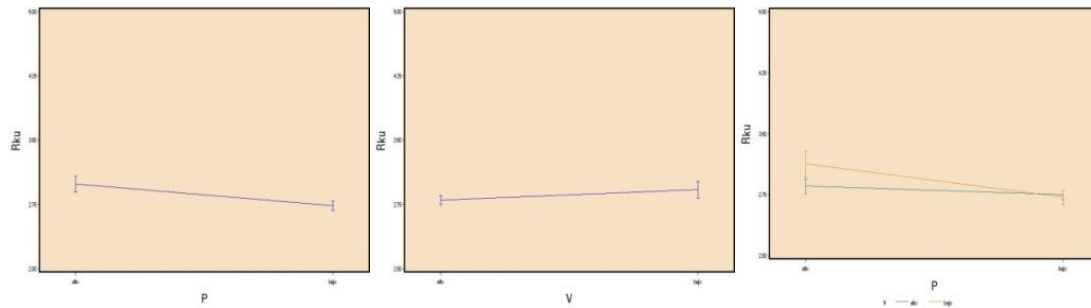
**Figura B-5-20:** Rv: efectos principales P y V, interacción PV.



**Rku:** El efecto del factor principal velocidad es igual que el de presión pero en sentido contrario, aunque el efecto principal de la velocidad es mucho menor sobre la variable respuesta, es decir cuando la presión es alta la respuesta Rku es mayor y cuando la presión es baja el Rku es menor; al contrario de cuando la velocidad es alta el Rku es bajo y cuando es la velocidad es baja Rku es alto, aunque este cambio de valores no es significativo, se vuelve significativo debido a que al interactuar los factores principales

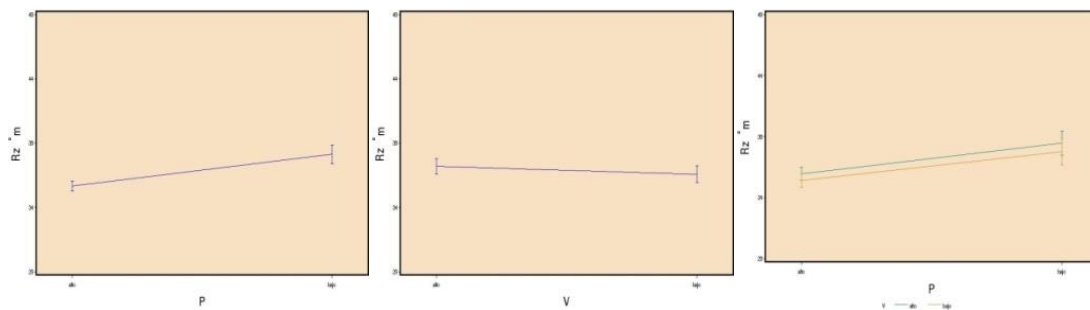
hay un cambio significativo en la variable respuesta Rku, ya que el efecto de la presión cuando es alta depende del nivel donde esté la velocidad, aunque no es significativo estadísticamente se puede apreciar que cambia un poco los valores de la variable respuesta al variar la velocidad, pero cuando la presión es baja la respuesta es la misma.

**Figura B-5-21:** Rku: efectos principales P y V, interacción PV.



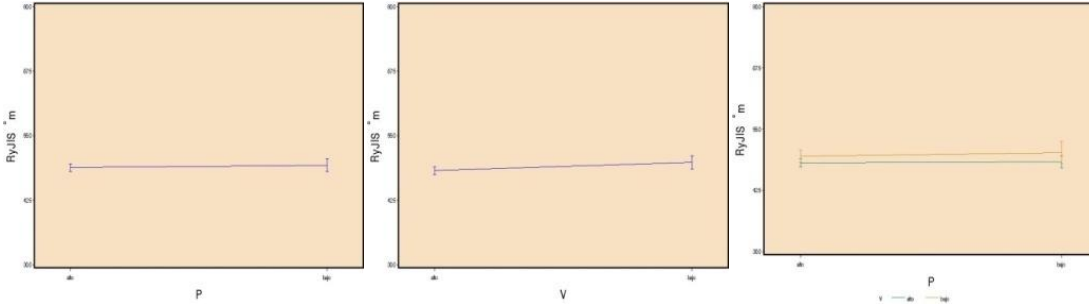
**Rz:** El efecto del factor principal de velocidad es igual que el de presión pero en sentido contrario, cuando la presión es alta la respuesta Rz es menor y cuando la presión es baja el Rz es mayor, al contrario de cuando la velocidad es alta el Rz es alto y cuando es la velocidad es baja Rz es bajo; no hay interacción de los factores principales para Rz, ya que el efecto de la presión no depende del nivel donde esté la velocidad y viceversa, aunque no es significativo estadísticamente se puede apreciar que los valores de Rz dependen del factor de presión y no de la velocidad.

**Figura B-5-22:** Rz: efectos principales P y V, interacción PV.



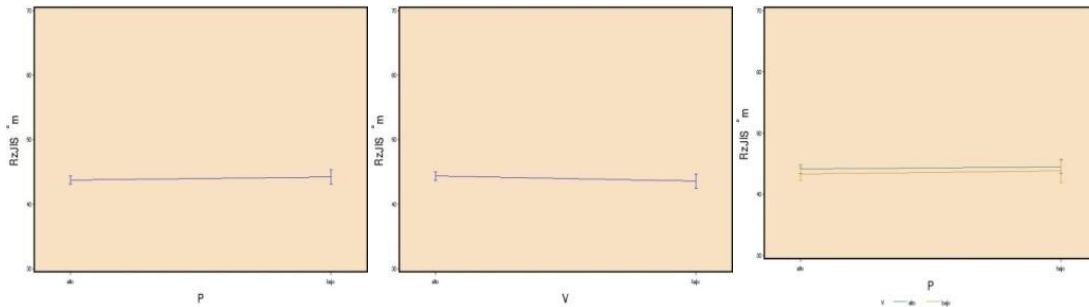
**RyJS:** Los efectos de los factores principales velocidad y presión al igual que la interacción no son significativos, por lo tanto no hay un cambio en la variables respuesta al exponerlos a diferentes niveles de velocidad y presión.

**Figura B-5-23:** RyJS efectos principales P y V, interacción PV.



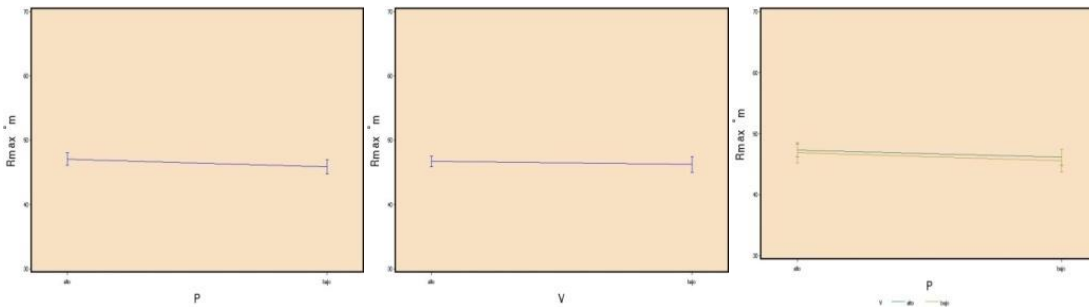
**RzJS:** Los efectos de los factores principales velocidad y presión al igual que la interacción no son significativos, por lo tanto no hay un cambio en la variables respuesta al exponerlos a diferentes niveles de velocidad y presión.

**Figura B-5-24:** RzJS efectos principales P y V, interacción PV.



**Rmax:** Los efectos de los factores principales velocidad y presión al igual que la interacción no son significativos, por lo tanto no hay un cambio en la variables respuesta al exponerlos a diferentes niveles de velocidad y presión.

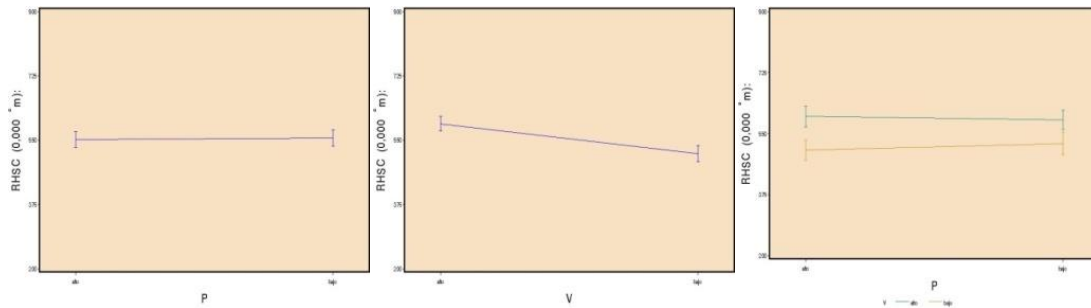
**Figura B-5-25:** Rmax efectos principales P y V, interacción PV.



**RHSC:** El efecto del factor principal velocidad es significativo, el de presión no es significativo al cambio de niveles alto y bajo, cuando la velocidad es alta el RHSC es alto

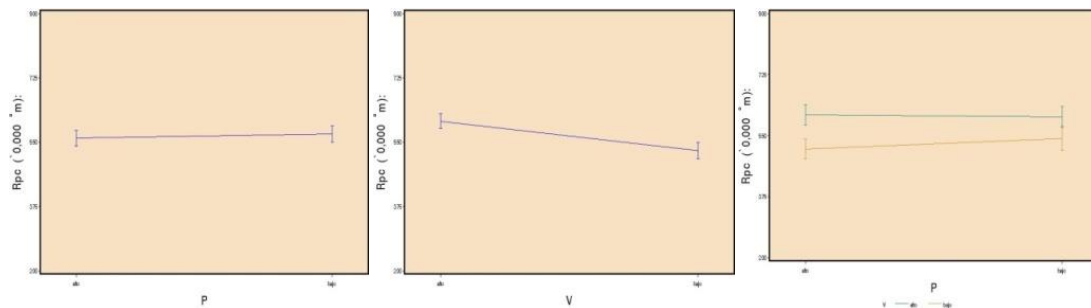
y cuando es la velocidad es baja RHSC es bajo; no hay interacción de los factores principales para RHSC, ya que el efecto de la velocidad no depende del nivel donde esté la presión, aunque no es significativo estadísticamente se puede apreciar que los valores de RHSC dependen del factor de velocidad y no de la presión.

**Figura B-5-26:** RHSC efectos principales P y V, interacción PV.



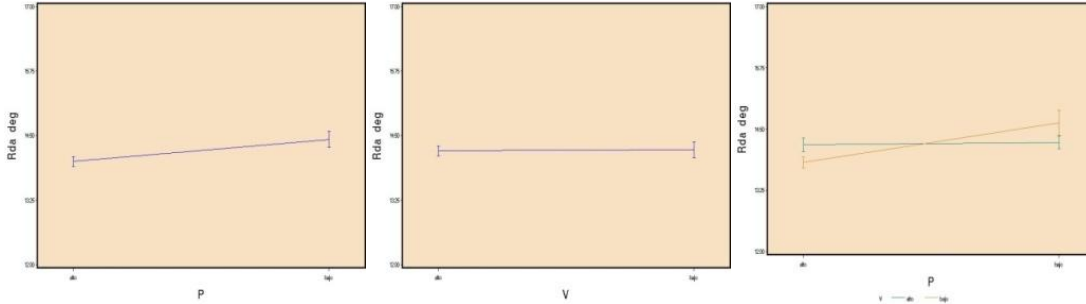
**Rpc:** El efecto del factor principal velocidad es significativo, el de presión no es significativo al cambio de niveles alto y bajo, cuando la velocidad es alta el Rpc es alto y cuando es la velocidad es baja Rpc es bajo; no hay interacción de los factores principales para Rpc, ya que el efecto de la velocidad no depende del nivel donde esté la presión, aunque no es significativo estadísticamente se puede apreciar que los valores de Rpc dependen del factor de velocidad y no de la presión.

**Figura B-5-27:** Rpc efectos principales P y V, interacción PV.



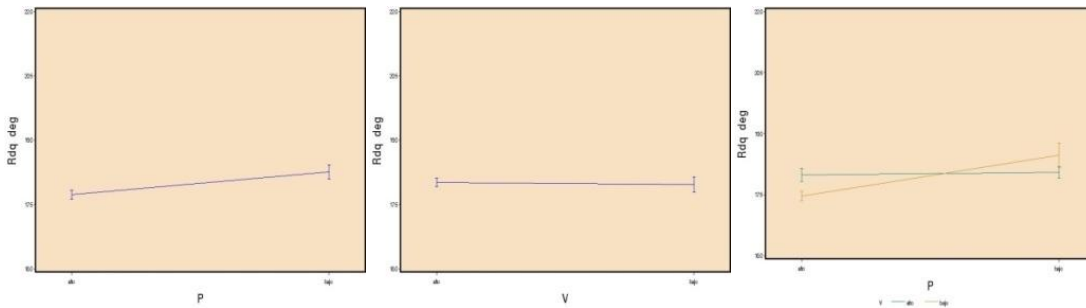
**Rda:** El efecto del factor principal presión es mayor que el de la velocidad, aunque en el factor de velocidad para los efectos principales no es significativo a cambio de nivel, cuando la presión es alta la respuesta Rda es menor y cuando la presión es baja el Rda es mayor, la interacción de los factores principales es significativo para Rda, cuando la presión es alta y la velocidad baja el Rda es menor que cuando se da la interacción con presión baja y velocidad baja aumenta el valor de Rda; cuando la velocidad es alta la respuesta es la misma.

**Figura B-5-28:** Rda: efectos principales P y V, interacción PV.

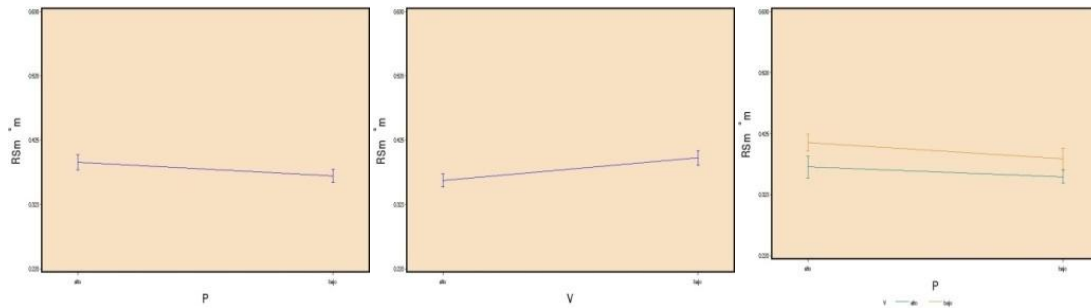


**Rdq:** El efecto del factor principal depresión es mayor que el de la velocidad, aunque en el factor de velocidad para los efectos principales no es significativo a cambio de nivel, cuando la presión es alta la respuesta Rdq es menor y cuando la presión es baja el Rdq es mayor, la interacción de los factores principales es significativo en la respuesta Rdq, cuando la presión es alta y la velocidad baja el Rda es menor que cuando se da la interacción con presión baja y velocidad baja aumenta el valor de Rdq; cuando la velocidad es alta la respuesta es la misma.

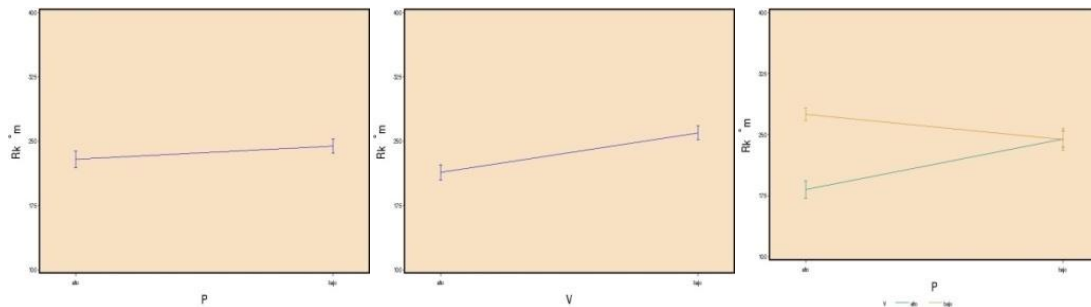
**Figura B-5-29:** Rdq: efectos principales P y V, interacción PV.



**RSm:** El efecto del factor principal velocidad es igual que el de presión pero en sentido contrario, cuando la presión es alta la respuesta RSm es mayor y cuando la presión es baja el Rsm es menor, al contrario de cuando la velocidad es alta el RSm es bajo y cuando es la velocidad es baja RSm es alto; la interacción de los factores principales no es significativo para RSm, ya que el efecto de la presión no depende del nivel donde esté la velocidad y viceversa, aunque no es significativo estadísticamente se puede apreciar que los valores de RSm dependen del factor de presión y no de la velocidad.

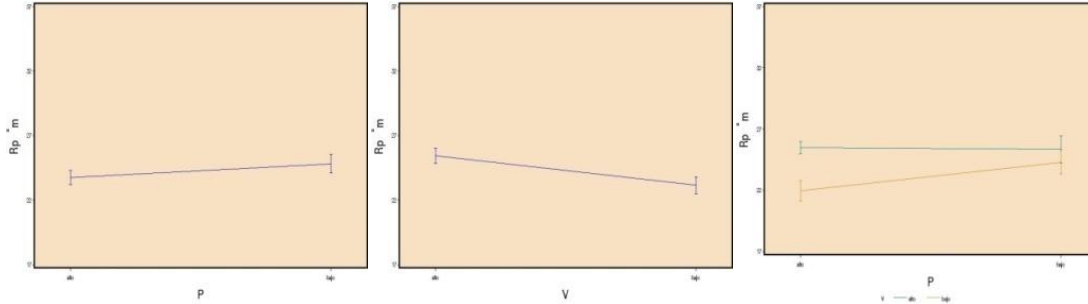
**Figura B-5-30:** RSm: efectos principales P y V, interacción PV.

**Rk:** El efecto del factor principal velocidad es igual que el de presión, cuando la presión es alta la respuesta Rk es menor y cuando la presión es baja el Rk es mayor, al igual de cuando la velocidad es alta el Rk es bajo y cuando es la velocidad es baja Rk es alto; la interacción de los factores principales es significativo para Rk, ya que el efecto de la no depende del nivel donde esté la presión sino de la velocidad cuando la presión es alta, cuando la presión es baja la respuesta es la misma.

**Figura B-5-31:** Rk efectos principales P y V, interacción PV.

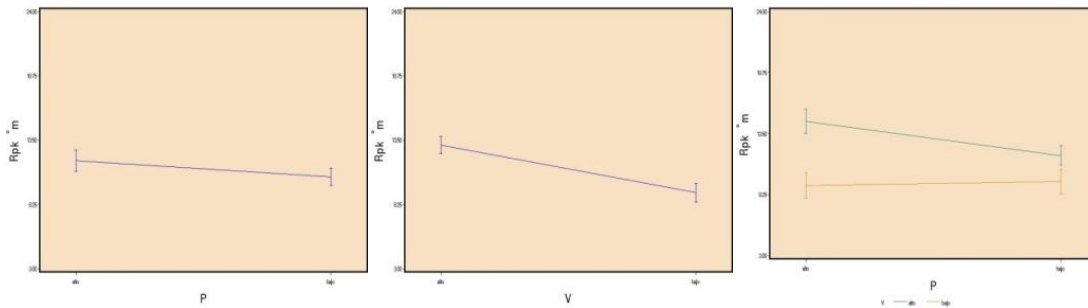
**Rp:** El efecto del factor principal velocidad es igual que el de presión pero en sentido contrario, cuando la presión es alta la respuesta Rp es menor y cuando la presión es baja el Rp es mayor, al contrario de cuando la velocidad es alta el Rp es alto y cuando es la velocidad es baja Rp es bajo; no hay interacción de los factores principales para Rp, ya que el efecto de la presión no depende del nivel donde esté la velocidad y viceversa, aunque no es significativo estadísticamente se puede apreciar que los valores de Rp dependen del factor de presión y no de la velocidad, aunque el Rp en la combinación con presión alta la velocidad baja da un menor valor y velocidad alta un valor mayor, pero si la presión es alta los valores tanto para velocidad alta y baja son muy cercanos.

**Figura B-5-32:** Rp: efectos principales P y V, interacción PV.



**Rpk:** El efecto del factor principal velocidad es significativo, el de presión no es significativo al cambio de niveles alto y bajo, cuando la velocidad es alta el Rpk es alto y cuando es la velocidad es baja Rpk es bajo; la interacción de los factores principales no es significativo para Rpk, ya que el efecto de la velocidad no depende del nivel donde esté la presión, aunque no es significativo estadísticamente se puede apreciar que los valores de Rpk dependen del factor de velocidad y no de la presión, en la presión alta el factor velocidad aumenta o disminuye la respuesta.

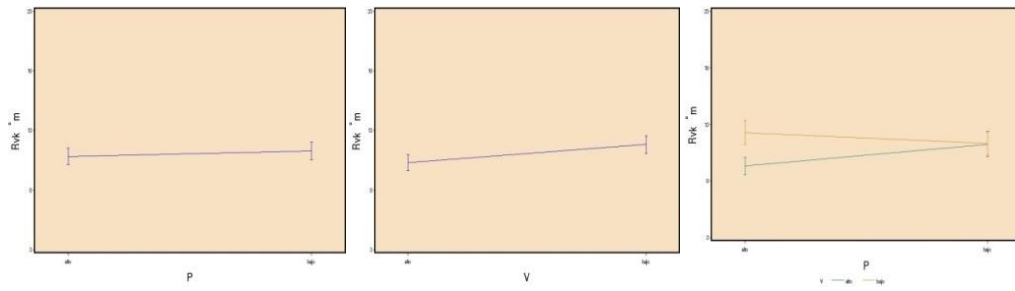
**Figura B-5-33:** Rpk: efectos principales P y V, interacción PV.



**Rvk:** El efecto del factor principal velocidad es significativo, el de presión no es significativo al cambio de niveles alto y bajo, cuando la velocidad es alta el Rvk es alto y cuando es la velocidad es baja Rvk es bajo; la interacción de los factores principales es significativo para Rvk, ya que el efecto de la velocidad no depende del nivel donde esté la presión, los valores de Rvk dependen del factor de velocidad y no de la presión, en la presión alta el factor velocidad aumenta o disminuye la respuesta, cuando la presión es baja el valor respuesta es igual tanto para velocidad alta y baja.

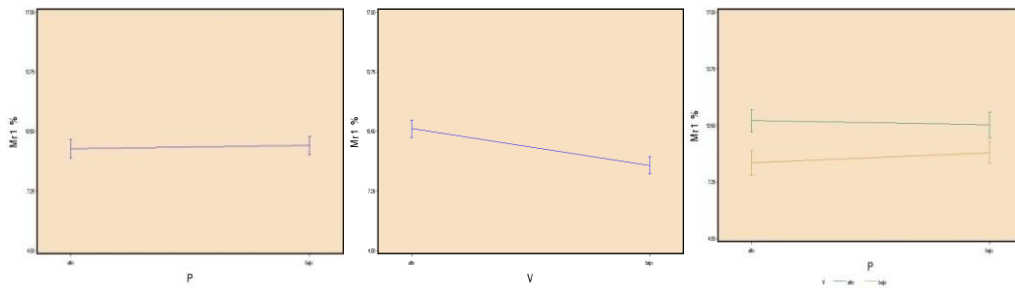


**Figura B-5-34:** Rvk: efectos principales P y V, interacción PV.



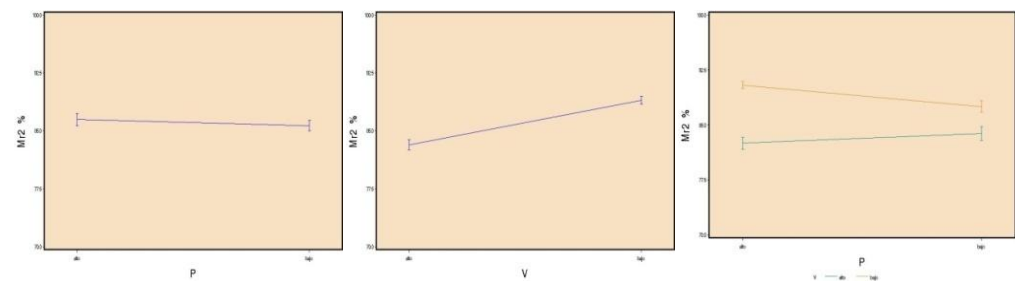
**Mr1%:** El efecto del factor principal velocidad es significativo, el de presión no es significativo al cambio de niveles alto y bajo, cuando la velocidad es alta el Mr1% es alto y cuando es la velocidad es baja Mr1% es bajo; la interacción de los factores principales no es significativo para Mr1%, ya que el efecto de la velocidad no depende del nivel donde esté la presión, aunque no es significativo estadísticamente se puede apreciar que los valores de Mr1% dependen del factor de velocidad y no de la presión.

**Figura B-5-35:** Mr1%: efectos principales P y V, interacción PV.



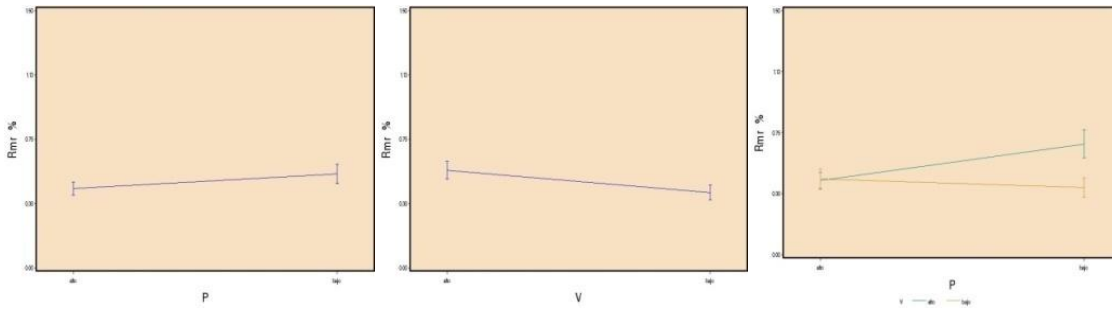
**Mr2%:** El efecto del factor principal velocidad es significativo, el de presión no es significativo al cambio de niveles alto y bajo, cuando la velocidad es alta el Mr2% es bajo y cuando es la velocidad es baja Mr2% es alto; la interacción de los factores principales no es significativo para Mr2%, ya que el efecto de la velocidad no depende del nivel donde esté la presión, aunque no es significativo estadísticamente se puede apreciar que los valores de Mr2% dependen del factor de velocidad y no de la presión.

**Figura B-5-36:** Mr2%: efectos principales P y V, interacción PV.



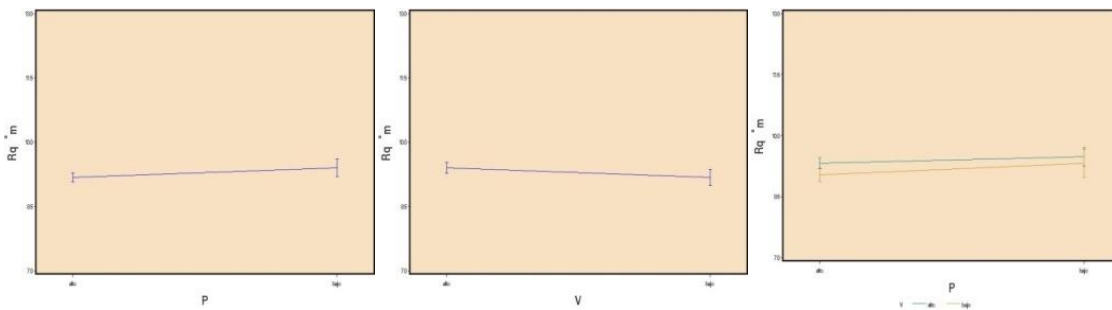
**Rmr%:** El efecto del factor principal velocidad es significativo, el de presión no es significativo al cambio de niveles alto y bajo, cuando la velocidad es alta el Rmr% es alto y cuando es la velocidad es baja Rmr% es bajo; la interacción de los factores principales es significativo para Rmr%, ya que el efecto de la velocidad depende del nivel donde esté la presión, los valores de Rmr% dependen de la combinación del factor de velocidad y de la presión para presión alta el nivel de velocidad no aumenta ni disminuye la respuesta, cuando la presión es baja, la velocidad causa un cambio en la variable respuesta.

**Figura B-5-37:** Rmr%: efectos principales P y V, interacción PV.



**Rq:** El efecto del factor principal de velocidad es igual que el de presión pero en sentido contrario, los valores cuando cambia alguno de los factores no son significativos y la interacción de los factores principales tampoco, indicando que la variable respuesta depende del tamaño de grano de la piedra y el ángulo de contacto.

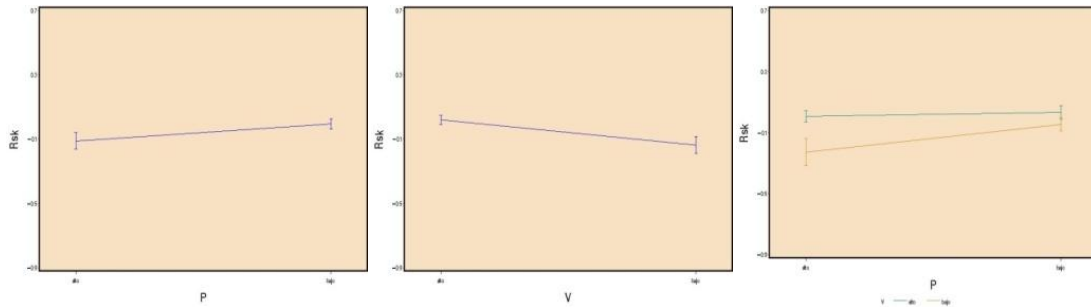
**Figura B-5-38:** Rq: efectos principales P y V, interacción PV.



**Rsk:** El efecto del factor principal velocidad es igual que el de presión pero en sentido contrario, cuando la presión es alta la respuesta Rsk es menor y cuando la presión es baja el Rsk es mayor, al contrario de cuando la velocidad es alta el Rsk es alto y cuando es la velocidad es baja Rsk es bajo; la interacción de los factores principales no es significativo para Rks, ya que el efecto de la presión no depende del nivel donde esté la

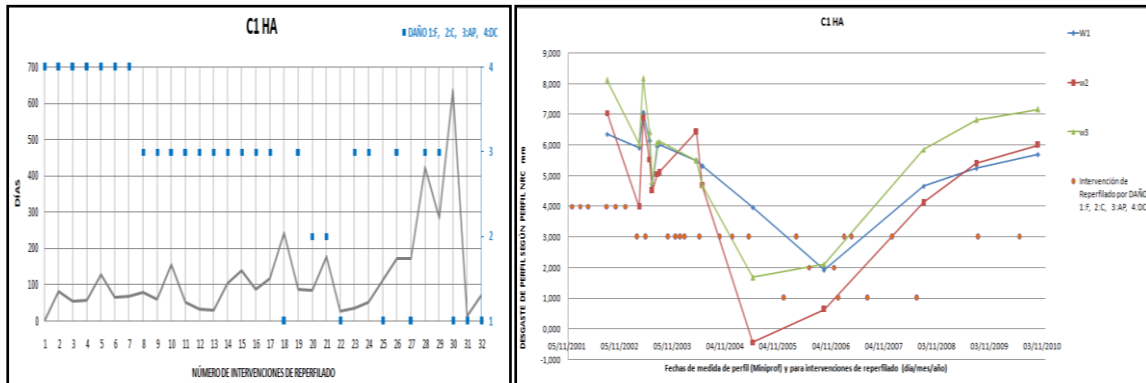
velocidad y viceversa, aunque no es significativo estadísticamente se puede apreciar que los valores de Rsk dependen del factor de presión y no de la velocidad, aunque el Rsk en la combinación con presión alta la velocidad baja da un menor valor y velocidad alta un valor mayor, pero si la presión es baja los valores tanto para velocidad alta y baja son muy cercanos.

**Figura B-5-39:** Rsk: efectos principales P y V, interacción PV.



## B.2 Especificación de curvas

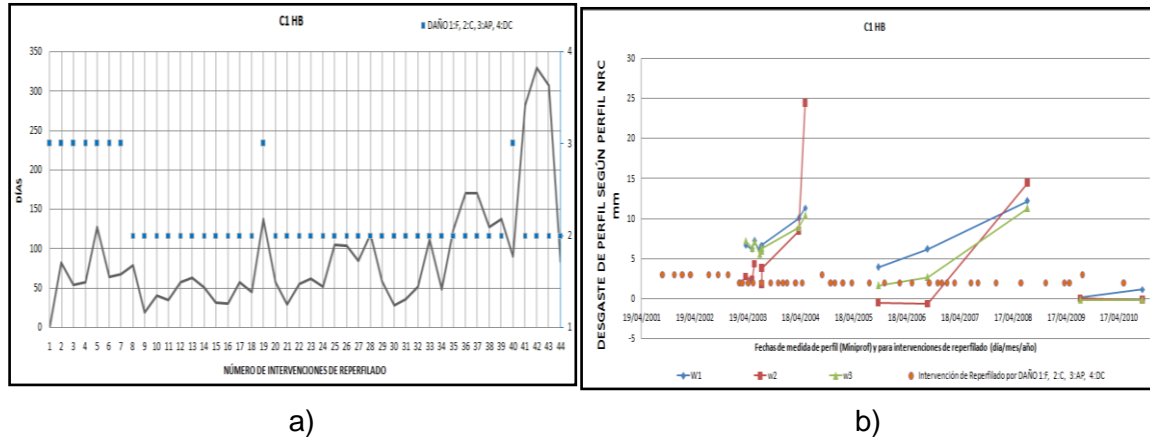
**Figura B-5-40:** C1 HA a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste.



a)

b)

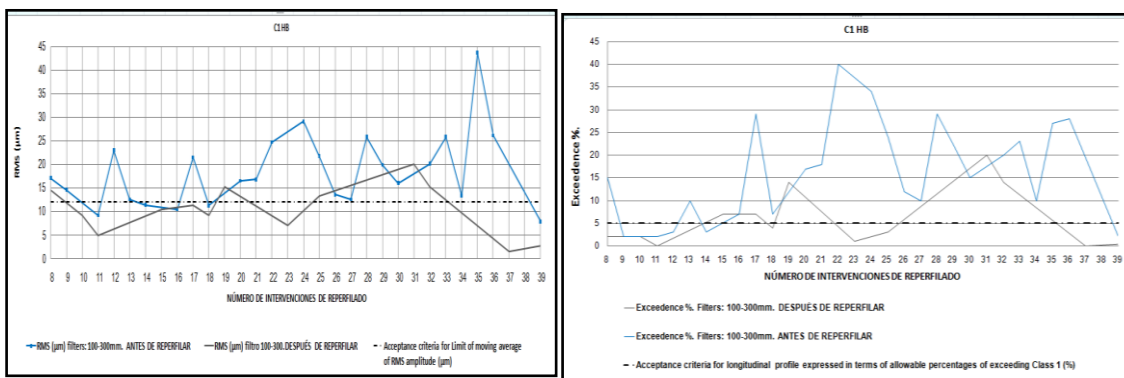
Figura B-5-41: C1 HB a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste.



a)

b)

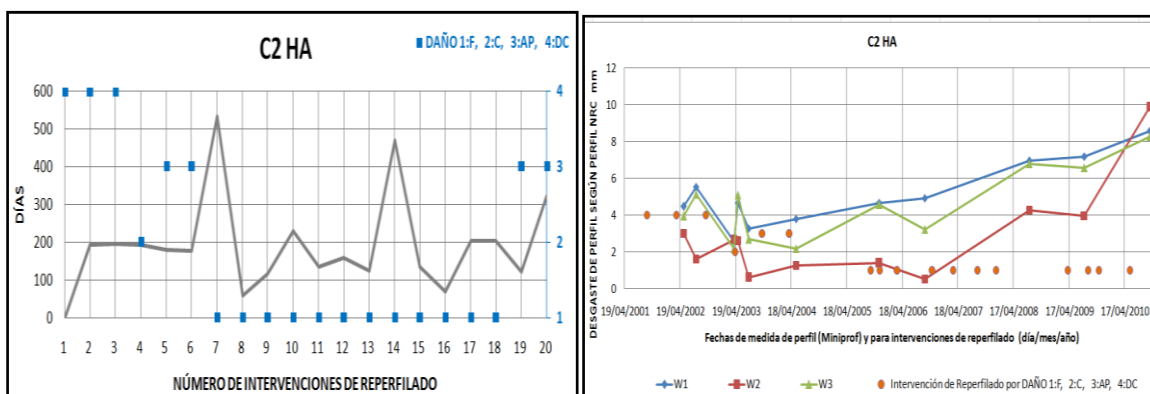
Figura B-5-42: C1 HB. a) RMS  $\mu\text{m}$ , b) % excedencia



a)

b)

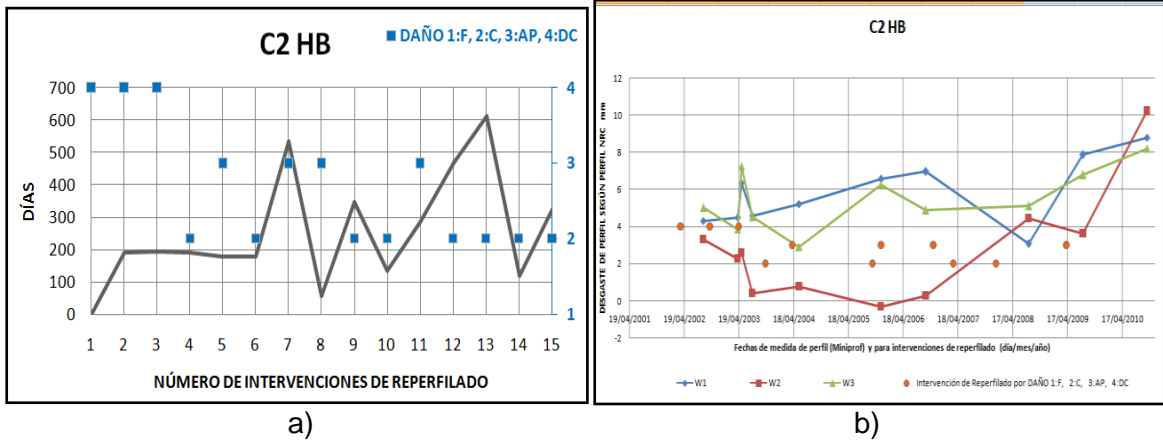
Figura B-5-43: C2 HA. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste.



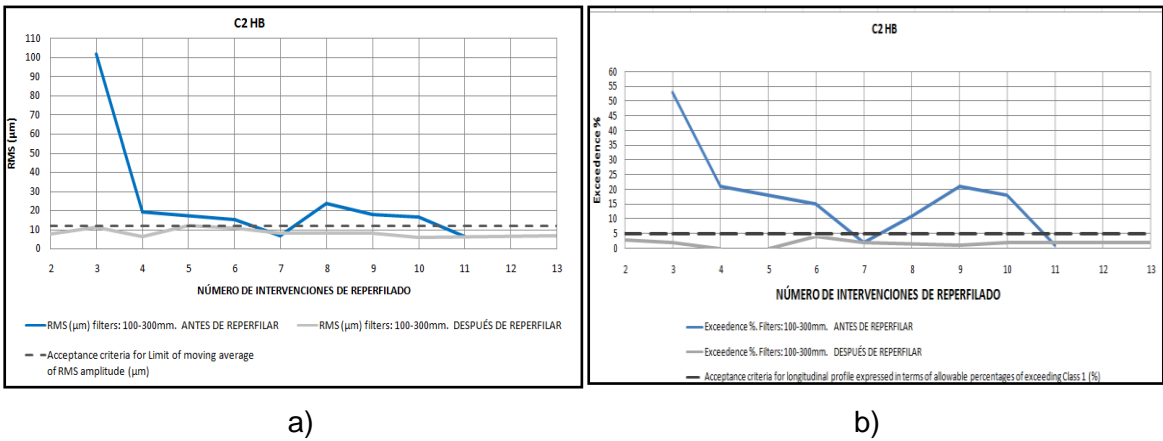
a)

b)

**Figura B-5-44: C2 HB.** a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste.



**Figura B-5-45: C2 HB.** a) RMS  $\mu\text{m}$ , b) % excedencia



**Figura B-5-46: C3 HA.** a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste.

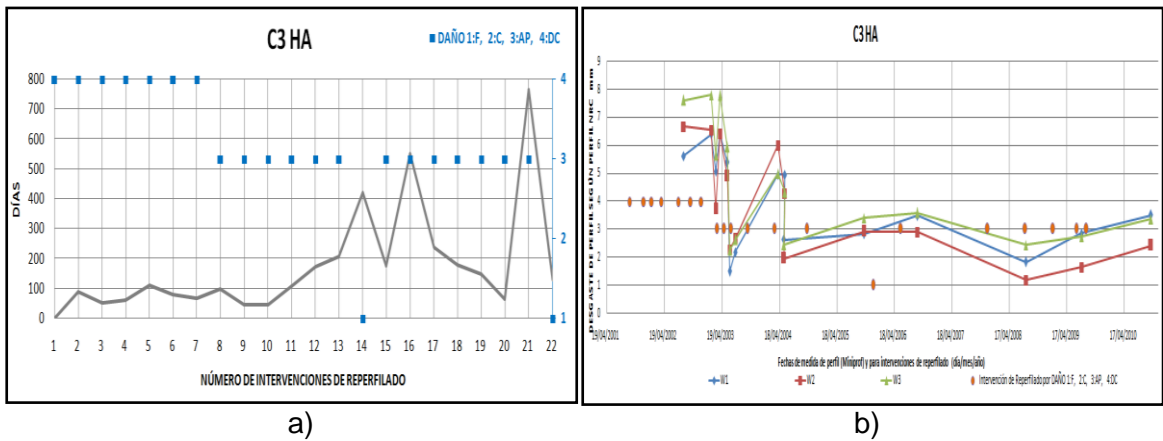
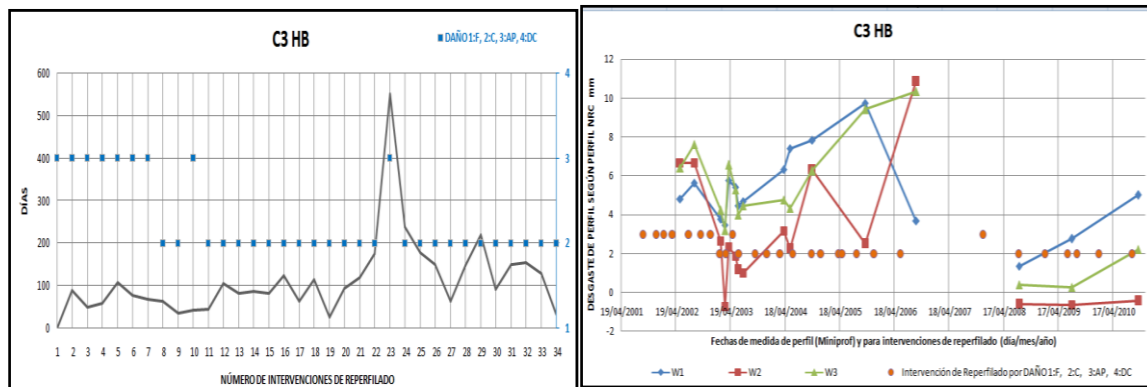


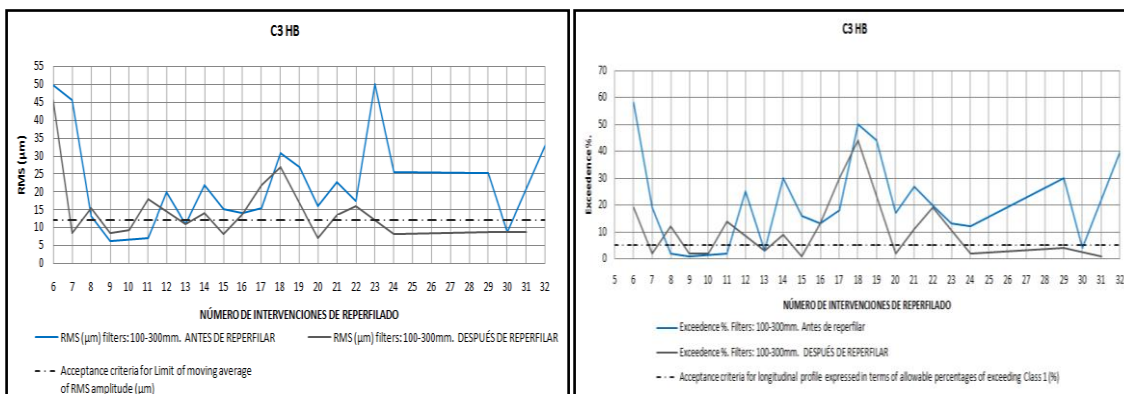
Figura B-5-47: C3 HB. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste.



a)

b)

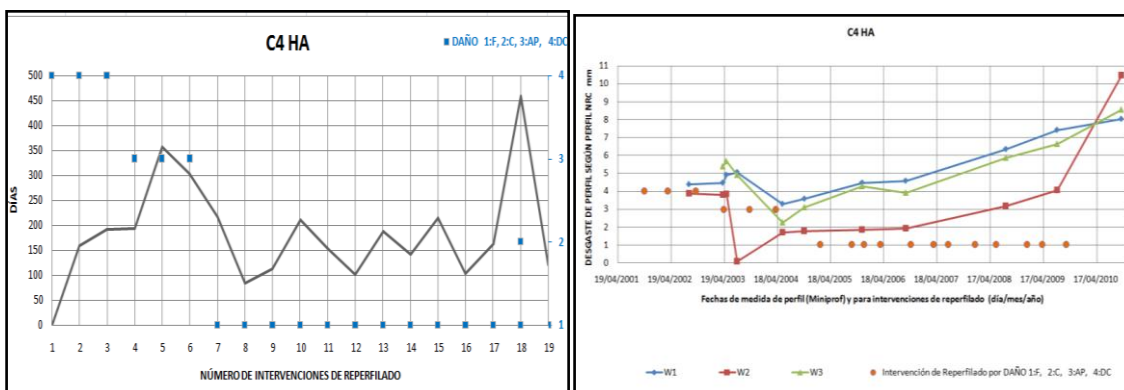
Figura B5-48: C3 HB. a) RMS  $\mu\text{m}$ , b) % excedencia.



a)

b)

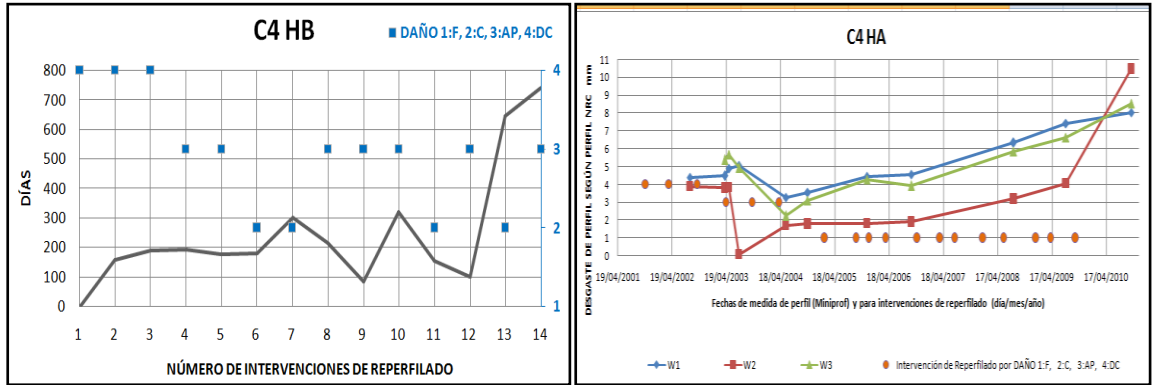
Figura B-5-49: C4 HA. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste.



a)

b)

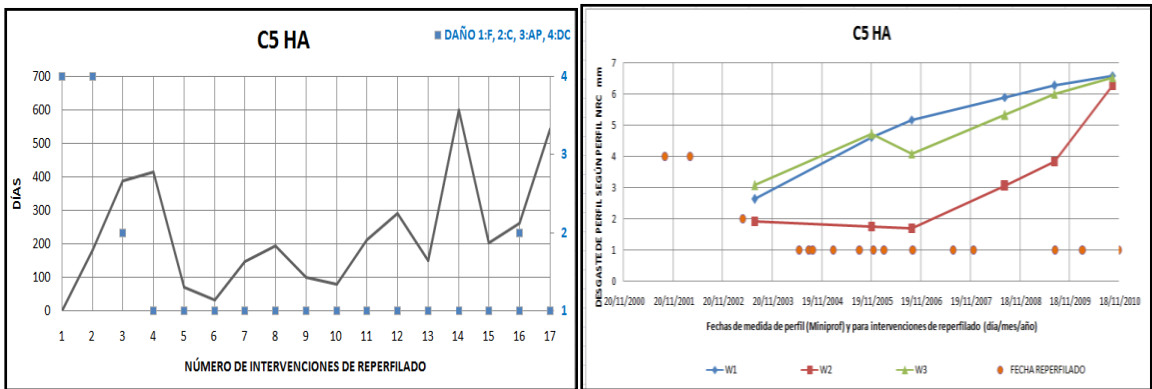
**Figura B-5-50:** C4 HB. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste.



a)

b)

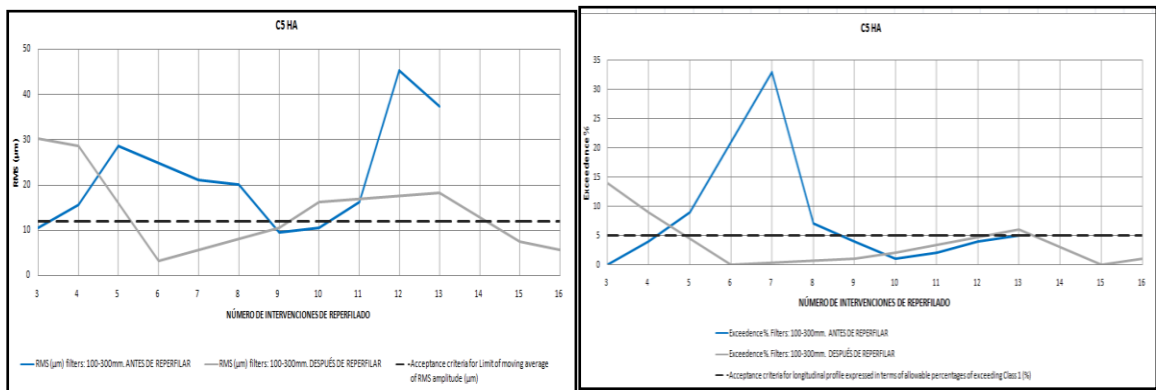
**Figura B-5-51:** C5 HA. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste.



a)

b)

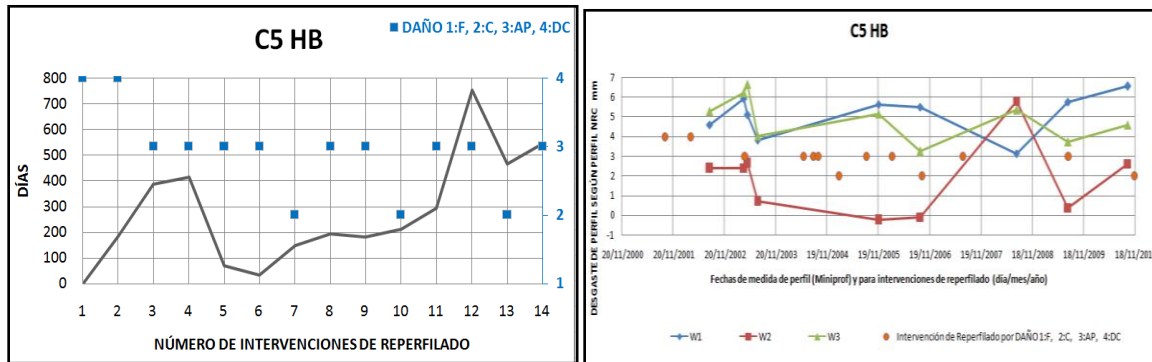
**Figura B-5-52:** C5 HA. a) RMS  $\mu\text{m}$ , b) % excedencia.



a)

b)

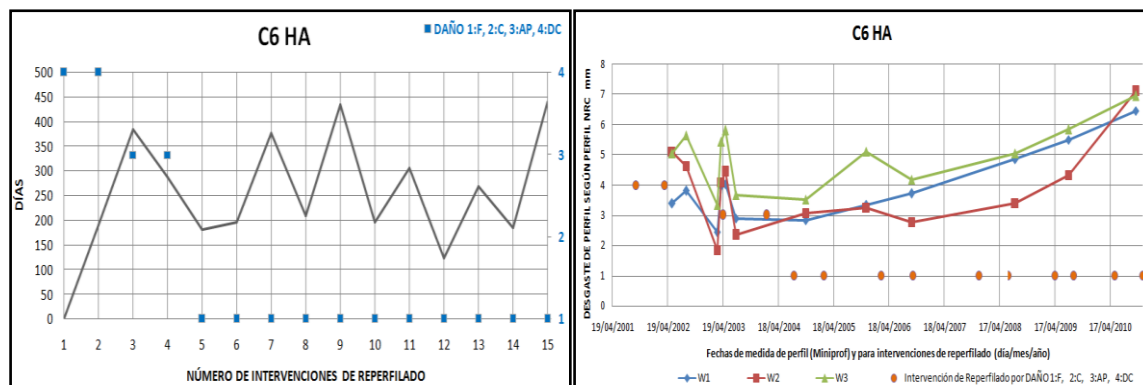
Figura B-5-53: C5 HB. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste.



a)

b)

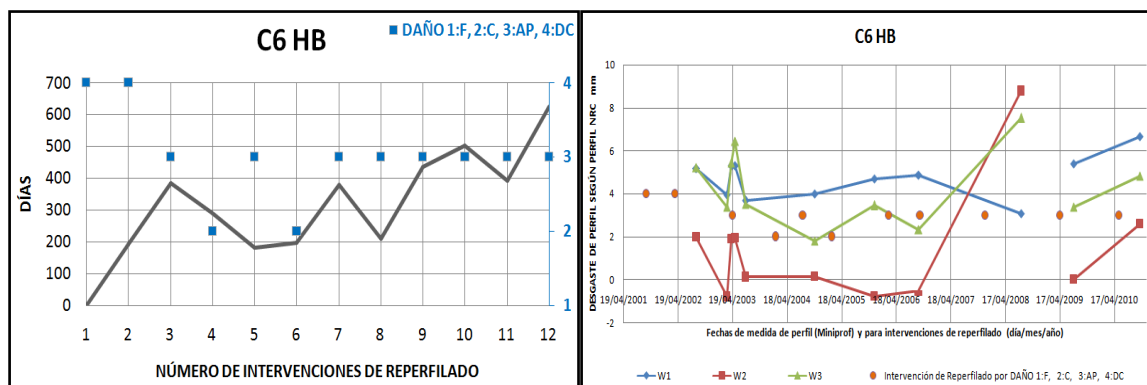
Figura B-5-54: C6 HA. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste.



a)

b)

Figura B-5-55: C6 HB. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste.

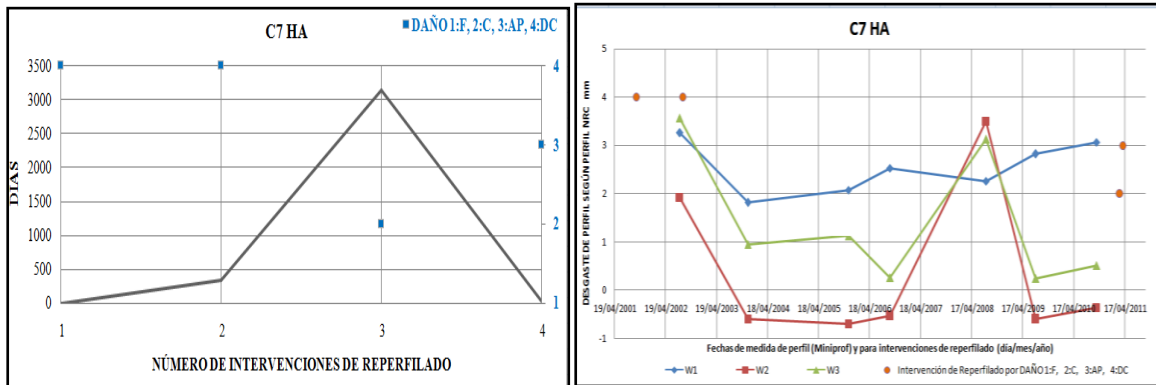


a)

b)



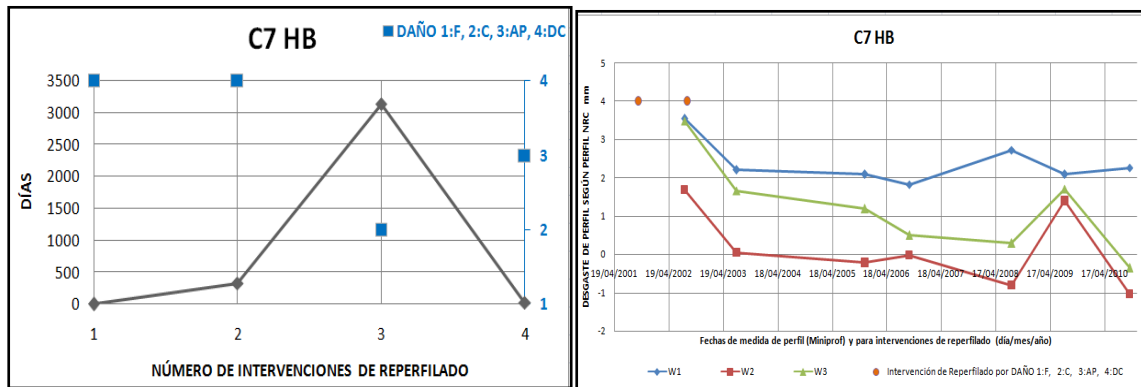
**Figura B-5-56: C7 HA.** a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste.



a)

b)

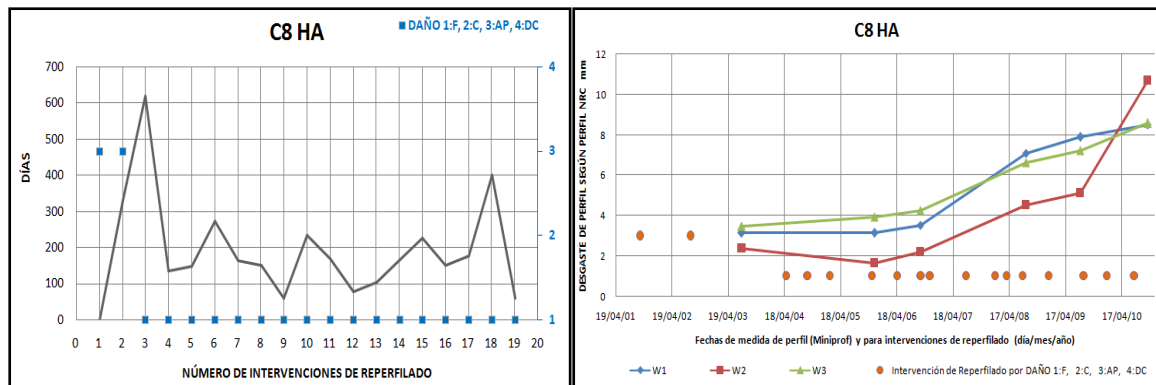
**Figura B-5-57: C7 HB.** a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste.



a)

b)

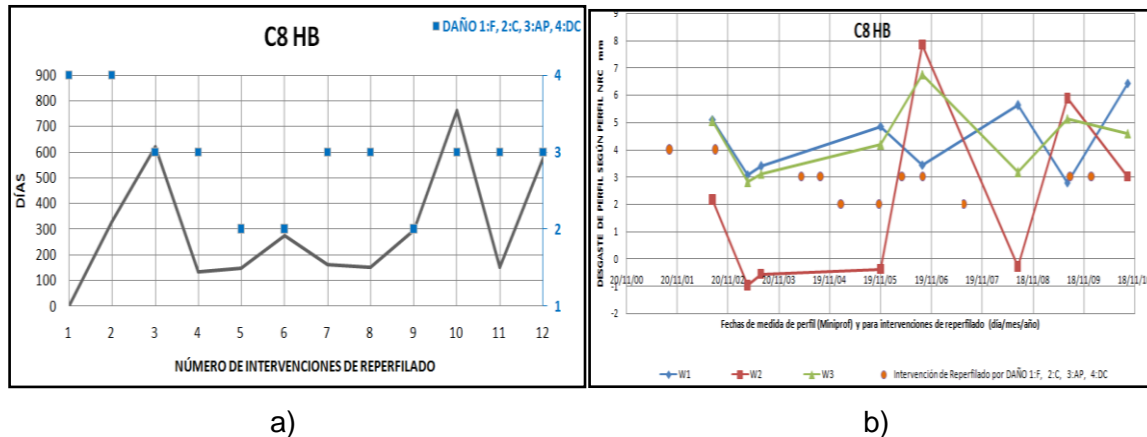
**Figura B-5-58: C8 HA.** a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste.



a)

b)

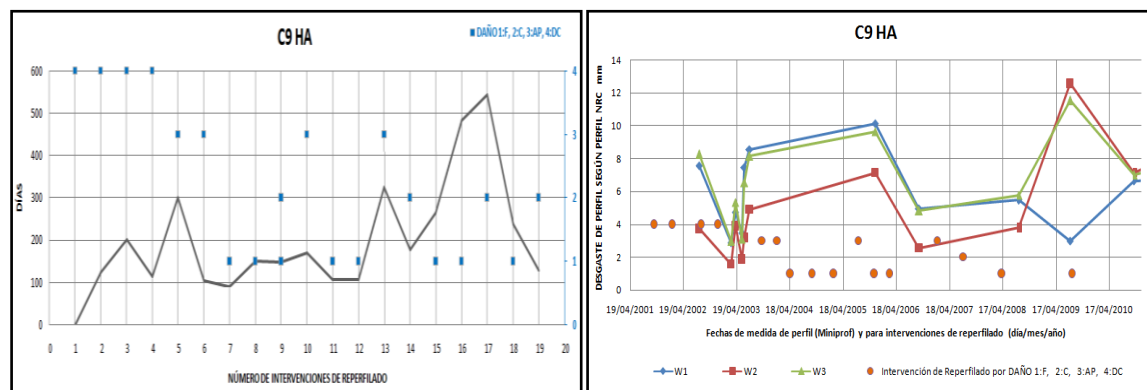
Figura B-5-59: C8 HB. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste.



a)

b)

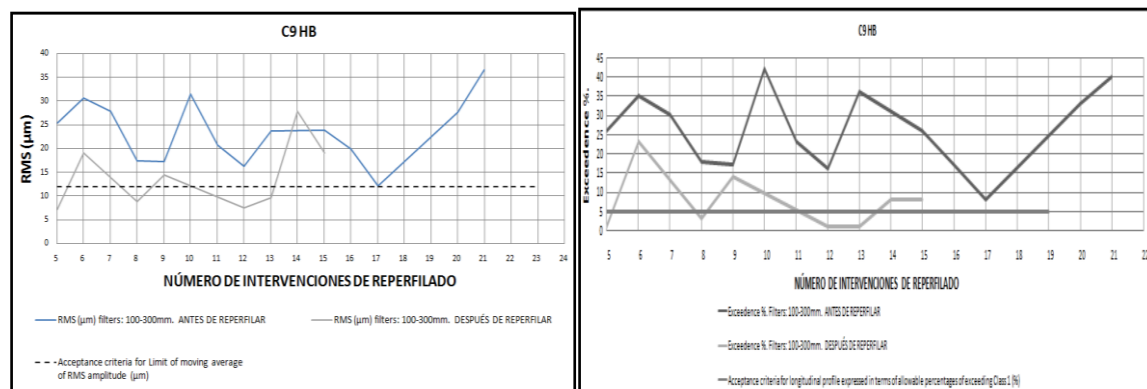
Figura B-5-60: C9 HA. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste.



a)

b)

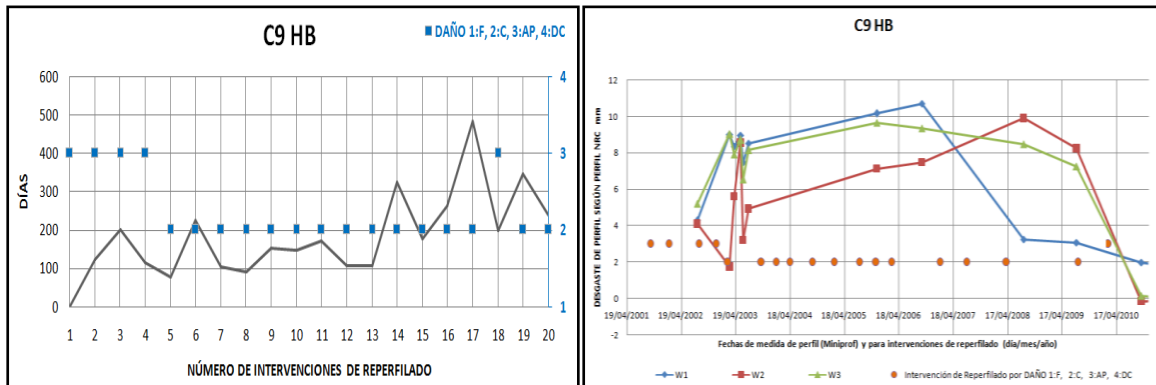
Figura B-5-61: C9 HB. a) RMS  $\mu\text{M}$ , b) % excedencia.



a)

b)

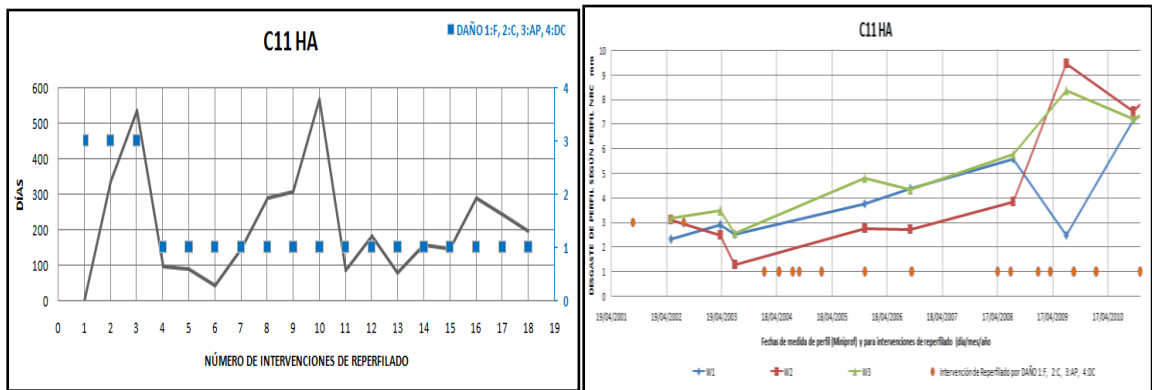
**Figura B-5-62: C9 HB.** a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste.



a)

b)

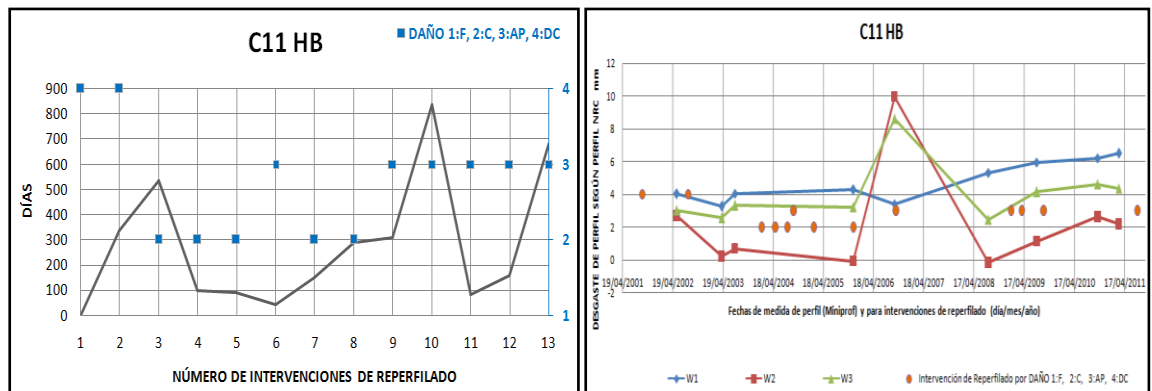
**Figura B-5-63: C11 HA.** a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste.



a)

b)

**Figura B-5-64: C11 HB.** a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste.



a)

b)

Figura B-5-65: C11 HB. a) RMS  $\mu\text{M}$ , b) % excedencia.

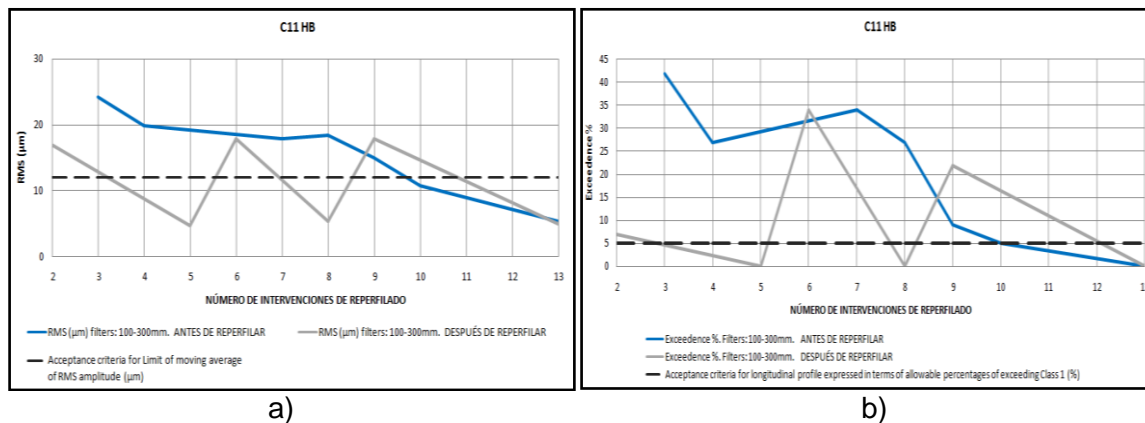


Figura B-5-66: C12 HA. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste.

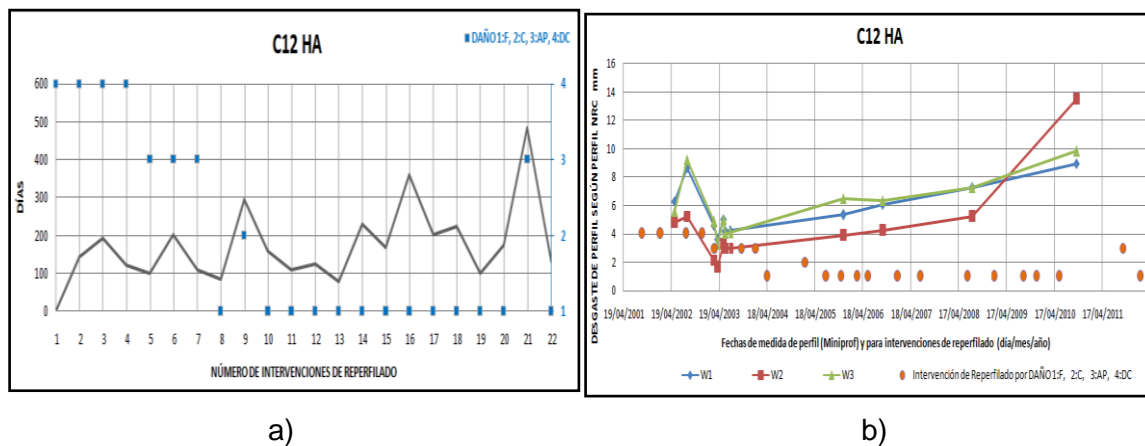


Figura B-5-67: C12 HB. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste.

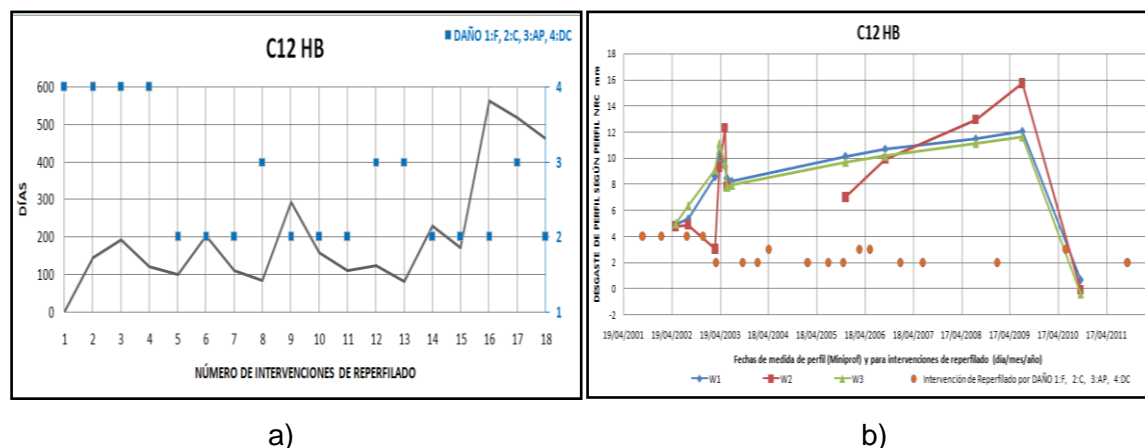
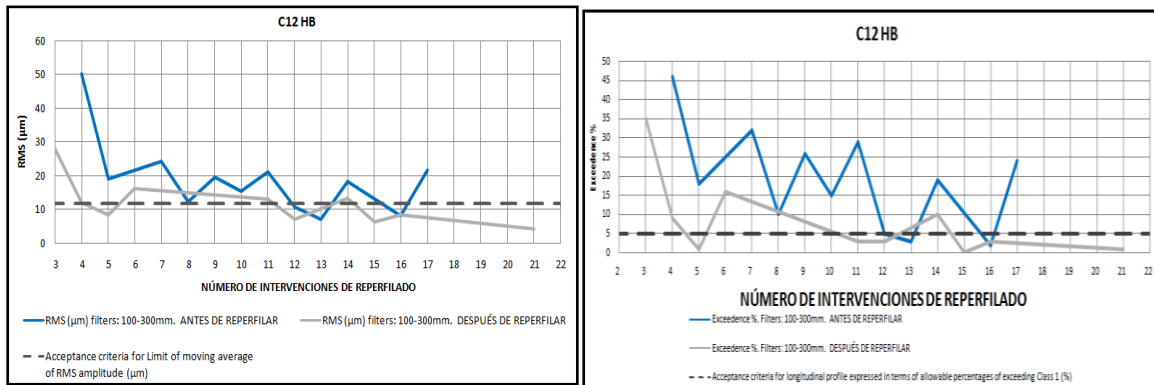


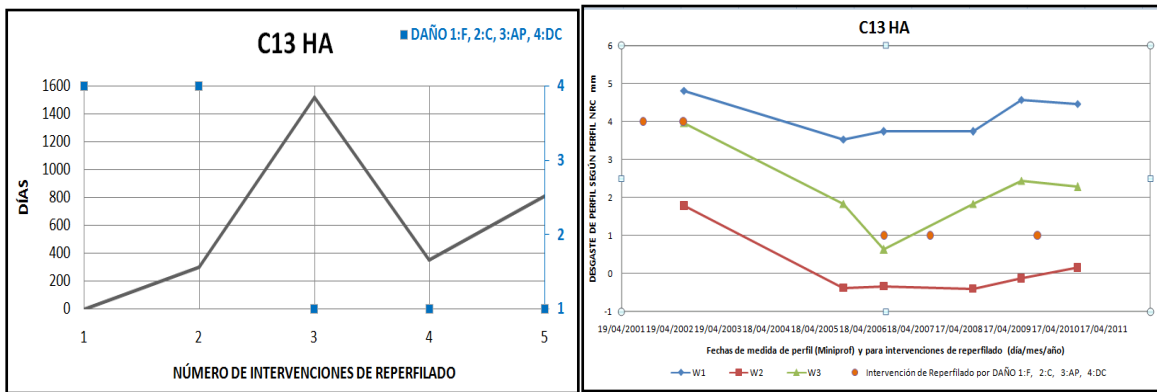
Figura B5-68: C12 HB. a) RMS  $\mu\text{m}$ , b) %excedencia.



a)

b)

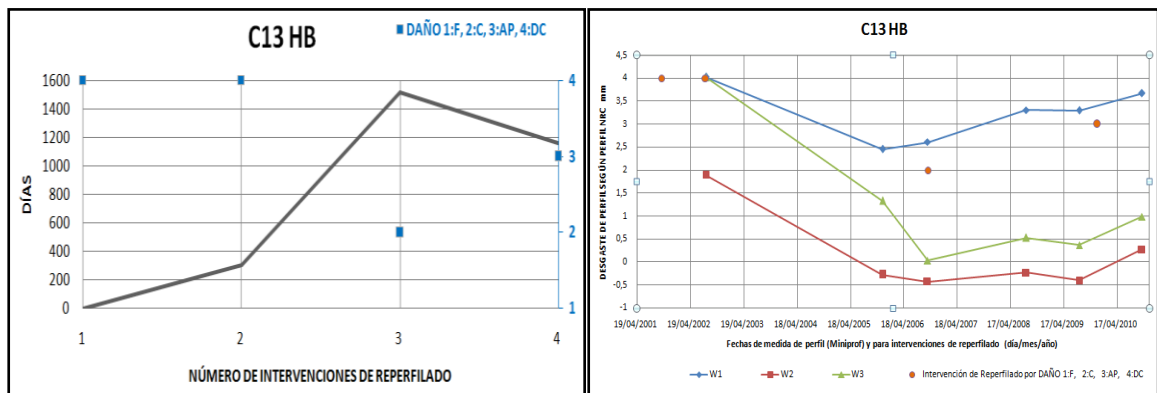
Figura B-5-69: C13 HA. a) curva de intervenciones de repavido, b) curva de desgaste.



a)

b)

Figura B-5-70: C13 HB. a) curva de intervenciones de repavido, b) curva de desgaste.



a)

b)

Figura B-5-71: C14 HA. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste.

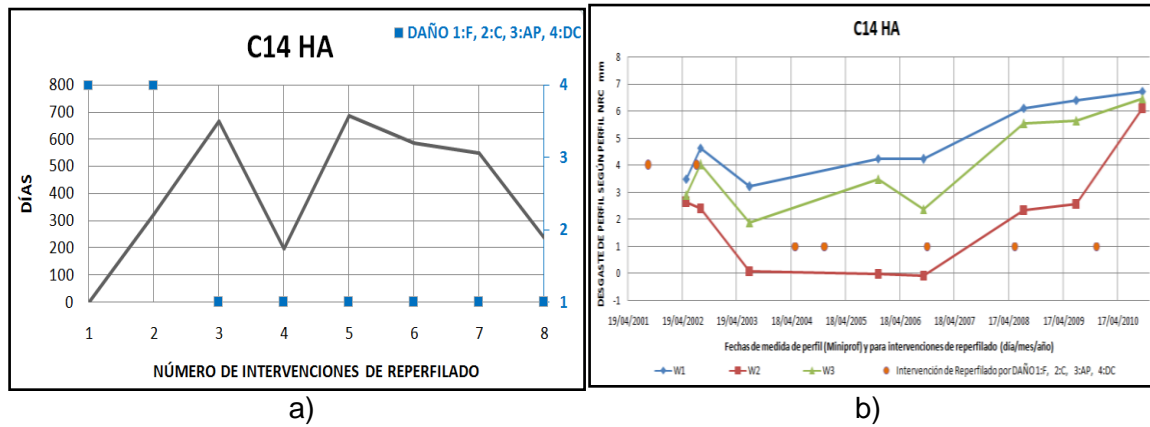


Figura B-5-72: C14 HB. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste.

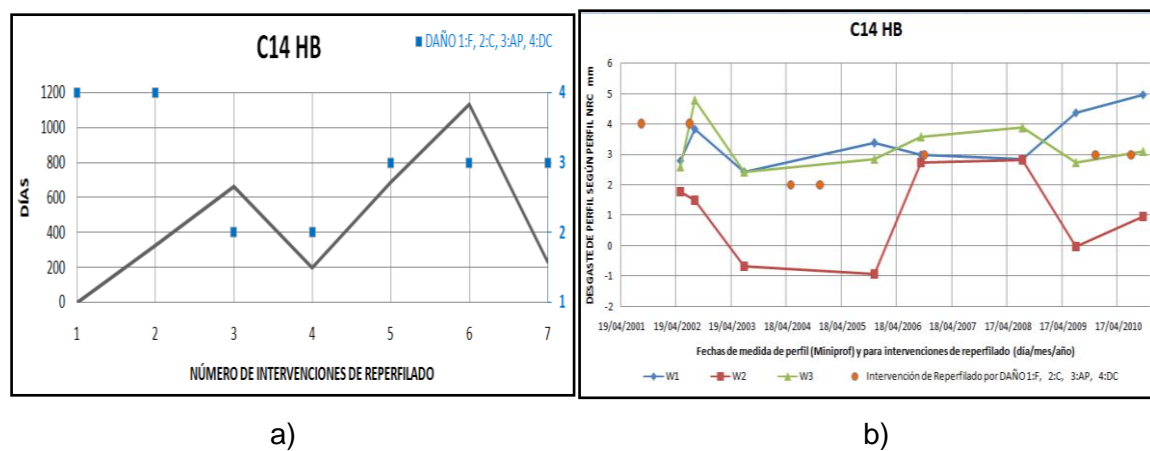
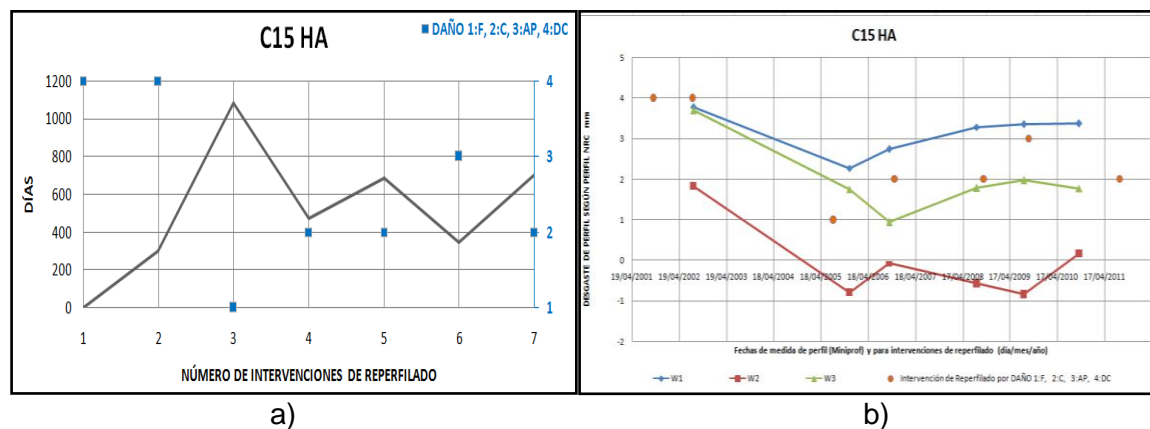
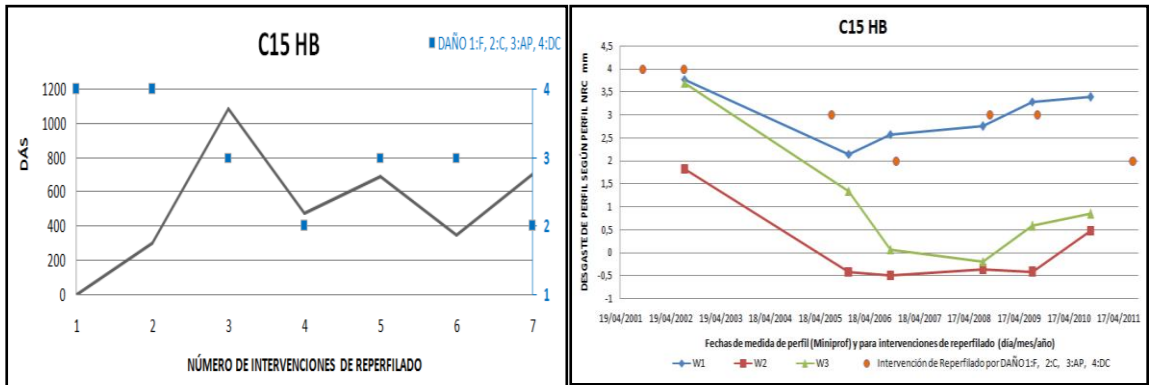


Figura B-5-73: C15 HA. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste.



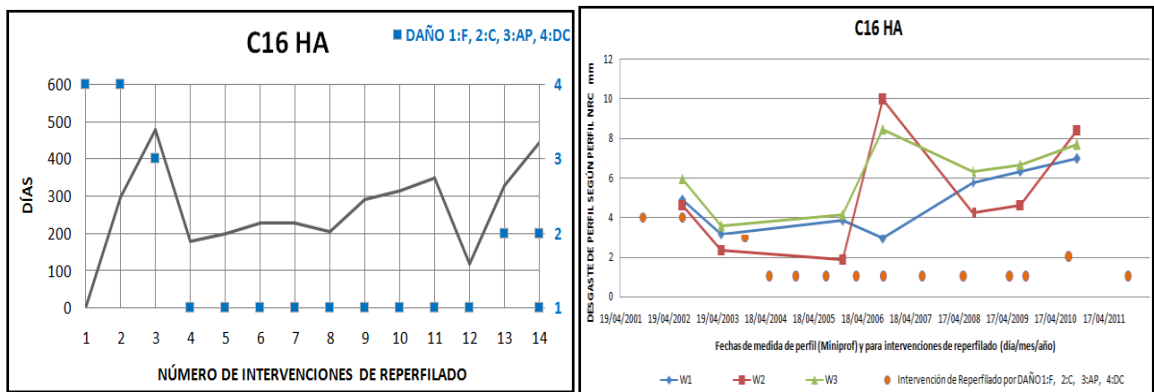
**Figura B-5-74:** C15 HB. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste.



a)

b)

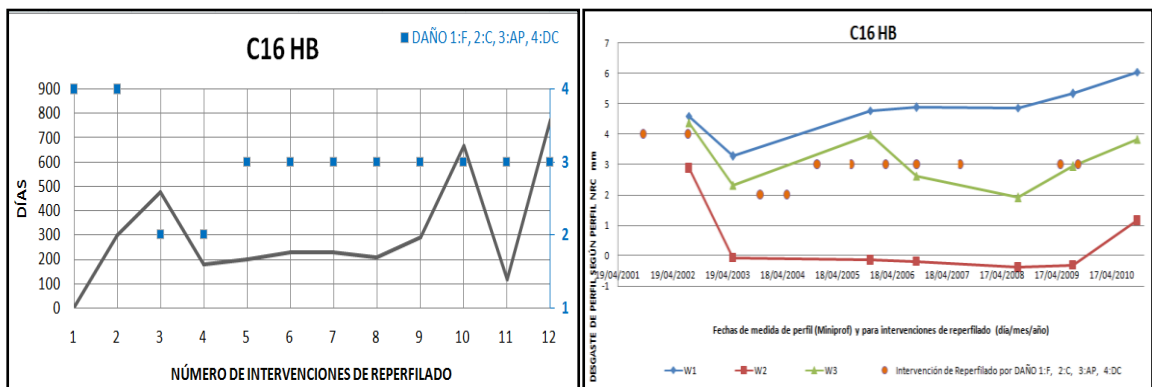
**Figura B-5-75:** C16 HA. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste.



a)

b)

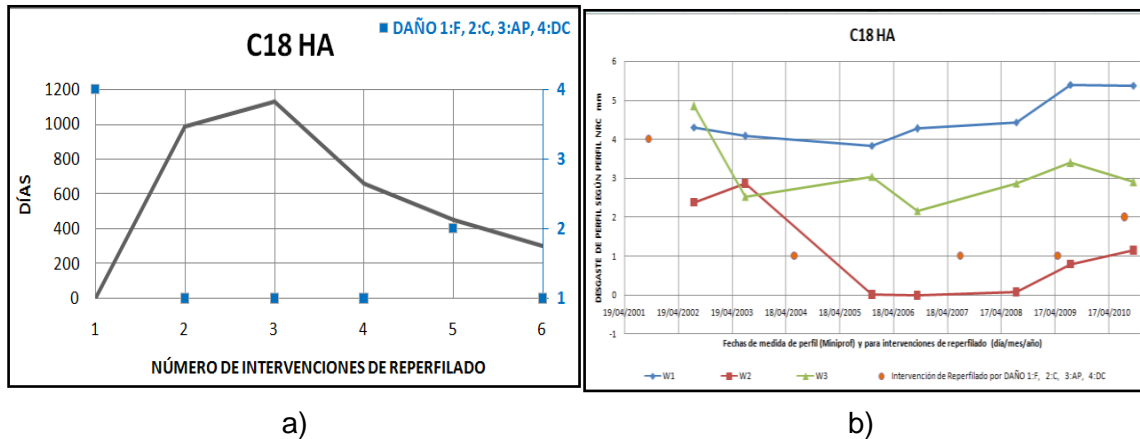
**Figura B-5-76:** C16 HB. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste.



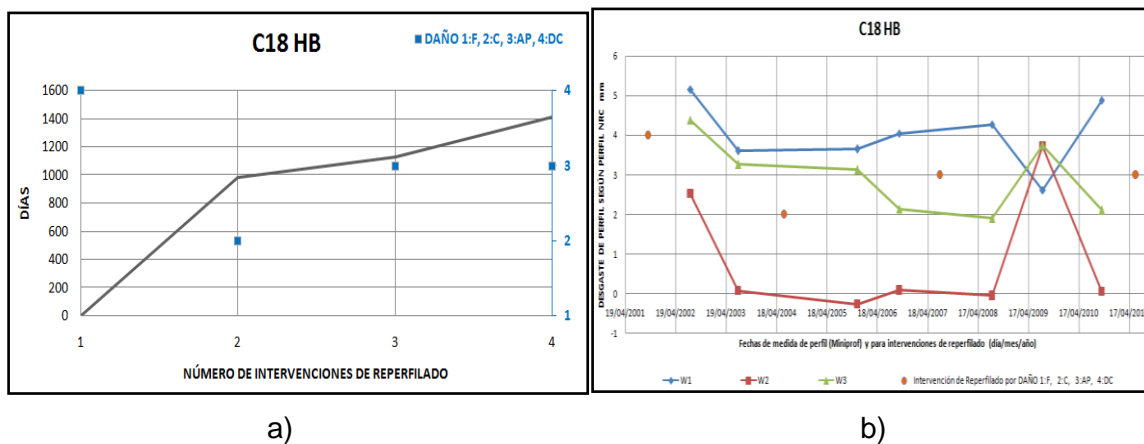
a)

b)

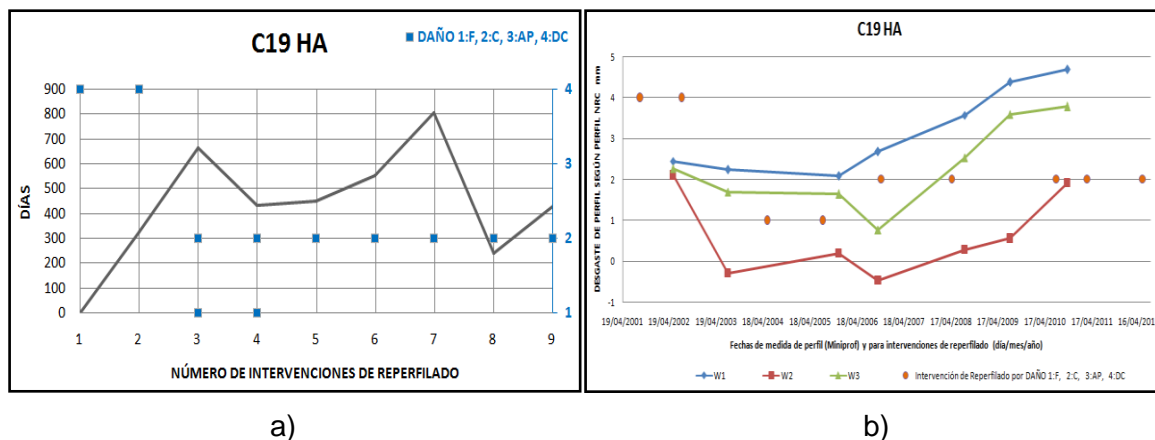
**Figura B-5-77:** C18 HA. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste.



**Figura B-5-78:** C18 HB. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste.

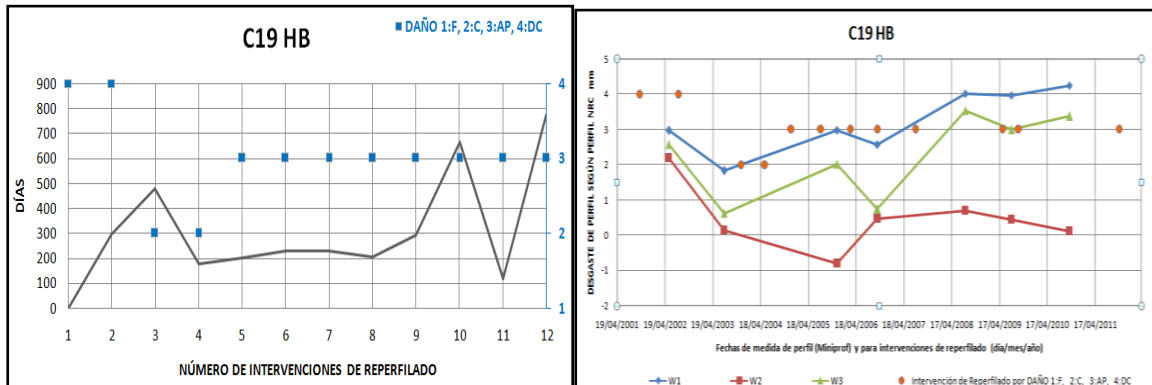


**Figura B-5-79:** C19 HA. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste.





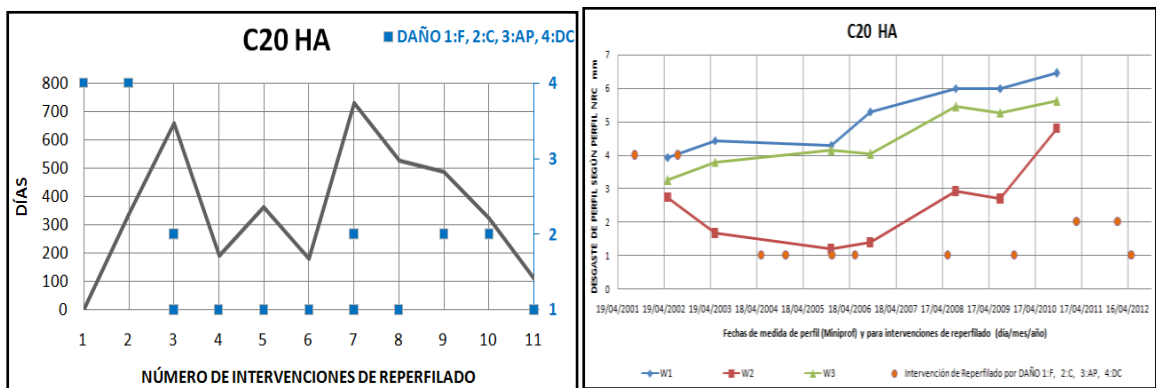
**Figura B-5-80: C19 HB.** a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste.



a)

b)

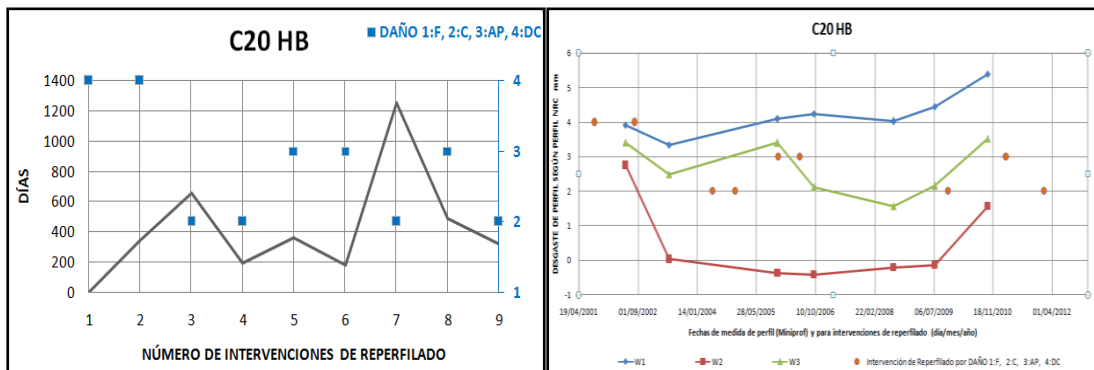
**Figura B-5-81: C20 HA.** a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste.



a)

b)

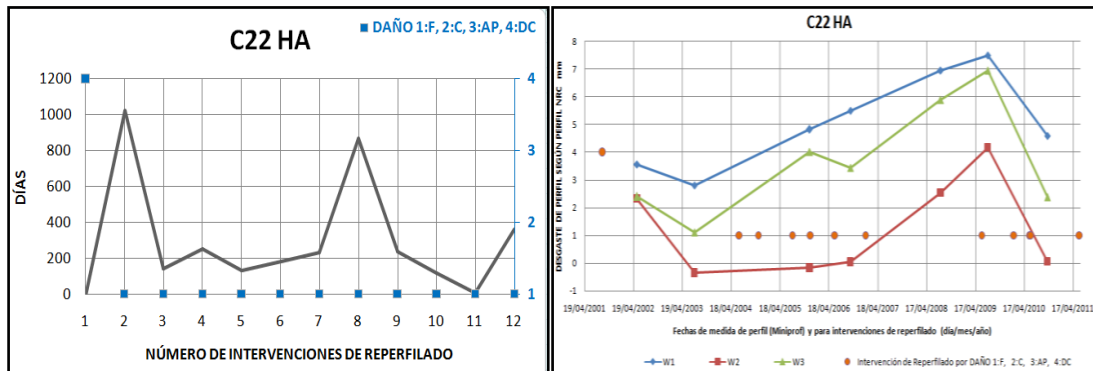
**Figura B-5-82: C20 HB.** a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste.



a)

b)

Figura B-5-83: C22 HA. a) curva de intervenciones de reperfilado, b) curva de desgaste.



a)

b)

### B.3 Cálculo área de contacto teórica y real

#### B.3.1 Área de contacto para ensayos 0%, 0.8GPa, en seco y lubricado

Tabla B-5-4: Área teórica por método de Hertz.

Ensayo a 0% de deslizamiento		
Parámetros	RIEL	RUEDA
Radio (m)	0,0235	0,0235
Young (GPa)	2,1E+11	2,1E+11
R.Poisson	0,28	0,28
m	4,38857E-12	4,38857E-12
B	42,55319149	
Carga	1470	[N]
L	0,007	[m]
a	0,000166058	[m]
P promedio	632,3093202	[MPa]
P máx.	805,0793484	[MPa]
Área de contacto	2,32481E-06	[m <sup>2</sup> ]
Área de contacto	2,325	[mm <sup>2</sup> ]

**Tabla B-5-5:** Área real por método de G&W para superficie E1.

<b>E1</b>			
<b>Parámetros</b>	<b>Rueda</b>	<b>Riel</b>	
<b>Rq</b>		9,31665E-06	<b>[m]</b>
<b>Poisson</b>	0,28	0,28	
<b>Dureza</b>	2940000000	388080000	<b>[Pa]</b>
<b>Módulo de elasticidad</b>	2E+11	2E+11	<b>[Pa]</b>
<b>EC</b>	1,08507E+11		<b>[Pa]</b>
<b>R</b>		2,42983E-05	<b>[m]</b>
<b><math>\psi</math></b>	173		
<b>cálculo</b>			
<b>Carga</b>	<b>L</b>	1470	<b>[N]</b>
<b>Modulo combinado</b>	<b>Ec</b>	1,08507E+11	<b>[Pa]</b>
<b>Rq</b>	<b><math>\sigma</math></b>	9,31665E-06	<b>[m]</b>
<b>Radio asperezas</b>	<b>R</b>	2,42983E-05	<b>[m]</b>
<b>Área real</b>	<b>Ar</b>	0,039	<b>[mm 2]</b>
<b>radio huella</b>	<b>a</b>	15,046	<b>[mm]</b>
<b>Presión media</b>	<b>Pm</b>	37,626	<b>[GPa]</b>
<b>Número asperezas</b>	<b>n</b>	54,526	<b>[número de asperezas]</b>
<b>Número asperezas medido</b>	<b>Rpc</b>	5,423	<b>pks/mm</b>
<b>Numero de asperezas medido (L=7mm)</b>	<b>Nm</b>	37,961	<b>pks</b>
<b>Área Real de contacto</b>	<b>Arc</b>	1,472	<b>[mm 2]</b>
<b>Presión media real de contacto</b>	<b>Pmrc</b>	0,999	<b>[GPa]</b>

**Tabla B-5-6:** Área real por método de G&W para superficie E2.

<b>E2</b>			
<b>Parámetros</b>	<b>Rueda</b>	<b>Riel</b>	
<b>Rq</b>		9,4797E-06	<b>[m]</b>
<b>Poisson</b>	0,28	0,28	
<b>Dureza</b>	2940000000	395250000	<b>[Pa]</b>
<b>Módulo de elasticidad</b>	2E+11	2E+11	<b>[Pa]</b>
<b>EC</b>	1,08507E+11		<b>[Pa]</b>
<b>R</b>		2,5341E-05	<b>[m]</b>
<b>ψ</b>	168		
<b>cálculo</b>			
<b>Carga</b>	<b>L</b>	1470	<b>[N]</b>
<b>Modulo combinado</b>	<b>Ec</b>	1,08507E+11	<b>[Pa]</b>
<b>Rq</b>	<b>σ</b>	9,4797E-06	<b>[m]</b>
<b>Radio asperezas</b>	<b>R</b>	2,5341E-05	<b>[m]</b>
<b>Área real por aspereza</b>	<b>Ar</b>	0,039	<b>[mm 2]</b>
<b>radio huella</b>	<b>a</b>	15,499	<b>[mm]</b>
<b>Presión media</b>	<b>Pm</b>	37,165	<b>[GPa]</b>
<b>Número asperezas</b>	<b>n</b>	52,021	<b>[número de asperezas]</b>
<b>Número asperezas medido</b>	<b>Rpc</b>	6,043	<b>pks/mm</b>
<b>Numero de asperezas medido (L=7mm)</b>	<b>Nm</b>	42,301	<b>pks</b>
<b>Área Real de contacto</b>	<b>Arc</b>	1,661	<b>[mm 2]</b>
<b>Presión media real de contacto</b>	<b>Pmrc</b>	0,885	<b>[GPa]</b>

Tabla B-5-7: Área real por método de G&amp;W para superficie E3.

<b>E3</b>			
<b>Parámetros</b>	<b>Rueda</b>	<b>Riel</b>	
<b>Rq</b>		9,03425E-06	<b>[m]</b>
<b>Poisson</b>	0,28	0,28	
<b>Dureza</b>	2940000000	404080000	<b>[Pa]</b>
<b>Módulo de elasticidad</b>	2E+11	2E+11	<b>[Pa]</b>
<b>EC</b>	1,08507E+11		<b>[Pa]</b>
<b>R</b>		2,19769E-05	<b>[m]</b>
<b><math>\psi</math></b>	172		
<b>cálculo</b>			
<b>Carga</b>	<b>L</b>	1470	<b>[N]</b>
<b>Modulo combinado</b>	<b>Ec</b>	1,08507E+11	<b>[Pa]</b>
<b>Rq</b>	<b><math>\sigma</math></b>	9,03425E-06	<b>[m]</b>
<b>Radio asperezas</b>	<b>R</b>	2,19769E-05	<b>[m]</b>
<b>Área real</b>	<b>Ar</b>	0,037451673	<b>[mm 2]</b>
<b>radio huella</b>	<b>a</b>	14,091	<b>[mm]</b>
<b>Presión media</b>	<b>Pm</b>	38,959	<b>[GPa]</b>
<b>Número asperezas</b>	<b>n</b>	60,043	<b>[número de asperezas]</b>
<b>Número asperezas medido</b>	<b>Rpc</b>	5,118	<b>pk/mm</b>
<b>Numero de asperezas medido (L=7mm)</b>	<b>Nm</b>	35,826	<b>pk</b>
<b>Área Real de contacto</b>	<b>Arc</b>	1,342	<b>[mm 2]</b>
<b>Presión media real de contacto</b>	<b>Pmrc</b>	1,096	<b>[GPa]</b>

**Tabla B-5-8:** Área real por método de G&W para superficie E4.

<b>E4</b>			
<b>Parámetros</b>	<b>Rueda</b>	<b>Riel</b>	
<b>Rq</b>		0,000008213	<b>[m]</b>
<b>Poisson</b>	0,28	0,28	
<b>Dureza</b>	2940000000	380889000	<b>[Pa]</b>
<b>Módulo de elasticidad</b>	2E+11	2E+11	<b>[Pa]</b>
<b>EC</b>	1,08507E+11		<b>[Pa]</b>
<b>R</b>		0,000020312	<b>[m]</b>
<b>ψ</b>	181		
<b>cálculo</b>			
<b>Carga</b>	<b>L</b>	1470	<b>[N]</b>
<b>Modulo combinado</b>	<b>Ec</b>	1,08507E+11	<b>[Pa]</b>
<b>Rq</b>	<b>σ</b>	0,000008213	<b>[m]</b>
<b>Radio asperezas</b>	<b>R</b>	0,000020312	<b>[m]</b>
<b>Área real</b>	<b>Ar</b>	0,038	<b>[mm 2]</b>
<b>radio huella</b>	<b>a</b>	12,916	<b>[mm]</b>
<b>Presión media</b>	<b>Pm</b>	38,638	<b>[GPa]</b>
<b>Número asperezas</b>	<b>n</b>	72,054	<b>[número de asperezas]</b>
<b>Número asperezas medido</b>	<b>Rpc</b>	5,118	<b>pks/mm</b>
<b>Numero de asperezas medido (L=7mm)</b>	<b>Nm</b>	35,826	<b>pks</b>
<b>Área Real de contacto</b>	<b>Arc</b>	1,353	<b>[mm 2]</b>
<b>Presión media real de contacto</b>	<b>Pmrc</b>	1,087	<b>[GPa]</b>

Tabla B-5-9: Área real por método de G&amp;W para superficie E5.

<b>E5</b>			
<b>Parámetros</b>	<b>Rueda</b>	<b>Riel</b>	
<b>Rq</b>		1,4932E-06	<b>[m]</b>
<b>Poisson</b>	0,28	0,28	
<b>Dureza</b>	2940000000	381070000	<b>[Pa]</b>
<b>Módulo de elasticidad</b>	2E+11	2E+11	<b>[Pa]</b>
<b>EC</b>	1,0851E+11		<b>[Pa]</b>
<b>R</b>		3,4782E-06	<b>[m]</b>
<b><math>\psi</math></b>	187		
<b>cálculo</b>			
<b>Carga</b>	<b>L</b>	1470	<b>[N]</b>
<b>Modulo combinado</b>	<b>Ec</b>	1,0851E+11	<b>[Pa]</b>
<b>Rq</b>	<b><math>\sigma</math></b>	1,4932E-06	<b>[m]</b>
<b>Radio asperezas</b>	<b>R</b>	3,4782E-06	<b>[m]</b>
<b>Área real</b>	<b>Ar</b>	0,037	<b>[mm 2]</b>
<b>radio huella</b>	<b>a</b>	2,279	<b>[mm]</b>
<b>Presión media por aspereza</b>	<b>Pm</b>	39,813	<b>[GPa]</b>
<b>Número asperezas</b>	<b>n</b>	2246,112	<b>[número de asperezas]</b>
<b>Número asperezas medido</b>	<b>Rpc</b>	18,570	<b>pks/mm</b>
<b>Numero de asperezas medido (L=7mm)</b>	<b>Nm</b>	129,990	<b>pks</b>
<b>Área Real de contacto</b>	<b>Arc</b>	4,764	<b>[mm 2]</b>
<b>Presión media real de contacto</b>	<b>Pmrc</b>	0,309	<b>[GPa]</b>

### B.3.2 Área de contacto para ensayos 5%, 1.1GPa, en seco y lubricado

Al comparar el área de contacto por Hertz (teórico) y el del modelo de G&W (real) los resultados son 4.2mm<sup>2</sup> y 4.1mm<sup>2</sup> respectivamente, esto tiene que ver con la carga aplicada, ya que en los cálculos de área de contacto para las probetas utilizadas en los ensayos 0% y 0.8GPa el área real fue menor que el área teórica, esto se puede apreciar mejor en los supuestos que se hacen más adelante (ver contenido 4.4.3). La presión media de contacto teórica es 0,887GPa y real tenemos 0,914GPa, no es significativa la diferencia, pero es claro que la Presión aumenta, esto se debe a que el área de contacto es aproximadamente igual; la presión de contacto real cuando la superficie no es reperfilada y la carga es mayor que en los ensayos de rodadura pura es de 0,863GPa es menor que la teórica aunque no es una disminución significativa.

**Tabla B-5-10:** Cálculos de área y presión de contacto mediante la teoría de contacto de Hertz para ensayos en seco y lubricado, 5% de deslizamiento y 1.1GPa.

Ensayo a 5% de deslizamiento		
Parámetros	RIEL	RUEDA
<b>Radio (m)</b>	0,0235	0,0235
<b>Young (GPa)</b>	2,1E+11	2,1E+11
<b>Poisson</b>	0,28	0,28
<b>m</b>	4,38857E-12	4,38857E-12
<b>B</b>	42,55319149	
<b>Carga</b>	3724	[N]
<b>L</b>	0,009	[m]
<b>a</b>	0,000233095	[m]
<b>P promedio</b>	887,5718451	[MPa]
<b>P máx.</b>	1130,088929	[MPa]
<b>Área de contacto</b>	4,19572E-06	[m <sup>2</sup> ]
<b>Área de contacto</b>	4,196	[mm <sup>2</sup> ]



**Tabla B-5-11:** Cálculos de área y presión de contacto mediante Modelo de Greenwood - Williamson para superficie reperfilada para ensayos 5% y 1.1GPa.

<b>superficie Reperfilada Ensayos 5%</b>			
<b>Parámetros</b>	<b>Rueda</b>	<b>Riel</b>	
<b>Rq</b>		0,00001656	<b>[m]</b>
<b>Poisson</b>	0,28	0,28	
<b>Dureza</b>	2940000000	381070000	<b>[Pa]</b>
<b>Módulo de elasticidad</b>	2E+11	2E+11	<b>[Pa]</b>
<b>EC</b>	1,08507E+11		<b>[Pa]</b>
<b>R</b>		0,000046034	<b>[m]</b>
<b><math>\psi</math></b>	171		
<b>cálculo</b>			
<b>Carga</b>	<b>L</b>	3724	<b>[N]</b>
<b>Modulo combinado</b>	<b>Ec</b>	1,08507E+11	<b>[Pa]</b>
<b>Rq</b>	<b><math>\sigma</math></b>	0,00001656	<b>[m]</b>
<b>Radio asperezas</b>	<b>R</b>	0,00004603	<b>[m]</b>
<b>Área real</b>	<b>Ar</b>	0,101	<b>[mm<sup>2</sup>]</b>
<b>radio huella</b>	<b>a</b>	27,610	<b>[mm]</b>
<b>Presión media por aspereza</b>	<b>Pm</b>	36,445	<b>[GPa]</b>
<b>Número asperezas</b>	<b>n</b>	42,349	<b>[número de asperezas]</b>
<b>Número asperezas medido</b>	<b>Rpc</b>	4,463	<b>pks/mm</b>
<b>Numero de asperezas medido (L=9mm)</b>	<b>Nm</b>	40,167	<b>pks</b>
<b>Área Real de contacto</b>	<b>Arc</b>	4,074	<b>[mm<sup>2</sup>]</b>
<b>Presión media real de contacto</b>	<b>Pmrc</b>	0,914	<b>[GPa]</b>

**Tabla B-5-12:** Cálculos de área y presión de contacto mediante Modelo de Greenwood - Williamson para superficie sin reperfilar para ensayos 5% y 1.1 GPa.

<b>superficie sin Reperfilar Ensayos 5%</b>			
<b>Parámetros</b>	<b>Rueda</b>	<b>Riel</b>	
<b>Rq</b>		1,283E-06	<b>[m]</b>
<b>Poisson</b>	0,28	0,28	
<b>Dureza</b>	2940000000	381070000	<b>[Pa]</b>
<b>Módulo de elasticidad</b>	2E+11	2E+11	<b>[Pa]</b>
<b>EC</b>	1,08507E+11		<b>[Pa]</b>
<b>R</b>		4,002E-06	<b>[m]</b>
<b>ψ</b>	161		
<b>cálculo</b>			
<b>Carga</b>	<b>L</b>	3724	<b>[N]</b>
<b>Modulo combinado</b>	<b>Ec</b>	1,0851E+11	<b>[Pa]</b>
<b>Rq</b>	<b>σ</b>	1,283E-06	<b>[m]</b>
<b>Radio asperezas</b>	<b>R</b>	4,002E-06	<b>[m]</b>
<b>Área real</b>	<b>Ar</b>	0,10743656	<b>[mm<sup>2</sup>]</b>
<b>radio huella</b>	<b>a</b>	2,26595808	<b>[mm]</b>
<b>Presión media por aspereza</b>	<b>Pm</b>	34,4049037	<b>[GPa]</b>
<b>Número asperezas</b>	<b>n</b>	6660,37771	<b>[número de asperezas]</b>
<b>Número asperezas medido</b>	<b>Rpc</b>	4,463	<b>pks/mm</b>
<b>Numero de asperezas medido (L=9mm)</b>	<b>Nm</b>	40,167	<b>pks</b>
<b>Área Real de contacto</b>	<b>Arc</b>	4,315	<b>[mm<sup>2</sup>]</b>
<b>Presión media real de contacto</b>	<b>Pmrc</b>	0,863	<b>[GPa]</b>

## Bibliografía

- [1] Lewis R, Olofsson U. Wheel-Rail Interface Handbook. S.L.: Taylor & Francis Group, 2009.
- [2] Santa JF. Development of a lubrication system for wear and friction control in wheel/rail interfaces. PhD Thesis, National University of Colombia. Medellín, Colombia. 2012.
- [3] Eadiea D, Elvidgea D, Oldknowa K, Stockb R, Pointnerb P, Kalousekc J, Klauserd P. The Effects of Top of Rail Friction Modifier on Wear and Rolling Contact Fatigue: Full-Scale Rail–Wheel Test Rig Evaluation, Analysis And Modeling. *Wear* Volumen 265, Números 9-10, 30 de octubre de 2008, páginas 1222-1230.
- [4] Suda Y, Iwasa T, Komine H, Fuji T, Matsumoto K, Ubukata N, Nakai T, Tanimoto M, Kishimoto Y. The Basic Study On Friction Control Between Wheel And Rail Machine And Scale Model Vehicle. Proceedings of the Sixth International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems. Vol. II, Gothenburg, Sweden, 2003, pp. 343–348.
- [5] Jaramillo J, Zapata D, Palacio M, Toro A. Effect of Lubrication on Wear and Traction Coefficient in a Simulated Rail/Wheel Contact. 8th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems. Medellín, 2009.
- [6] Tomberger C, Dietmaier P, Sextro W, Six K. Friction in wheel–rail contact: A model comprising interfacial fluids, surface roughness and temperature. *Wear*, Volume 271, 2011, Pp 2-12.
- [7] León M. Diccionario de tecnología ferroviaria. Ediciones Díaz de Santos, 6/05/2005 - 716 páginas. Pág. 402.
- [8] Maya S. Efecto de modificadores de fricción en la fatiga por contacto rodante-deslizante en aceros para rieles. Anteproyecto de Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. 2011.

- [9] Ruiz, J. Efecto del lubricante en el crecimiento de grietas generadas por fatiga de contacto en el par rueda-riel en ensayos disco sobre disco con condiciones del Metro de Medellín. Tesis de Pregrado . Universidad Nacional de Colombia.2011.
- [10] Manual de Operación y Mantenimiento del Modelo TG-8. Harsco Track Technologies. 9 de febrero del 2001.
- [11] Marinescu J, Hitchiner M, Hlmann E, Inasaki I. Handbook of Machining With Grinding Wheels. CRC, 21/12/2006 - 596 páginas.
- [12] Speno Intenational. En línea [http://www.speno.ch/es/4\\_schleifscheiben.asp](http://www.speno.ch/es/4_schleifscheiben.asp). Consultado Enero 2012.
- [13] Schoech W, Fröhling RD, Frick A. Rail Maintenance: Same Target – Different Approaches. A Review of Grinding Practices applied in Heavy Haul Railway Systems. 2009. Available: <http://www.speno.ch/pdf/Schoech-Paper-IHHA2009.pdf>.
- [14] Giraldo D. Mecánica del contacto y Lubricación, Módulo 3. II Cátedra Internacional de Ingeniería. Curso de Tribología Aplicada. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Minas. Escuela de Ingeniería de Materiales. Medellín. 2008.
- [15] Suarez FA. Mecánica del contacto, Parte I: Superficies. II Cátedra Internacional de Ingeniería. Curso de Tribología Aplicada. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Minas. Escuela de Ingeniería de Materiales. Medellín. 2008.
- [16] I.M. Hutchings, Tribology: friction and wear of engineering materials. Butterworth-Heinemann Ltd, 1992.
- [17] Williams JA. Engineering Tribology. Oxford University Press, 1994.
- [18]Norton RL. Machine design: contact surface. Worcester, Massachusetts. Prentice hall-Pearson. Third edition,2006. Pp. 440-446.
- [19] Whitehouse D. The parameter rash - is there a cure? Wear, 83:75-78. 1982.
- [20] Perfil de parámetros. @2006-2014 by François Blateyron - Digital Surf. <http://www.digitalsurf.fr/en/guideprofileparameters.html>.
- [21] Conocimiento Parámetros 2D de rugosidad. Copyright Olympus Corporation. [http://www.olympus-ims.com/es/knowledge/metrology/roughness/3d\\_parameter/](http://www.olympus-ims.com/es/knowledge/metrology/roughness/3d_parameter/).
- [22] Thomas TR. Rough Surfaces. Second Edition. Production Engineering Department, Chalmers University of Technology, Sweden.1999.

- [23] Greenwood JA. A Unified Theory of Surface Roughness. Proceedings of the Royal Society, A393, 133-57. 1984.
- [24] Williamson JBP. The microtopography of Surface Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 182 (3K), 21-30.1967-8.
- [25] Greenwood JA. Williamson JBP. Contact of Nominally flat surface. Proceedings of the Royal Society. London A, 295, 300-319. 1966.
- [26] Mate CM. Tribology on the Small Scale: A Bottom Up Approach to Friction, Lubrication, and Wear. OUP Oxford. 2008. Pp. 50-59.
- [27] Lundmark J. Licentiate Thesis: Rail Grinding and its impact on the wear of Wheels and Rails. Luleå University of Technology. Department of Applied Physics and Mechanical Engineering. Division of Machine Elements. 2007.
- [28] Olofsson U, Sundvall K. Influence of Leaf, Humidity and Applied Lubrication on Friction in the Wheel-Rail Contact: Pin-on-Disc Experiments. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Sept 2004, 218, 3.
- [29] Johnson KL. Contact Mechanics. Cambridge University Press, 1985.
- [30] Frick A, Schoech W. "Target profiles for grinding a never ending story". ARM – Conference 2008.
- [31] Satoh Y, Iwafuchi K. Effect of rail grinding on rolling contact fatigue in railway rail used in conventional line in Japan . *Frictional Materials Group, Materials Technology Division, Railway Technical Research Institute, Hikari-cho 2-8-38, Kokubunji-shi, 185-8540 Tokyo, Japan.*
- [32] Schoech W. New Rail Maintenance Trends in Europe. Speno International SA Anti-headcheck-profiles and Preventative Cyclic Grinding. AusRAIL PLUS 2009.
- [33] Schoech W. "Advancing Rail Grinding Strategies in Europe".ARM Conference 2006.Speno International.
- [34] Magel E, Kalousek J. *The application of contact mechanics to rail profile design and rail grinding. Wear* 253 (2002) 308–316.
- [35] Grassie S. Requirements for Transverse Railhead Profile and Railhead Roughness Following Grinding. 6th IHHA Conference, Cape Town, SouthAfrica, April 6-10, 1997.
- [36] Dings PC, Dittrich MG. Roughness on Dutch Railway Wheels and Rails. Journal of Sound and Vibration, 193 (1), 103-112, 1996.

- [37] Corrdier JF, Fodiman F. Experimental Characterization of Wheel And Rail Surface Roughness. *Journal of Sound and Vibration*, 231 (3), 667-672, 2000.
- [38] Thompson DJ. On the Relationship Between Wheel and Rail Surface Roughness and Rolling Noise. *Journal of Sound and Vibration*, 193 (1), 149-160, 1996.
- [39] Cooper J. Specifying Rail Grinding Requirements. 6th International Heavy Haul Conference, Cape Town, South Africa, 6-10 April, 1997.
- [40] Lundmark J, Hoglund E, Prakash B. Running in Behaviour of Rail and Wheel. Contacting Surfaces. Lulea University of Technology, Division of Machine Elements SE-97187 Lulea, Sweden.
- [41] Lundmark J, Kassfeldt E, Hardell J, and Prakash B. Influence of initial surface topography on tribological performance of the wheel/rail interface during rolling/sliding conditions..Division of Machine Elements, Luleå University of Technology, SE 97187 Luleå, Sweden.
- [42] Sellgren U. Simulation Driven Design: Motives, Means and Opportunities, Doctoral thesis, 1999.
- [43] Sellgren U. Architecting models of technical systems for non-routine simulations, Proceedings International Conference on Engineering Design, ICED03, Stockholm, Sweden, 19-21 August, 2003.
- [44] Hagman LA. Measurement and Modeling of Microslip for Engineering Surfaces in Contact, Doctoral Thesis, KTH, stockholm, Sweden TRITA-MMK 1997.
- [45] Lu X, Cotter J, Eadie DT. Laboratory study of the tribological properties of friction modifier thin films for friction control at the wheel/rail interface. *Wear*, Volume 259, Pp. 1262-1269. 2005.
- [46] Chiddicketal. United States Patent No. 5,173,204. Solid lubricant with high and positive friction characteristic. 1991.
- [47] Harrison H, McCanney T, Cotter J. Recent developments in coefficient of friction measurements at the rail/wheel interface. *Wear* 253 (2002) 114–123.
- [48] Masao Tomeoka N. K, et al. Friction control between wheel and rail by means of on-board lubrication. *Wear* 253 (2002). P 124-129.
- [49] Stock, R et al. Influencing rolling contact fatigue through top of rail friction modifier application– a full scale wheel-rail test rig study. 8th International Conference on Contact

Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM2009), Firenze, Italy, September 15-18, 2009.

[50] Kusuda M. The effect of friction modifiers on reducing lateral force and rail renewal cost in Shinkansen track. 8th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems. (CM2009), Firenze, Italy, September 15-18, 2009.

[51] Masao T, Naoji K, Masuhisa T, Eiji M, Machi N. Friction control between wheel and rail by means of on-board lubrication, *Wear*, Volume 253, , Pp 124-129, 2002.

[52] Zapata D, Jaramillo J, Toro A. Rolling contact and adhesive wear of bainitic and pearlitic steels in low load regime. *Wear*, 271, 1, 393-399, 2011.

[53] Schoech W, Heyder R, Dollevoet R. "Specific railhead profiles to control rolling contact fatigue—design and maintenance, the European approach". 8th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM2009), Firenze, Italy, September 15-18, 2009.

[54] Heyder R, Hempe T. Maintenance strategies and material concepts to control rolling contact fatigue of rail. 8th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM2009), Firenze, Italy, September 15-18, 2009.

[55] Kanematsu Y, Satoh Y, Iwafuchi K. Influence of type of grinding stones on efficiency of rail grinding. 8th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems, Italy. September 2009.

[56] Schoech W. Joint research and testing of innovative grinding applications Speno International SA. AusRAIL PLUS 2011.

[57] Grassie SL, Fischmeister E, Oberhauser A. Rail breaks, rail grinding and rolling contact fatigue. 8th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems "Contact Mechanics 2009" Firenze, Italy – 15-18 September 2009.

[58] Magel EE, Acquati M. Preliminary wheel/rail interface study: what benefits?. *8th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM2009), Firenze, Italy, September 15-18, 2009.*

[59] Rippeth D, Kalousek J, Simmons J. A case study of the effect of lubrication and profile grinding on low rail roll-over derailments at CSX transportation 'CSX Transportation, Jacksonville, FL, USA b N.R.C., Vancouver, BC, Canada' *Loram Maintenance of Way, Minneapolis, MN, USA* Received 9 December 1994; accepted 9 May 1995. *Wear*.

[60] Pérez Velásquez LM, Sánchez González JC. Análisis de mecanismos de desgaste y comportamiento de las superficies presentes en el contacto rodante- deslizante en función del ciclaje trabajo de grado dirigido para optar al título de ingeniero mecánico. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, Sede Medellín, Facultad de Minas, Grupo de Tribología y Superficies.

[61] Maya Johnson S. Estudio del comportamiento de concentradores de esfuerzo bajo condiciones de fatiga en aceros para rieles. Tesis de Maestría en Ingeniería Materiales y Procesos. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, FACULTAD DE MINAS. 2013.

[62] Fletcher DI, Beynon JH. «The effect of intermittent lubrication on the fatigue life of pearlitic rail steel in rolling-sliding contact», Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit, vol. 214, n.o 3, pp. 145-158, may 2000.

[63] De Vries P, Sroba P, Magel E. Preventive Grinding Moves into the 21 st Century on Canadian Pacific Railway (2001). Available from: [http://www.arena.org/files/library/2001\\_Conference\\_Proceedings/00042.pdf](http://www.arena.org/files/library/2001_Conference_Proceedings/00042.pdf)

[64] Satoh Y, Iwafuchi K. *Effect of rail grinding on rolling contact fatigue in railway rail used in conventional line in Japan. Wear* 265 (2008) 1342-1348.

[65] Kapoor A, Fletcher DI, Franklin FJ, Beagles AE, Burstow Mark Allen R, Evans G, Jaiswal J. Management and understanding of rolling contact fatigue: WP1: mechanisms of crack initiation: WP2: crack growth: literature survey. Rail Safety and Standards Board; 2006.

[66] Evans G. “Managing rail profile”. *Ironmaking & Steelmaking* (2013) vol. 40, no. 2, pp. 115–119.

[67] Zapata D, Santa JF, Sanchez J, Gonzalez J, Toro A. Effect of Rail Grinding Conditions on Sub-Surface. Microstructure and Surface Roughness of Fatigued Rails. 1st. International Brazilian Conference on TribologyTriboBr-2010, Rio de Janeiro, Brasil. November 2010.

[68] Schoech W. Rolling contact fatigue mitigation by grinding (2007). Available from : [http://www.speno.ch/pdf/Railtech2007\\_1-Rolling%20Contact%20Fatigue%20final\\_1.pdf](http://www.speno.ch/pdf/Railtech2007_1-Rolling%20Contact%20Fatigue%20final_1.pdf).

[69] Standard EN 13231-3:2012. Railway applications - Track - Acceptance of works - Part 3: Acceptance of reprofiling rails in track.



- [70] Chandrasekar S, Farris TN, Hebbar RR, Hucker SA, and. Bulsara VH. Thermal Aspects of Surface Finishing Processes. ASM HANDBOOK: Surface engineering Volume 5 (1994) 341.
- [71] Zapata D, Santa JF, Sanchez J, Gonzalez J, Toro A. Effect of Rail Grinding Conditions on Sub-Surface Microstructure and Surface Roughness of Fatigued Rails. 1st. International Brazilian Conference on Tribology TriBoBr-2010 (2010).
- [72] Santa JF, Sánchez JC, Palacio M, Toro R, Toro A. Wear assessment in a commercial railroad: correlations between rail wear rates and operating conditions. 9th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (2012).
- [73] Schoech W, Girsch G, Heyder R. Advanced rail steel grades and their appropriate maintenance – the key to combat RCF. 9th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems(CM2012), Chengdu, China, August 27-30, 2012.
- [74] Heyder R, Girsch G. Testing of HSH-rails in high speed tracks to minimise rail damage. *Wear*, 258/7-8 (2005) 3, pp. 1014 – 1021.
- [75] Girsch G, Heyder R. Advanced pearlitic and bainitic high strength rails promise to improve rolling contact fatigue resistance. 7th World Congress on Railway Research (WCRR2006), Montreal, Canada, June 4-8, 2006.
- [76] European Standard EN 13674-1: Railway applications – Track – Rail – Part 1: Vignole railway rails 46 kg/m and above. CEN European Committee for Standardization, Brussels, April 2011.
- [77] Deliverable report D4.1.5: Definite Guidelines on the Use of different Rail Grades. INNOTRACK GUIDELINE, [www.innotrack.eu](http://www.innotrack.eu).
- [78] Deliverable report D4.5.5: Guidelines for Management of Rail Grinding. INNOTRACK GUIDELINE, [www.innotrack.eu](http://www.innotrack.eu).
- [79] Technische Mitteilung TM 2010-183 I.NVT 4 zu Ril 824.4005, 824.4015 und 824.8310: Schienenprofil zur Verzögerung der Head-Check-Bildung (Anti-HeadCheck-Profil). DB Netz AG, gültig ab 01.09.2010. [Technical Bulletin TM 2011-276 I.NPI relating to DB Guideline 821.2007A02: Criteria for assessing head check defects on rails. DB Netz AG, valid from 1 March 2012]

202 “Análisis experimental del efecto del proceso de reperfilado sobre el desgaste y fatiga por contacto de rodadura de riel en el sistema rueda-riel en el Metro de Medellín”

---

[80] Schöch W, Frick A, Gustafsson P. Research towards Perfected Rail Maintenance at Malmbanan. International Heavy Haul Association Conference (IHHA2011), Calgary, June 19-22, 2011.